

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Número Especial, 50 Aniversario UAM

ISSN: 2683-2607

No. 138

Ingeniería de Procesos e Hidráulica

**Reactores nucleares modulares de
Generación IV: una ruta hacia
la transición energética**

El Huracán Otis y el Cambio Climático

**De Leibniz a los reactores
nucleares: el desarrollo
del Cálculo fraccional**

Gilberto Espinosa Paredes
Editor invitado

**Termovalorización de desechos
municipales en reactores químicos**



IN MEMORIAM:
Rodolfo Vázquez Rodríguez: Un académico excepcional



Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería
Número Especial, 50 Aniversario UAM, 2024, No. 138

Editorial	3	<i>Sistema fotocatalítico solar integrado con colectores CPC para la degradación de contaminantes recalcitrantes en aguas residuales: nivel planta piloto</i>	51
<i>Reactores nucleares modulares de Generación IV: una ruta hacia la transición energética</i>	6	Elizabeth Rojas García Richard S. Ruiz Martínez	
<i>Comparación de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico con distintas mezclas</i>	15	<i>De Leibniz a los reactores nucleares: el desarrollo del Cálculo fraccional</i>	60
Yuridiana Rocio Galindo Luna Jesús Javier Luna Jaime Jorge Ramos Sierra		<i>Gestión y Manejo del Agua en Grandes Ciudades</i>	70
<i>El Huracán Otis y el Cambio Climático</i>	22	Eugenio Gómez Reyes Marco Antonio Jacobo Villa Felipe de Jesús Armas Vargas Erick Raúl Olvera Prado	
Claudia Rojas Serna		<i>Estimación del tiempo de duración de reservas probadas de energía fósil y potencial de la energía solar</i>	82
<i>La Ingeniería Química y su papel en el Desarrollo Sostenible y la Economía Circular</i>	31	Enrique Barrera Calva Rodolfo Vázquez Rodríguez Germán López Pacheco	
Ariadna A. Morales Pérez Carlos O. Castillo Araiza		<i>Termovalorización de desechos municipales en reactores químicos</i>	93
<i>Acondicionamiento de luz a través de materiales luminiscentes</i>	42	Fanny Ingrid Marín Trujillo Luis Angel Santamaría Padilla Lisette Samartí Ríos Sebastián Alexander Andrade Becerra Luis Álvarez-Icaza Longoria Jesús Álvarez Calderón	
Rosalba Carrera Peralta Rubén Alfredo Hernández Zamudio Federico González García			



Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería
en la WEB

Lea los artículos publicados en
<https://contactos.izt.uam.mx>

Rector General
Dr. José Antonio de los Reyes Heredia
Secretaria General
Dra. Norma Rondero López

UNIDAD IZTAPALAPA

Rectora
Dra. Verónica Medina Bañuelos
Secretario
Dr. Javier Rodríguez Lagunas
*Director de la División de Ciencias
Básicas e Ingeniería*
Dr. Román Linares Romero
*Director de la División de Ciencias
Biológicas y de la Salud*
Dr. José Luis Gómez Olivares

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:

Consejo Editorial:
Dra. Verónica Medina Bañuelos
Dr. Javier Rodríguez Lagunas
Dr. Román Linares Romero
Dr. José Luis Gómez Olivares
UAM- Iztapalapa
Editora en Jefe:
M. C. Alma Edith Martínez Licona
Asistente Editorial:
Lic. Paula López Andrés
Comité Editorial por CBS:
Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura Jose-
fina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis Valverde
Padilla
Por CBI:
Dr. Hugo Ávila Paredes
Por la Universidad Iberoamericana:
Mtro. Adolfo G. Fink Pastrana

CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA.

3ª Época, No. 138, Número Especial, 50 Aniversario de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Ex-Hacienda San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/> y dirección electrónica: cts@xanum.uam.mx Editora responsable MC Alma E. Martínez Licona. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2023-061914482700-102, ISSN 2683-2607, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Mtra. Alma E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, División de CBI y CBS; fecha de última modificación 11 de diciembre de 2024. Tamaño del archivo 17.7 MB.

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

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Fecha de Publicación: Diciembre 2024.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar

el trabajo en Word a <https://contactos.izt.uam.mx/>
Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,
UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310
e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

*Desde un punto de vista histórico, en sus inicios hace 50 años, solo existía como parte de la División de Ciencias Básicas de Ingeniería de la UAM-Iztapalapa, el Departamento de Ingeniería. Bajo una reestructuración aprobada por los órganos colegiados, cambió de nombre, y dio lugar al surgimiento del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica (IPH) y Departamento de Ingeniería Eléctrica.

El Departamento de IPH está compuesto por dos áreas y un grupo de investigación, que cambió de nombre recientemente a áreas académicas: Ingeniería en Recursos Energéticos, Ingeniería Química y el grupo de Ingeniería Hidrológica. El área académica de ingeniería química mantiene una coincidencia con el nombre de la licenciatura y del posgrado, de igual forma para Ingeniería Hidrológica en licenciatura. No obstante, la licenciatura de Ingeniería en Energía y el Posgrado de Energía y Medio Ambiente (Posgrado Divisional CBI y CBS) donde su planta docente es del Área Académica de Ingeniería en Recursos Energéticos, del grupo de Ingeniería Hidrológica y varias Areas Académicas de la División de Ciencias Biológicas y de la Salud, no com-

parte el mismo nombre. Más allá de las coincidencias o no, estas áreas académicas se han consolidado a lo largo del tiempo, en la planta académica para docencia, investigación, formación de recursos humanos, difusión y preservación de la cultura. En este aniversario, la UAM atraviesa por un cambio generacional, donde grandes académicas y académicos han llegado al final de su ciclo en la universidad, siendo el marco de inicio de IPH para los próximos 50 años de fundación de la UAM.

En este número especial se sometieron trece artículos de divulgación de dos áreas académicas y un grupo de investigación, de los cuales diez fueron considerados para su publicación. Estos artículos constituyen una muestra representativa del quehacer científico, tecnológico y formación de recursos de los profesores-investigadores de nuestro Departamento.

Pérez-Valseca (2024) profesora invitada, presenta una posible ruta hacia la transición energética con reactores nucleares de diseños existentes y posteriormente las tecnologías de reactores modulares de Generación IV. Galindo-Luna et al. (2024)



profesora invitada, presenta un trabajo experimental con aplicaciones de la energía solar; realiza una comparación de la eficiencia térmica entre agua y una mezcla agua-etilenglicol como fluido de trabajo en un concentrador cilindro parabólico, encontrando que la mezcla presenta mejor eficiencia. Rojas-Serna (2024) presenta un trabajo sobre el huracán Otis, el más potente que ha tocado tierras mexicanas; la autora menciona que es muy difícil simular los ciclones bajo el impacto del cambio climático, concluyendo que, con el incremento de la temperatura de los océanos, la violencia de los ciclones aumentará. El trabajo de Morales Pérez y Castillo Araiza (2024), hacen una conjunción interesante, sobre la Ingeniería Química en la UAM-I y su papel en el desarrollo sostenible y la economía circular. Carrera Peralta et al. (2024) introducen el acondicionamiento de luz a través de ciencias de materiales luminiscentes, trascendiendo en el ahorro de energía y la consecuente disminución de la emisión de gases que provocan el calentamiento global. Por otro lado, Rojas García y Ruiz Martínez (2024) presentan un trabajo sobre fotocatalisis solar para aplicación al tratamiento de aguas contaminadas con residuos orgánicos. Marín Trujillo et al. (2024) presenta la reseña del proceso

de conversión de desechos agrícolas y municipales en la generación de energía útil mediante termovalorización en reactores químicos de carbonización y gasificación.

Cruz López (2024) investigador posdoctoral, presenta aplicaciones del cálculo fraccional en el campo de la ingeniería nuclear, para mejorar los modelos clásicos que permiten una descripción más realista de los procesos energéticos que tienen lugar en un reactor nuclear. Gómez Reyes et al. (2024) tocan un tema de gran contenido social hablando de la gestión y manejo del agua en grandes ciudades, y de los proyectos del Grupo de Ingeniería Hidrológica estrechamente relacionados con el tema. Finalmente, Barrera Calva et al. (2024), presentan un análisis donde muestran las reservas probadas y probables de energía convencional, así como sus tiempos probables de duración y se contrasta la magnitud de este recurso energético con el que se obtendría si el hombre usara masivamente las fuentes de energía solar.

Rodolfo Vázquez Rodríguez
Jefe del Departamento de Ingeniería de
Procesos e Hidráulica
***Gilberto Espinosa Paredes*
Editor Invitado

* Los aspectos históricos relevantes de IPH presentados en este prefacio fueron descritos por Ing. Uriel Aréchiga Viramontes (2009, año del 35 aniversario de la UAM).

** Área Académica Ingeniería en Recursos Energéticos

Información para autores

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, Revista dirigida a profesores y a estudiantes de estas disciplinas.

Está registrada en el índice de revistas de divulgación de Conacyt, así como en Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

Para publicar, los trabajos deberán ser originales y accesibles a un público amplio con formación media superior o universitaria pero no especializada; los temas deberán presentarse en forma clara. Cada colaboración debe incluir figuras, diagramas, ilustraciones, fotografías, etc. (otorgando el crédito correspondiente en caso de no ser original), que hagan más accesible la presentación.

Las secciones que la constituyen son:

- 1. Divulgación.** Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).
 - 2. Educación científica.** Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).
 - 3. Artículos especializados.** Reportes breves de investigación, relacionados con una problemática concreta (15 cuartillas).
 - 4. Crónicas.** Historia y desarrollo de conceptos científicos, así como teorías alternativas (15 cuartillas).
 - 5. Divertimentos.** Juegos y acertijos intelectuales (5 cuartillas).
 - 6. Noticias breves.** Información de actualidad en el mundo de la ciencia (4 cuartillas).
 - 7. Los laureles de olivo.** Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas).
- En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

Normas

Las colaboraciones a las secciones 1 a 4 deberán ajustarse a las siguientes normas:

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español en inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA). . .
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla posible.

5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto la publicación del placebo se asevera que “el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma” (Núñez, 1982, p.126).

6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhague (Heisenberg, 1958), que insiste en. . .

7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).

8. Cada referencia a un artículo debe justarse al siguiente formato: Szabadvary, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, J. Chem. Educ, 41 [2], pp.105 -107, 1964.

9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958.

10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).

11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

Envío y características del artículo

El envío del artículo deberá ser en archivo electrónico, en Word, tipo de letra Times New Roman, tamaño 12 con interlineado sencillo y uso de editor de ecuaciones.

En el caso de ilustraciones por computadora (BMP, JPG, TIFF, etc.) envíelos en archivos por separado. El material es recibido en:

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

Arbitraje

El Comité utiliza un sistema de arbitraje anónimo que requiere un mes. Se entiende que los autores no han enviado su artículo a otra revista y que dispondrán de un plazo máximo de un mes para incorporar las observaciones de los árbitros.

La decisión final de publicar un artículo es responsabilidad exclusiva del Comité Editorial.

Reactores nucleares modulares de Generación IV: una ruta hacia la transición energética

Alejandría Denisse Pérez Valseca
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos,
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa



Abstract

Currently, 80% of the energy in the world is generated from using systems based on fossil fuels, producing large amounts of emissions into the atmosphere, and contributing unfavorably to the Climate Change. Starting in 2015, with the Paris Agreement, several countries committed to undertaking strategies to work towards a sustainable future with low carbon emissions. A strategy to meet this objective is the Energy Transition, where it is proposed to migrate from conventional energy generation sources to alternative sources. In this sense, nuclear energy aims to be a great alternative in the Energy Transition, since it does not produce polluting emissions during its operation, and new technological designs, such as Small Modular Reactors and Generation IV reactors, allow a progressive and accessible change from the energy matrix.

Keywords: Energy transition, Small Modular Reactors, Nuclear Energy, Clean energy.

Resumen

Actualmente, el 80% de la energía del mundo se genera a partir del uso de sistemas basados en combustibles fósiles, produciendo grandes cantidades de emisiones a la atmósfera y contribuyendo desfavorablemente al Cambio Climático. A partir de 2015, con el Acuerdo de París, diversos países decidieron comprometerse a adoptar estrategias para trabajar por un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. Una estrategia para cumplir este objetivo es la Transición Energética, donde se propone migrar de fuentes convencionales de generación de energía a fuentes alternativas. En este sentido, la energía nuclear aspira a ser una gran alternativa dentro de la Transición Energética, ya que

no produce emisiones contaminantes durante su operación, y los nuevos diseños tecnológicos, como los Pequeños Reactores Modulares y los reactores de Generación IV, permiten un cambio progresivo y accesible desde la matriz energética.

Palabras clave: Transición energética, Reactores Modulares Pequeños, Energía Nuclear, Energía limpia

¿Te imaginas un día sin electricidad?

Pensar en nuestro actual ritmo de vida sin electricidad no es sencillo, la mayoría de las actividades que realizamos requieren de esta fuente de energía, y si se considera que el consumo de energía va de la mano con el crecimiento poblacional se puede deducir que, la cantidad de energía requerida para satisfacer la demanda energética va en aumento.

La energía ha estado presente en la humanidad desde los inicios de la historia, el descubrimiento del fuego fue un importante cambio, ya que les permitió a los seres humanos calentarse, cocinar alimentos y poder iluminarse en la oscuridad, dando un gran salto en la evolución social. Esto continuó durante muchos siglos, incrementando las aplicaciones del fuego, además de usar la energía mecánica en los molinos o en los cultivos. Pero no fue, sino hasta 1769, que se dio otro cambio importante en el uso de la energía, cuando James Watt inventó la máquina de vapor.

Durante 1780 a 1850, periodo en que duró de la Revolución Industrial, se dieron muchos avances en la ciencia y la tecnología, las aplicaciones de la máquina de vapor se extendieron por el mundo, incrementando los sistemas productivos y de transporte.

No obstante, no se tenían contempladas las consecuencias de la quema de combustibles utilizados para generar energía y producir el vapor.

Otro invento que revolucionó el uso de la energía fue la bombilla, cuya invención se le atribuye a Thomas Alva Edison, quien, en octubre de 1879 mostró la primera bombilla incandescente. Las bombillas utilizan electricidad para funcionar, por lo que Edison estuvo muy involucrado en la invención de los sistemas de generación eléctrica. En 1881, en la ciudad de Manhattan, Alva Edison y su compañía “*Illuminating Company*” presentaron la primera central termoeléctrica de los Estados Unidos de América, inicialmente tenía un generador eléctrico de corriente continua y utilizaba carbón como combustible, proporcionando electricidad para encender 400 lámparas incandescentes.

Después de esta invención, el desarrollo de las centrales termoeléctricas fue en crecimiento, utilizando combustibles fósiles en su operación. Durante ese tiempo, se desconocían las consecuencias que la quema de carbón y petróleo generarían. Durante el 2022, en el mundo se suministraron alrededor de 500 millones de TJ de electricidad usando fuentes no renovables (petróleo, carbón y gas natural), lo cual es el 80% del total suministrado (620 millones de TJ), el resto fue generado a partir de fuentes alternas, como solar, hidroenergía, eólica, geoenergía, biocombustibles y nuclear (Figura 1).

Como se mencionó, el aumento en el suministro de energía esta relacionado directamente con el crecimiento poblacional, en 1998 la población mundial era de 5.8 miles de millones de personas demandando una cantidad de energía alrededor de 400 millones de TJ, y a mediados de noviembre

de 2022, la Organización de las Naciones Unidas reportó que la población alcanzó 8 miles de millones de personas, las cuales demandaron 620 millones de TJ.

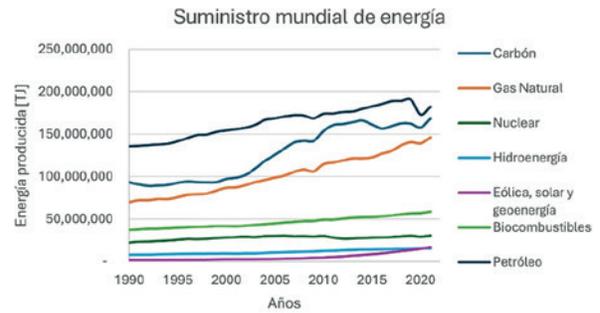


Figura 1. Suministro mundial total de energía por fuente de generación (IEA, 2022).

Así mismo, las emisiones de CO₂, están relacionadas con la demanda de energía y el crecimiento poblacional, en la Figura 2, se presenta el comportamiento de la cantidad total de CO₂ emitido a la atmósfera a nivel mundial, la cual ha ido en aumento. Para 2022, la cantidad total de emisiones fue de 34 mil megatoneladas y se espera que siga creciendo a la misma medida que la población y la demanda energética crecen. De acuerdo con IRENA (2021), en 2050 la electricidad será la principal forma de consumo de energía, pasando de un 21% del consumo total de energía final en 2018 a más del 50% en 2050.

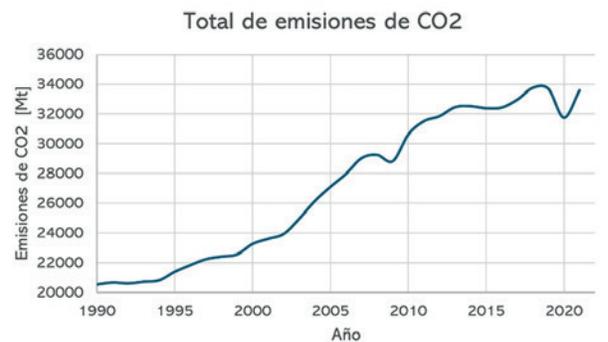


Figura 2. Emisiones de CO₂ generadas a nivel mundial (IEA, 2022).

Pensando en esto, ha sido necesario implementar medidas para reducir la generación de emisiones a la atmósfera, dando lugar al desarrollo de fuentes alternas de generación eléctrica (nuclear, solar, hidroenergía, eólica, biomasa, geotermia, hidrógeno, etc.), las cuales llevan décadas de investigación y desarrollo. Como se observa en la Figura 1, las fuentes alternas han ido en aumento en la generación de electricidad, y en la última década, a partir de la preocupación por disminuir el cambio climático, se ha establecido una estrategia para incrementar su uso, esta estrategia es la Transición Energética.

¿Qué es la Transición Energética?

Es un cambio progresivo en la forma en que se produce la electricidad, es decir, es realizar un cambio en la matriz energética actual. Este cambio implica migrar de las fuentes convencionales que emiten gran cantidad de contaminantes durante su uso hacia las energías alternas o limpias, es decir, que no emiten contaminantes.

El proceso de transición energética se enfoca en establecer la mejor ruta para el cambio en la matriz de energía, considerando los principios de sustentabilidad. Es decir, aspectos ambientales, sociales, económicos y políticos. En el mundo, cada vez son más los países que se suman y se comprometen con estrategias de carbono neto cero, lo que indica un cambio importante en el proceso de transición energética y cambio climático.

La energía nucleoelectrónica, eólica, hidroeléctrica, solar, geotermia, bioenergía, oceánica, hidrógeno y la generada en centrales de cogeneración son consideradas energías limpias y deben ser consideradas en la transición energética.

Transición energética en México

En nuestro país, la Ley de Transición Energética se publicó el 24 de diciembre de 2015, en la que se establece la regulación para el aprovechamiento de la energía de una manera sustentable. También establece las obligaciones de la Industria Eléctrica en materia de Energías Limpias, así como de reducción de emisiones contaminantes. En esta Ley se estableció una meta de usar un mínimo de 35% de Energías Limpias en la generación de energía eléctrica para el 2024, incluyendo dos metas intermedias: 25% para el 2018 y el 30% para el 2021.

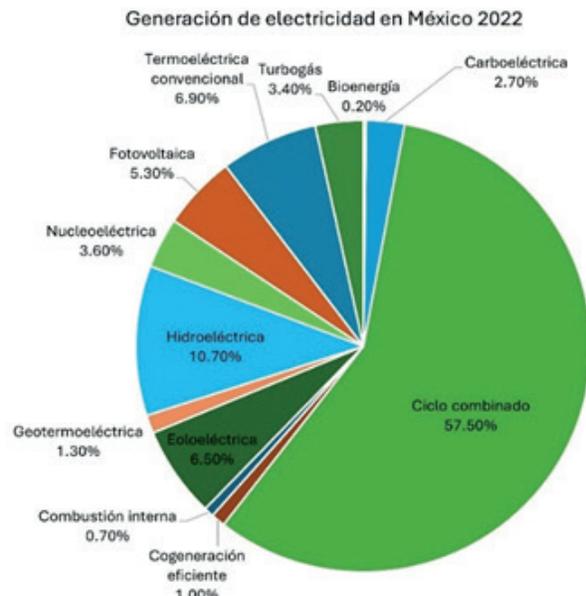


Figura 3. Generación eléctrica por fuente en México (IEA, 2022).

Además, México firmó el Acuerdo de París, comprometiéndose a llevar a cabo acciones para mantener el aumento de temperatura global por debajo de los 2°C grados centígrados, con un modelo de desarrollo sostenible, así como de bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Para el 2022, en México, las tecnologías de generación que hacen uso de combus-

tibles fósiles produjeron el 72.4% del total de electricidad (Figura 3). La participación de las energías limpias es del 37.6%, en donde se incluyen hidroeléctrica, eololéctrica, geotérmica, nucleoléctrica, fotovoltaica y bioenergía.

De acuerdo con la actual matriz energética, la mayor parte de la generación eléctrica en México produce emisiones atmosféricas contaminantes y contribuye desfavorablemente al cambio climático, por lo que es necesario transitar a una nueva matriz energética que cumpla con los objetivos de la sustentabilidad, sea accesible para toda la población y baja en emisiones de carbono.

Como parte de las energías limpias, se ha considerado a la energía nuclear como una ruta en el camino de la transición energética. En México, desde 1990 contamos con una central nuclear, la cual inició sus operaciones con un reactor nuclear y en 1995 se adicionó un segundo reactor.

Energía Nuclear en México	
1 central nuclear	Ubicación: Municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, Veracruz.
Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV)	Genera 3.6 % de la energía total del país
2 reactores nucleares	Capacidad instalada de 1640 MWe
Reactores tipo BWR (Boiling Water Reactor)	Cada reactor genera 820 MWe
	Es administrada por la Comisión Federal de Electricidad

¿Qué es la energía nuclear?

Es la energía que se obtiene de los procesos de fisión de átomos pesados. La tecnología nuclear para generación eléctrica inició su investigación después de la segunda guerra mundial, cuando diversos países trabajaron para poder controlar la reacción de fisión en cadena.

Las reacciones de fisión se llevan a cabo en el núcleo de un reactor nuclear, y es

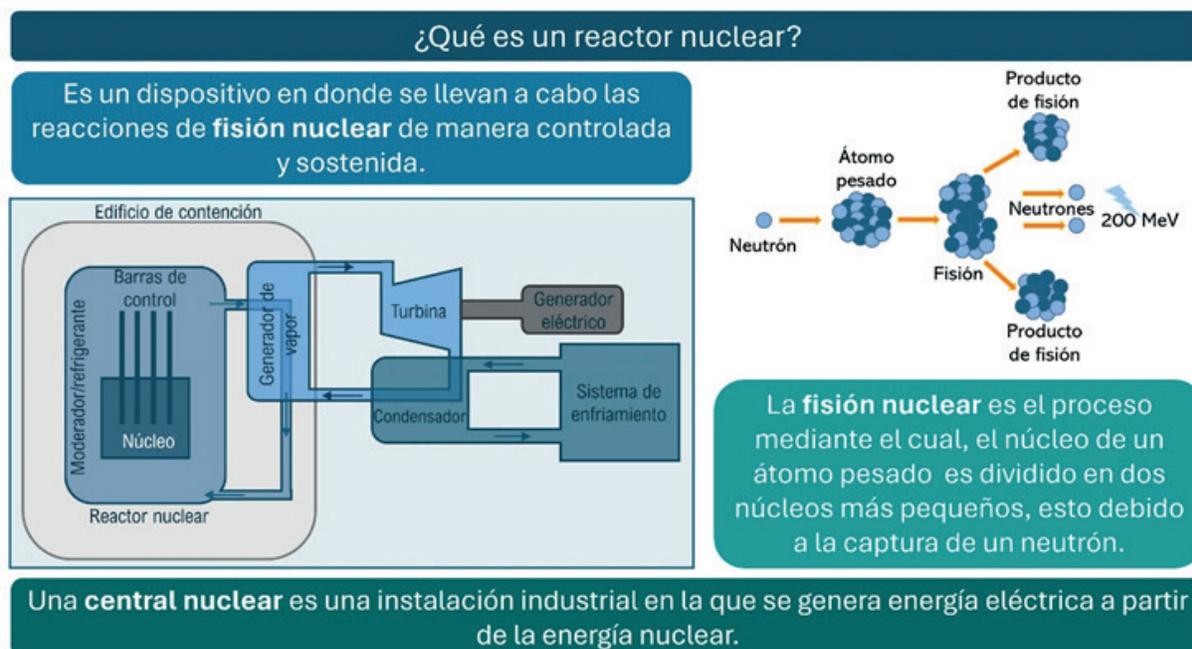
ahí donde se encuentra el combustible nuclear. La energía que se libera de los procesos de fisión se transforma en calor y es removida utilizando un refrigerante. Una vez que se remueve el calor, el refrigerante pasa a través de un generador de vapor, el cual será utilizado para mover una turbina y generar electricidad. Los reactores nucleares cuentan con sistemas para controlar las reacciones de fisión y a su vez la potencia, estos sistemas incluyen las barras de control y en algunos casos, sistemas pasivos.

El desarrollo de los reactores nucleares se ha dividido en cuatro generaciones, en la *Generación I* se establecieron los primeros reactores nucleares de experimentación. *La Generación II* inicia en 1970, cuando se construyen los primeros reactores comerciales para la generación de electricidad, se da un crecimiento comercial y es cuando se construyen diversas centrales nucleares a nivel mundial. El siguiente cambio se dio en la década de 1990, cuando los diseños fueron mejorados y se desarrollaron los reactores avanzados, formando la *Generación III*.

La Generación III+ surge a finales de la década de 2000, con un objetivo de desarrollar reactores con diseños evolutivos, que incluyan mejoras económicas, competitividad y menor tiempo de construcción. Por último, la *Generación IV* (GIV) también se estableció en la década de 2000, algunos de los diseños de esta generación ya se encuentran en operando y otros, se espera que comiencen a operar en el 2030.

¿Cómo se definen los reactores modulares?

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha definido a los reactores



modulares pequeños (SMR, por sus siglas en inglés) como reactores avanzados con capacidad instalada de hasta 300 MW eléctricos.

La mayoría de los diseños de SMR adoptan características de seguridad avanzadas y se pueden implementar como una planta de un solo módulo o de varios módulos.

De acuerdo con el sitio web ARIS (Advanced Reactor Information System) del Organismo Internacional de Energía Atómica, actualmente existen más de 80 diseños de SMR en desarrollo e implementación en el mundo. Y de acuerdo con su aplicación y características se clasifican en: a) pequeños reactores nucleares refrigerados con agua con base terrestre y base marítima, b) pequeños reactores modulares refrigerados con gas de alta temperatura, c) pequeños reactores modulares de espectro de neutrones rápidos enfriados con metal líquido, d) pequeños reactores modulares de sal fundida, e) micro reactores.

Dentro de esta clasificación, los reactores refrigerados con gas de alta temperatura, los reactores de espectro rápido y los de sal fundida, son reactores que pertenecen a la Generación IV. Los diseños de estos reactores ya deben cumplir con los objetivos establecidos por el Foro Internacional de GIV; economía, sustentabilidad, seguridad y no proliferación.

Dentro de los diseños de SMR de GIV se tienen el reactor HTR-PM, reactor de gas a alta temperatura desarrollado en China y conectado a la red en 2022; el reactor BREST-OD-300, diseño de neutrones rápidos enfriado con plomo, desarrollado por Rusia; el reactor sueco SEALER, también enfriado con plomo y espectro de neutrones rápidos. En el caso de los reactores de sales fundida, un ejemplo es el reactor Integral MSR, el cual es un diseño canadiense. Los micro reactores, cuya potencia máxima es de 10MWe, están siendo desarrollados en múltiples países y contemplan tecnologías de reactores avanzados.

Reactores modulares en la transición energética

La finalidad de la transición energética es cambiar la matriz actual a una que esté basada en fuentes de generación con nulas emisiones a la atmósfera. En ese sentido, es indispensable incluir a la energía nuclear en las estrategias para reducir los contaminantes en el aire. La energía nuclear no libera emisiones contaminantes en sus operaciones de rutina, a diferencia de las fuentes a base de quemar carbón, petróleo o gas. En un estudio de la Agencia Internacional de Energía en 2019, se analizaron datos sobre la producción histórica de energía, se determinó que, durante los últimos 50 años se habían evitado el equivalente a 60 mil millones de toneladas de dióxido de carbono gracias al uso de energía nuclear.

Los reactores pequeños modulares son una alternativa tecnológica que permitirá llevar a cabo la transición energética de manera flexible, descarbonizando diversos sectores productivos y generando electricidad libre de emisiones a la atmósfera. Los diseños de SMR de Generación IV se encuentran, en su mayoría, en desarrollo e investigación experimental, algunos diseños como el reactor de sales fundidas Integral MSR, desarrollado por la compañía canadiense Terrestrial, se encuentra en etapa de licenciamiento, así mismo, los reactores rápidos enfriados con plomo se encuentran en etapa experimental y licenciamiento en Rusia, China y Suecia. Los reactores enfriados con sodio han sido desarrollados principalmente por China y Francia. La estandarización de los SMR es de gran importancia, ya que facilitaría su implementación en las diversas aplicaciones, en este ámbito, el OIEA ha establecido grupos de trabajo enfocados en este tema.

Es importante resaltar que los SMR enfriados con agua, basados en tierra y marítimos,

Reactores de Generación IV

Ultima generación de reactores de fisión, en donde se incluyen seis diseños.

<https://www.gen-4.org/>

Reactor rápido enfriado con gas

Reactor rápido enfriado con plomo

Reactor enfriado con agua supercrítica

Reactor rápido enfriado con sodio

Reactor de sales fundidas

Reactor de muy alta temperatura

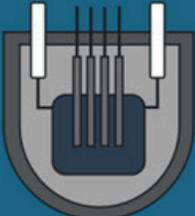
Los diseños de la Generación IV deberán cumplir con los siguientes objetivos:

- ✳ Utilizar el combustible de manera más eficiente.
- ✳ Reducir la producción de desechos.
- ✳ Ser económicamente competitivos.
- ✳ Cumplir estándares estrictos de seguridad y resistencia a la proliferación.

Reactores Modulares Pequeños

Diseños de Generación III/III+ y Generación IV.

Son reactores avanzados que producen máximo 300MWe.



Por su tamaño, pueden ser utilizados en barcos, industrias o comunidades alejadas de la red eléctrica.

Pueden ser construidos en fábricas, y, además, los SMR de baja potencia y microreactores, pueden ser transportados en tráiler o tren.



<https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors/>

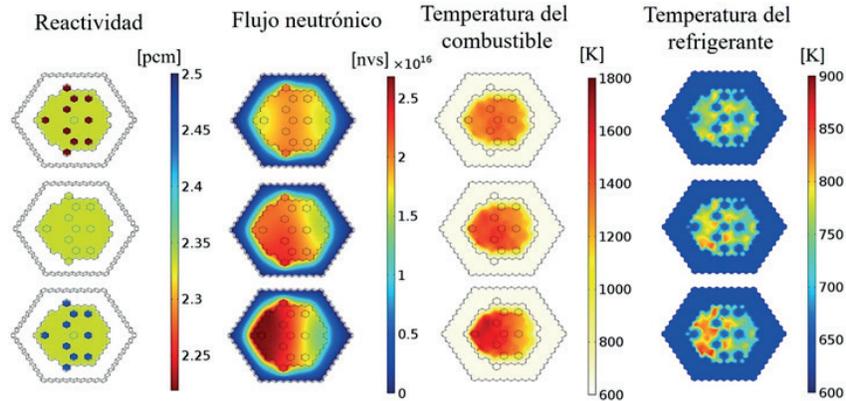


Figura 4. Perfil de flujo neutrónico, temperatura del combustible y temperatura del refrigerante para un SMR de espectro rápido enfriado con sodio.

ya se encuentran operando y algunos otros en etapa final de licenciamiento. Un claro ejemplo es el reactor NuScale, cuyo diseño y licenciamiento fue aprobado en 2020 en EUA.

¿Existen reactores modulares en México?

En nuestro país aún no existen reactores modulares. El desarrollo e investigación de los SMR sigue en proceso a nivel mundial, y se espera que en la siguiente década los primeros reactores SMR de Generación IV sean fabricados de manera modular, facilitando la incorporación a la red eléctrica nacional como parte de la transición energética.

En México, en diversas instituciones educativas del país, como la UAM, UNAM, el IPN y la UAZ, se ha trabajado en el desarrollo y estudio de las tecnologías nucleares, formando capital humano para la central nuclear de Laguna Verde, así como para trabajar en la industria y centros de investigación a nivel mundial.

En la Unidad Iztapalapa de la UAM, se encuentra el laboratorio de Análisis y Simulación de Reactores Nucleares, el cual es parte del Área Académica de Ingeniería en Recursos Energéticos. En este laboratorio

se ha desarrollado infraestructura computacional para el análisis y modelado de los reactores nucleares de Generación III, III+ y IV, y recientemente se ha iniciado el análisis de los reactores SMR.

El análisis de los reactores nucleares es de carácter multifísico y multiescala, ya que los fenómenos se presentan en diferentes partes del reactor y se encuentran altamente acoplados. Por ejemplo, un cambio en las condiciones del refrigerante impactará en los fenómenos neutrónicos, generando a su vez, un cambio en las el sistema de enfriamiento y la potencia del reactor, así como en el comportamiento de los sistemas estructurales y de control. Los estudios realizados para modelado y simulación de reactores nucleares incluyen el análisis de los fenómenos neutrónicos, los procesos de transferencia de calor en el combustible y el refrigerante, los procesos termo mecánicos en la pastilla de combustible y en los materiales estructurales.

En la Figura 4, se presentan los perfiles de flujo neutrónico y temperaturas del combustible y del refrigerante para un SMR enfriado con sodio. La reactividad, el cual es un parámetro que indica si está aumentando la cantidad de neutrones y por consecuencia

las fisiones en el reactor, ha sido modificada, esto con la finalidad de analizar el comportamiento del reactor en diversas condiciones, simulando eventos transitorios.

Al insertar reactividad positiva, el flujo neutrónico (cantidad de neutrones generados) aumenta, y con ésta también la potencia del reactor y la cantidad de energía en el núcleo, generando un aumento en la temperatura del combustible y del refrigerante. Conocer el valor de la temperatura en eventos transitorios permite estimar si los límites térmicos son respetados o si se sobrepasan, pudiendo generar un daño estructural y una situación de riesgo.

En el caso en el que se disminuye la reactividad, disminuye la potencia y la temperatura; si la temperatura del combustible disminuye mucho, la del refrigerante también lo hará, y si se considera un refrigerante como los metales líquidos (plomo y sodio) se debe tener cuidado de no sobrepasar la temperatura de solidificación. La complejidad del análisis de reactores nucleares convencionales y modulares se basa en entendimiento y modelado de los fenómenos presentes, así como su interacción. Los análisis y simulaciones se realizan en estados de operación normal del reactor, pero también se simulan eventos transitorios, que podrían derivar a un accidente, a esto se le conoce como análisis de seguridad.

Conclusiones

En México es importante considerar a los reactores nucleares modulares de Generación IV en la transición energética, por sus ventajas en diversas aplicaciones, así como versatilidad en su construcción y transportación.

Es importante destacar que la transición energética es progresiva, cambiando de

acuerdo con las posibilidades de los países y de la tecnología disponible, actualmente se busca aumentar la participación de la energía nuclear con los reactores y diseños existentes y, posteriormente, una vez que la tecnología de los SMR se encuentre aprobada, podrá ser incluida.

La transición energética es responsabilidad de los tomadores de decisiones de cada país, considerando sus recursos y políticas, no obstante, es responsabilidad de la sociedad tener un uso eficiente de la energía, disminuir la demanda y, de esta manera contribuir a la disminución de las emisiones a la atmósfera.

Referencias

IEA (2022). IEA World Energy Balances <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>

IAEA (2024A). ARIS - Advanced Reactors Information System. International Atomic Energy Agency. <https://aris.iaea.org/default.html>

IAEA (2024B). SMR – Small Modular Reactors. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

IRENA (2021). World Energy Transitions Outlook: 1.5°C. Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Sistema de Información Energética (SIE) (2022). Balance Nacional de Energía: Por fuente de energía primaria.

<https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnergía2022.pdf>

Comparación de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico con distintas mezclas

*Yuridiana Rocio Galindo Luna
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos,
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa
Jesús Javier Luna Jaime
Jorge Ramos Sierra
Licenciatura de Ingeniería en Energía,
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa*



Abstract:

The use of solar energy is carried out through solar collectors, which convert solar radiation into electrical energy or thermal energy. The parabolic trough collector is capable of collecting solar rays and redirecting them to a focal line, where the receiving tube is located and inside, a working fluid which increases its thermal level. Water is the most used fluid, however, it has limitations that reduce the thermal efficiency of the system. For this reason, the use of the water-ethylene glycol mixture with 5% ethylene glycol as a working fluid is proposed, with the aim of increasing the thermal efficiency of the concentrator. Both working fluids water and water-ethylene glycol were experimentally evaluated, in similar climatic conditions during the month of April with irradiance of 598.45 W/m² and 603.09 W/m² respectively, according to the results obtained, the H₂O-C₂H₆O₂ mixture managed to increase efficiency by 1.23%. Thermal compared to water.

Keywords: solar energy, parabolic trough collector, working mixture, thermal efficiency.

Resumen

El aprovechamiento de la energía solar se realiza mediante colectores solares, los cuales logran convertir radiación solar en energía eléctrica o en energía térmica. El colector cilindro parabólico es capaz de recolectar los rayos solares y redirigirlos a una línea focal, donde se encuentra el tubo receptor y en su interior, un fluido de trabajo el cual aumenta su nivel térmico. El agua es el fluido más utilizado sin embargo, presenta limitantes que disminuyen la eficiencia térmica del sistema. Por tal motivo se propone el uso de la mez-

cla agua-etilenglicol al 5 % de etilenglicol como fluido de trabajo, con el objetivo de aumentar la eficiencia térmica del concentrador. Se evaluaron experimentalmente ambos fluidos de trabajo agua y agua-etilenglicol, en condiciones climáticas similares durante el mes de abril con irradiancia de 598.45 W/m² y 603.09 W/m² respectivamente, de acuerdo con los resultados obtenidos la mezcla H₂O-C₂H₆O₂ logró incrementar en 1.23 % la eficiencia térmica en comparación con el agua.

Palabras clave: Energía solar, Concentrador Cilindro Parabólico, mezcla de trabajo, eficiencia térmica.

1.- Introducción

La energía solar es la fuente más abundante del planeta y se encuentra disponible en casi todas las zonas geográficas del mundo. Para aprovechar la energía solar existen diversas metodologías y una de las alternativas son los dispositivos denominados colectores solares, los cuales se clasifican en dos tipos: colectores que convierten la energía solar en electricidad y colectores capaces de convertir la energía solar en energía térmica o en su defecto energía térmica que puede almacenarse para su posterior uso. El colector solar térmico absorbe la radiación solar y la convierte en calor que finalmente se transfiere a un fluido de trabajo, ya sea líquido o gaseoso. El fluido de trabajo puede ser agua, aceite térmico o algunos disolventes orgánicos. Los Concentradores Cilindro Parabólicos (CCP) son capaces de alcanzar entre 350 °C y 400 °C, la eficiencia de este colector se encuentra basado en el índice de concentración, que se define como la relación entre el área efectiva de la apertura y el área de superficie del absorbente (Nawsud, 2022).



Figura 1. Concentrador cilindro parabólico, elaboración propia.

El tubo absorbedor consta de dos componentes: la cubierta envolvente y el tubo receptor; la cubierta de vidrio minimiza las pérdidas convectivas al ambiente mientras que el tubo metálico generalmente revestido con una película negra o alguna película selectiva, captura la energía solar. Al interior fluye el fluido de trabajo, generalmente agua, sin embargo, este fluido tiene ciertas limitantes que afectan de forma negativa a la eficiencia térmica del sistema. La mezcla binaria $H_2O-C_2H_6O_2$ se utiliza ampliamente en la transferencia de calor en las industrias, debido al aumento de la conductividad térmica cuando se combina con agua (Huang, 2022, Kang, 2022).

El análisis propone combinar el fluido base agua con etilenglicol al 5 % (v/v) con el propósito de aumentar la eficiencia térmica cuando ambos fluidos son comparados bajo condiciones climáticas similares. Las propiedades de la mezcla $H_2O-C_2H_6O_2$ fueron determinadas con ecuaciones exis-

tentes en literatura. Se realizó la evaluación experimental durante el mes de abril y los resultados son comparados.

2.- Metodología

2.1 Descripción del Sistema

El Colector Cilindro Parabólico (CCP), emplea una superficie reflectante con forma parabólica, la lámina del material toma la forma parabólica para formar un canal reflectante. La irradiancia es recolectada en la superficie y los rayos solares son redirigidos hacia la línea focal, en esta línea se encuentra ubicado el tubo receptor, dentro de él fluye un fluido de trabajo. El fluido de trabajo recolecta energía, incrementando así su temperatura (Jebasingh, 2022). En la Figura 1, se aprecia el CCP instalado en la azotea del edificio AT, orientado Este-Oeste dentro de las instalaciones de UAM-Iztapalapa. El sistema de seguimiento (Norte-Sur) utilizado es comercial y considera un brazo mecánico, un controlador y una celda fotosensible, ubicado en un extremo del CCP.

H ₂ O-C ₂ H ₆ O ₂ , %	A	B	C
10	0.97236	1.8001x10 ⁻⁴	5.7049x10 ⁻⁷
20	0.93576	3.9963x10 ⁻⁴	0
30	0.89889	5.1554x10 ⁻⁴	0
40	0.85858	6.2639x10 ⁻⁴	0
50	0.81485	7.3219x10 ⁻⁴	0
60	0.76768	8.3293x10 ⁻⁴	0
70	0.71707	9.2863x10 ⁻⁴	0
80	0.66304	1.0193x10 ⁻³	0
90	0.60557	1.1049x10 ⁻³	0
100	0.54467	1.1854x10 ⁻³	0

Tabla 1. Constantes para determinar el Cp de la mezcla H₂O-C₂H₆O₂.

2.2 Fluido de trabajo

Para este análisis se utilizó una mezcla binaria de agua-etilenglicol en una concentración del 5 % volumen/volumen, las propiedades térmicas se determinaron de acuerdo a las siguientes formulas:

- Calor específico (Cp):

$$Cp_{mezcla} = A + BT + CT^2 \quad (1)$$

Los valores de las contantes A, B y C de acuerdo al catálogo de proveedor (MEGlo-bal, 2013), se presentan en la Tabla 1, la cual está en función del porcentaje de la cantidad de etilenglicol disuelto en agua y considerando la temperatura en grados Celsius (°C), en la ecuación 1.

- Conductividad térmica (k):

$$k_{mezcla} = \frac{(1-x)k_{agua} + xk_{etilenglicol} - K(k_{agua} - k_{etilenglicol})}{(1-x)x} \quad (2)$$

La constante K es la constante de Filippov (Bolme, 1985) es determinada como sigue:

$$K = 0.6635 - 0.6698x - 8.8510^{-4} t \quad (3)$$

	j=1	j=2	j=3
i=1	1.0004	1.7659x10 ⁻¹	-4.9214x10 ⁻²
i=2	1.2379x10 ⁻⁴	-9.9189x10 ⁻⁴	4.1024x10 ⁻⁴
i=3	2.9837x10 ⁻⁸	2.4614x10 ⁻⁸	9.5278x10 ⁻⁸

Tabla 2. Coeficientes Aij para determinar la densidad de la mezcla H₂O-C₂H₆O₂.

- Densidad (ρ):

$$\rho_{mezcla} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{i,j} x^{(j-1)} t^{(j-1)} \quad (4)$$

Las constantes i y j son mostradas en la Tabla 2, de acuerdo con un análisis publicado en 1985, sobre propiedades de la mezcla agua-etilenglicol (Bolme, 1985), las cuales dependen del orden en que son utilizadas en la ecuación 4.

2.3 Modelo matemático

- Eficiencia térmica.

La eficiencia térmica ($\eta_{térmica}$) del CCP representa la relación entre el calor útil (Q_u) y la irradiancia solar disponible (Q_s) y se expresa de la siguiente manera:

$$\eta_{térmica} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (5)$$

La producción de energía útil (Q_u) se puede calcular utilizando el balance de energía en el volumen del fluido con la siguiente ecuación:

$$Q_u = mC_p (T_{salida} - T_{entrada}) \quad (6)$$

La tasa de transferencia de calor disponible (Q_s) en la apertura del colector es el producto de la irradiación solar directa (G_b) y el área de apertura total (A_a):

$$Q_s = G_b \cdot A_a \quad (7)$$

Para este análisis se consideró un nivel de irradiación solar local de Iztapalapa (-99.062 longitud y 19.355 latitud). El área de apertura permanece constante con un valor de 2.56 m².

El calor útil puede expresarse de la siguiente manera (Bellos y Tzivanidis, 2019):

$$Q_u = A_{ri} \cdot U_r \cdot (T_r - T_{en}) \quad (8)$$

Donde A_{ri} es el área interior del tubo, T_r es la temperatura del tubo receptor y T_{en} es la temperatura de entrada y el coeficiente global de transferencia de calor (U_r) es determinado como:

$$U_r = \left[\frac{1}{h} + \frac{A_r}{2 \cdot (\rho \cdot C_p) \cdot V} \right]^{-1} \quad (9)$$

Donde A_r es el área del receptor y V es el flujo volumétrico.

Resultados

La comparación experimental fue realizada durante los meses de marzo a mayo del año en curso, la comparativa de la mezcla H₂O- C₂H₆O₂ al 5 % con respecto al H₂O es descrita a continuación. La evaluación fue realizada bajo las siguientes condiciones: flujo másico de 0.1 kg/s, irradiación directa promedio para la mezcla de 603.09 W/m² y 598.45 W/m² para la evaluación con agua, mientras la temperatura ambiente promedio fue registrada en 29.36 °C para el agua y 30.02 °C para la mezcla.

En la Figura 2 se presentan los datos del 19 de abril en un periodo de 9:30 am a 1:30 pm, en esta se observa el comportamiento de la eficiencia promedio cada 10 minutos. La eficiencia promedio durante el periodo de prueba fue de 16.44 %, y la máxima del 26%.

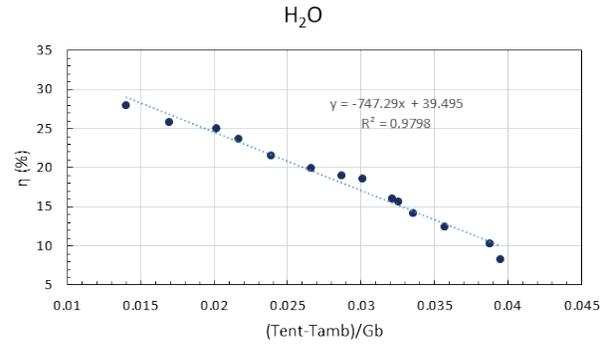


Figura 2. Evaluación experimental del 19 de abril, utilizando agua como fluido de trabajo.

Durante la operación fue tomada la temperatura (°F) del tubo receptor, en la Figura 3, se observa el tubo metálico y la envoltura de vidrio con una temperatura de 130.5 °F (54.7 °C), durante la evaluación.

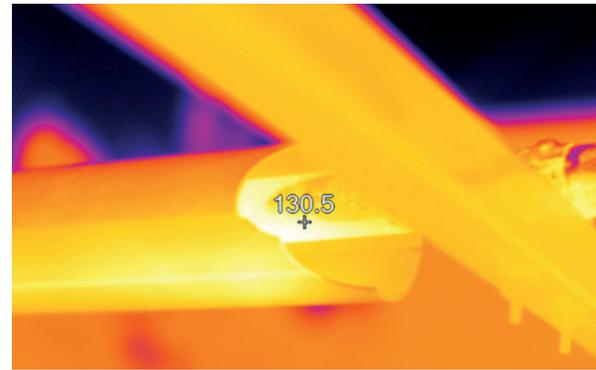


Figura 3. Captura de la temperatura en °F con la cámara termográfica, el 19 de abril de 2024.

La mezcla H₂O- C₂H₆O₂ al 5 % fue evaluada durante el mes de abril, en la Figura 4 se observa el comportamiento de la eficiencia promedio cada 10 minutos corres-

pondiente al 26 de abril, en un periodo de 9:30 am a 2:00 pm. La eficiencia máxima fue calculada como 27.23 %, con un valor promedio de 18.19 %.

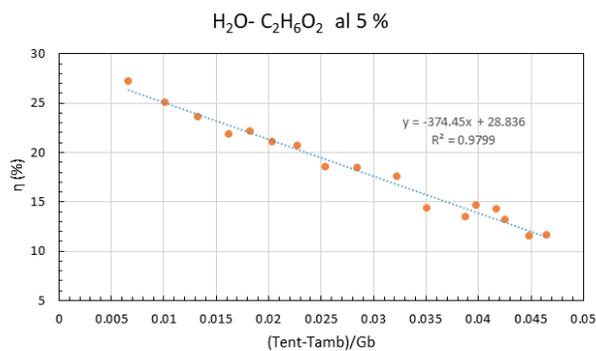


Figura 4. Evaluación experimental del 26 de abril, utilizando agua-etilenglicol al 5% como fluido de trabajo.

La Figura 5 muestra el registro de temperatura ($^{\circ}\text{F}$) en el tubo receptor durante la operación del 26 de abril, la temperatura determinada fue de 132.0°F (55.6°C).

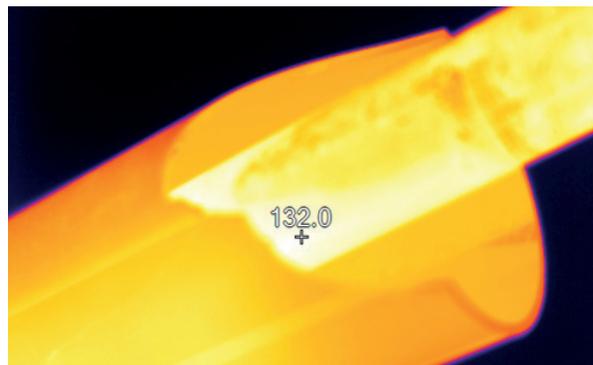


Figura 5. Captura de la temperatura en $^{\circ}\text{F}$ con la cámara termográfica, el 26 de abril de 2024.

La Figura 6, muestra la comparativa de la eficiencia térmica entre ambas pruebas, en esta se observa un incremento del 1.23 % al utilizar la mezcla binaria con respecto al agua. La temperatura de salida promedio es de 40.90°C para H_2O y 43.48°C para la mezcla binaria. Sin embargo, se

observa que el comportamiento de la eficiencia térmica al usar el fluido base no disminuye precipitadamente en los valores más altos del eje x, con respecto a la de la mezcla binaria. Lo anterior se le atribuye a un valor más alto de irradiancia (603.09 W/m^2) con respecto al valor registrado en la prueba con la mezcla binaria (598.45 W/m^2) y a la presencia de nubes aunado a la contaminación del aire durante la prueba con agua-etilenglicol.

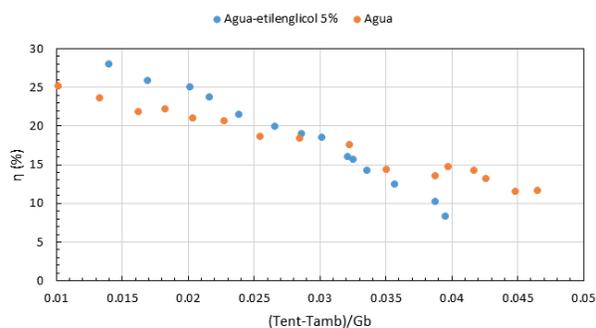


Figura 6. Comparativa de la eficiencia térmica.

Conclusiones

En el presente trabajo se muestra el análisis comparativo experimental en un concentrador cilindro parabólico que utiliza agua como fluido de trabajo con respecto a una mezcla binaria agua-etilenglicol al 5%.

- La evaluación fue realizada durante el mes de abril con el objetivo de mantener condiciones similares de irradiancia directa para el agua y la mezcla, 598.45 W/m^2 y 603.09 W/m^2 respectivamente, así como la temperatura ambiente de 29.36°C para el agua y 30.02°C para la mezcla.
- La eficiencia térmica calculada máxima fue de 26.00 % cuando se usó agua y 27.23 % al usar agua-etilenglicol al 5 %, la temperatura promedio en la salida del concentrador fue 40.90°C para el agua y 43.48°C para la mezcla binaria.

Los resultados muestran un aumento en la eficiencia térmica al utilizar H₂O-C₂H₆O₂, lo que hace evidente el camino a seguir en trabajos futuros.

Referencias

Bellos, E., y Tzivanidis, C. (2019). Thermal efficiency enhancement of nanofluid-based parabolic trough collectors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135, 597-608.

Bolme, D., Fischer, S., Obermeier, E., Thermal conductivity, density, viscosity and Pradtl-numbers of ethylene Glycol-water mixtures, *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 89 (7), pp. 805-809, 1985.

Huang, A., Bao, Y., Li, H., Lui, Y., Zheng, X., Qin, G., Thermal conductivity of ethylene glycol and water binary mixtures at evaluated temperature and pressure.

Jebasingh, V.K., Joselin Herbert, G.M., A review of solar parabolic trough collector, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 54 pp. 1085-1091, 2016. *J. Chem. Thermodyn.* 175, pp. 106900, 2022.

Kang, K., Gu, Y., Wang, X., Assessment and development of the viscosity prediction capabilities of entropy scaling method coupled with a modified binary interaction parameter estimation model for refrigeration blends. *J. Mol. Liq.* 358, pp. 119184, 2022.

MEGlobal, Ethylene Glycol product guide, pp. 19, 2013.

Nawsud, Z.A., Altouni, A., Akhijahani, H.S., Kargarsharifabad, H., A comprehensive review on the use of nano-fluids and nano-PCM in parabolic trough solar collectors (PTC), *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 51, pp. 101889, 2022.

El Huracán Otis y el Cambio Climático

Claudia Rojas Serna
Ingeniería Hidrológica
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa



Abstract

Otis, a devastating hurricane that no one seems to have seen coming, which, in 24 hours, went from tropical storm to hurricane. It was only 90 km from the coast when its terrible danger was mentioned in the warning bulletins. How can such a scenario be explained?

Hurricane Otis surprised by its unprecedented intensity, reaching the maximum category. At noon on Tuesday, October 24, 2023, Otis was still only a tropical storm. Strong winds were blowing off the coast of Mexico, with gusts of just over 100 km/h. At first glance, nothing to worry about. But that changed overnight. As it approached the coast, Otis did not weaken, but rather increased in strength. Unexpectedly, it impacted Acapulco with winds of over 265 km/h. The intensity of this hurricane is related to the temperature of the Pacific Ocean, particularly along the coasts of Acapulco, in the State of Guerrero. The reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) are fundamental to analyze this extreme hydrometeorological event and its relationship with climate change.

Keywords: Hurricane Otis, Climate Change, Tropical Cyclones

Resumen

Otis, un huracán devastador que nadie parece haber visto venir, que, en 24 horas, pasó de tormenta tropical a huracán. Otis estaba a sólo 90 km de la costa cuando se mencionó su terrible peligro en los boletines de alerta. ¿Cómo se puede explicar un escenario así?

El huracán Otis sorprendió por su intensidad sin precedentes, alcanzando la máxima categoría. Al mediodía del martes 24

de octubre de 2023, Otis seguía siendo sólo una tormenta tropical. Soplaban fuertes vientos frente a las costas de México, registrándose rachas de algo más de 100 km/h. A primera vista, nada de qué preocuparse. Pero esto cambió de la noche a la mañana. A medida que se acercaba a la costa, Otis no se debilitó, sino que aumentó su fuerza. Inesperadamente, impactó Acapulco con vientos de más de 265 km/h. La intensidad de este huracán está relacionada con la temperatura del océano Pacífico, particularmente, en las costas de Acapulco, en el Estado de Guerrero. Los informes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) son fundamentales para analizar este evento hidrometeorológico extremo y su relación con el cambio climático.

Palabras Claves: Huracán Otis, Cambio Climático, Ciclones Tropicales

1. Motivación

Cada año se forman alrededor de 80 tormentas tropicales o ciclones en aguas tropicales de todo el mundo. Existe un incremento de las referencias a los efectos sobre la salud en las contribuciones de los países para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, incrementándose en segundo lugar, las referencias sobre el riesgo para la salud por lesiones y mortalidad por fenómenos meteorológicos extremos (OMS, 2023). Normalmente una tormenta tropical no se vuelve un huracán de categoría 5 en un periodo menor a un día. En México sólo existe el precedente del huracán Patricia, cuya intensidad aumentó en un periodo aproximado de 24 horas y al que se considera como el ciclón tropical más intenso del que se tiene registro en el hemisferio occidental. Por la mañana del martes del 24 de octubre de 2023, pocos especialistas

en el tema hablaban sobre la tormenta tropical Otis. Por la mañana del miércoles del 25 de octubre de 2023, Otis había crecido tanto que impactó como un huracán de categoría 5 en Acapulco, Guerrero, y en las localidades de la línea costera aledaña, entre ellas, Coyuca de Benítez, Guerrero.

De acuerdo con el Centro Nacional de Huracanes de EUA (*National Hurricane Center NHC*), que asumió la responsabilidad de monitoreo del Pacífico Este desde 1988, Otis es el huracán más potente que ha tocado tierra, produciendo daños catastróficos. Otis causó al menos 52 víctimas mortales y daños totales estimados entre 12,000 y 16,000 millones de dólares, lo que lo convierte en el ciclón tropical más costoso registrado en México y en una de las catástrofes naturales más caras de la historia de México.

Los sucesivos informes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) documentan cada vez más la complejidad de los cambios que podrían producirse en el futuro en el desarrollo y el ciclo de vida de los ciclones tropicales. Sin embargo, es muy difícil simular los ciclones bajo el impacto del cambio climático. Los modelos que simulan este último a escala mundial tienen dificultades para representar con precisión estos fenómenos. Los constantes avances en la investigación sobre la resolución de los modelos, es decir, sobre la escala espacial más pequeña representada en ellos, permitirán afinar las simulaciones en un futuro próximo.

2. ¿Qué es un huracán?

Un huracán es una perturbación atmosférica violenta que se forma en las regiones tropicales. Es un fenómeno de torbellino o vórtice y la presión en su centro es muy baja. En el hemisferio sur, los ciclones gi-

ran en el sentido de las agujas del reloj, y en el hemisferio norte giran en sentido contrario. Un huracán tiene cierta simetría y una extensión de entre 500 y 1000 km.

El ojo del huracán es su centro y es una zona de calma, seca y poco ventilada, su diámetro suele oscilar entre los 30 y 60 km, e incluso, en algunas ocasiones puede alcanzar los 150 km.

La pared del huracán es un muro formado por nubes *cumulonimbos* que rodea su ojo. El *cumulonimbo* es una verdadera fábrica termodinámica que se alimenta de aire caliente y húmedo para proporcionar la energía necesaria para su movimiento ascendente, su cima choca con la estratosfera y se extiende en forma de “penacho”, puede alcanzar una altitud de 12 a 15 km y un ancho de entre 5 y 15 km. En la Figura 1 se muestra el corte vertical de un huracán del hemisferio norte, el cual produce los efectos más devastadores: los vientos soplando hasta 300 km/h y lluvias torrenciales.

Un huracán también recibe el nombre de ciclón o tifón según la cuenca ciclónica en la que se produce. Una cuenca ciclónica es una gran depresión geológica por debajo del nivel del mar en donde se originan los ciclones. El Océano Índico y el Pacífico Sur son cuencas ciclónicas en donde se usa el término ciclón o ciclón tropical; en el Atlántico Norte y el Pacífico Nororiental lo llaman huracán; y, en el Pacífico Noroccidental se utiliza el término tifón.

Los huracanes también provocan fenómenos marítimos muy peligrosos: un *largo oleaje* generado por el viento que se desplaza más rápido que el huracán, a veces se puede observar hasta 1000 km por delante del ciclón; una *sobreelevación*

anormal del nivel del mar conocida como *marea de tormenta*, que también recibe el nombre de *marejada* y es el fenómeno más mortífero asociado a los huracanes.

El huracán se desplaza a una velocidad media de entre 20 y 30 km/h, sin embargo, los vientos alrededor de su ojo pueden superar los 300 km/h, dependiendo de su categoría.

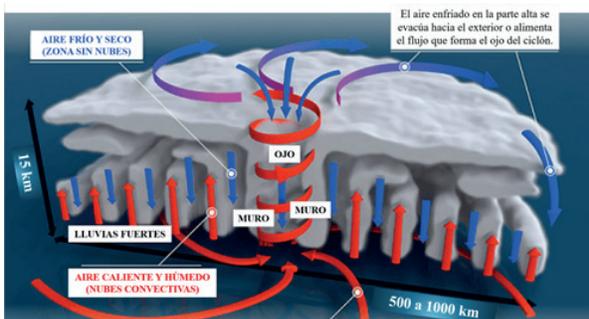


Figura 1. Corte vertical de un huracán del hemisferio norte (traducida al idioma español a partir de la imagen de Météo-France <https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/le-vent/les-cyclones>).

3. Categoría y alertamiento de un huracán

La categoría de un huracán se define en función de la intensidad promedio del viento medida a 10 m sobre el suelo en 1 minuto. Si el viento es inferior o igual a 63 km/h es una *depresión tropical*; superior a 63 y hasta 119 km/h es una *tormenta tropical* y el centro meteorológico responsable de la zona concerniente le atribuye un nombre; más de 119 km/h es un *huracán*.

En la Tabla 1. La escala *Saffir-Simpson* clasifica en 5 categorías a los huracanes de acuerdo a la velocidad de los vientos. Esta escala fue desarrollada por el Centro Nacional de Huracanes de EUA y se usa en las cuencas oceánicas del Atlántico Norte, el Pacífico Central y el Pacífico Oriental.

Categoría	Velocidad (km/h)
1	Entre 119 y 153
2	Entre 154 y 177
3	Entre 178 y 208
4	Entre 209 y 251
5	Mayor que 251

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) designó al Centro Nacional de Huracanes (*National Hurricane Center NHC*) de USA como Centro Meteorológico Especializado Regional para el Atlántico Norte y el Este del Pacífico, por lo que el *NCH* en Miami, Florida, es el encargado de emitir alertas a México sobre posibles tormentas tropicales o huracanes.

4. Huracán Otis

4.1 Pronóstico

La tormenta Otis comenzó a formarse como depresión tropical por la mañana del domingo 22 de octubre de 2023. Los modelos de pronóstico no estimaban grandes intensidades de los vientos. Esa mañana, el *NHC* comunicó que era posible un aumento ligero de la intensidad en los días siguientes, incluso, por la tarde del mismo domingo, los modelos continuaban sin cambios en sus estimaciones.

Para el pronóstico se utilizan modelos computacionales, además de imágenes de satélite, normas climatológicas que ayudan a estimar la velocidad de los vientos, y también aviones cazahuracanes que atraviesan el ojo de la tormenta para recabar información en tiempo real.

Considerando estas herramientas, se empezó a pronosticar una tormenta Otis más fuerte con relación a lo que se obtenía sólo con los modelos. Sin embargo, el pronóstico continuaba como tormenta tropical.

Por la tarde del lunes 23, los modelos estimaban que la tormenta podría convertirse en huracán de categoría menor, y se observó que, debido a la gran cantidad de humedad en la zona y las temperaturas cálidas del océano, la tormenta se fortalecería gradualmente.

También de las imágenes de satélite se observó que la tormenta se intensificaría rápidamente, sin embargo, los modelos no mostraban esto.

Los modelos de pronóstico estadounidense y europeo no han sido buenos para estimar la rapidez con la que se intensifican las tormentas. Aunque estas herramientas de pronóstico han mejorado, no aportan información suficiente sobre el aumento de intensidad de las tormentas, como en el caso de Otis.

Sólo para enfatizar lo mal que funcionaron los modelos de huracanes y globales para el huracán Otis, en la Figura 2 se muestran los pronósticos de intensidad del 24 de octubre de 2023, donde con la línea negra punteada se muestra la evolución que tuvo Otis y las diferentes líneas

de colores muestran lo pronosticado por diferentes modelos.



Figura 2. Previsiones de intensidad de Otis del 24 de octubre de 2023; en las abscisas se tienen los valores de los vientos en nudos (kt) ($1 \text{ kt} = 1.8 \text{ km/h}$), en las ordenadas se tienen las horas de pronóstico (traducida de Tomer Burn en Twitter).

4.2 Variables meteorológicas y fenómenos marítimos

La intensidad de los vientos de Otis fue de 265 km/h entre las 22:00 h del 24 de octubre y las 00:30 h del 25 de octubre. La presión estimada al centro del huracán fue de 922mb a las 03:00 UTC (Reinhart Brad y Reinhart Amanda, 2024). En la Fi-

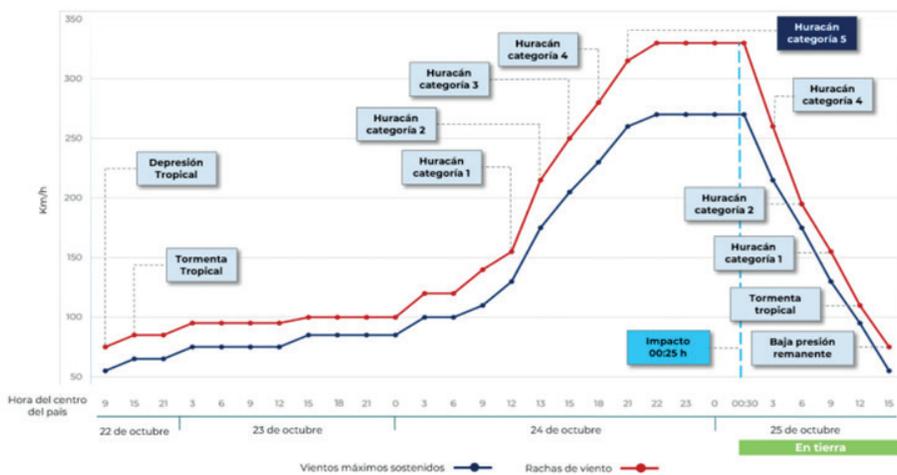


Figura 3. Evolución de los vientos asociados al huracán Otis. Imagen extraída de Conagua (2023).

gura 3 se muestra la evolución de los vientos. Las rachas de viento son mayores que los vientos máximos sostenidos, dado que las rachas son aumentos bruscos de la velocidad del viento con respecto a su valor medio, y los vientos máximos corresponde a mediciones que se mantienen sin tantas variaciones (de ahí el término sostenido). Las rachas pueden ser más peligrosas a la población debido al efecto que tienen sobre las estructuras metálicas, las ventanas, los árboles, etc.

El huracán Otis produjo una marejada ciclónica catastrófica a lo largo de partes de la costa del estado mexicano de Guerrero, cerca de donde tocó tierra. Las imágenes aéreas muestran inundaciones devastadoras en las comunidades costeras alrededor de Acapulco, y se observaron grandes daños en los puertos deportivos de la bahía de Acapulco, con barcos amontonados a lo largo de la costa. Sin embargo, se desconoce la altura máxima de inundación por marea de tempestad. Una estación de ma-

reas cercana en la Bahía de Acapulco, operada por el Servicio de Mareas de México, registró datos incompletos. Por lo tanto, no se conocen mediciones de la estación de mareas que hayan captado el pico de la marejada ciclónica.

Otis produjo fuertes precipitaciones en todo Guerrero. Gran parte del estado recibió de 50 a 100 mm de lluvia, con cantidades localmente más altas cerca y al este de la zona donde tocó tierra. En la Figura 4 se presentan las lluvias acumuladas del 24 al 25 de octubre así como la trayectoria e intensidad de Otis. En esta Figura, la escala de colores que se encuentra debajo, en el eje de las abscisas, está dada en mm de lluvia y se define como 1 litro por metro cuadrado. En Acapulco se registró un total máximo de lluvia de 266 mm. En otros lugares, 249.4 mm cayeron en El Veladero, y 220.0 mm fueron reportadas en Tierra Colorada. Estas fuertes lluvias provocaron inundaciones repentinas y fluviales, así como deslizamientos de tierra.

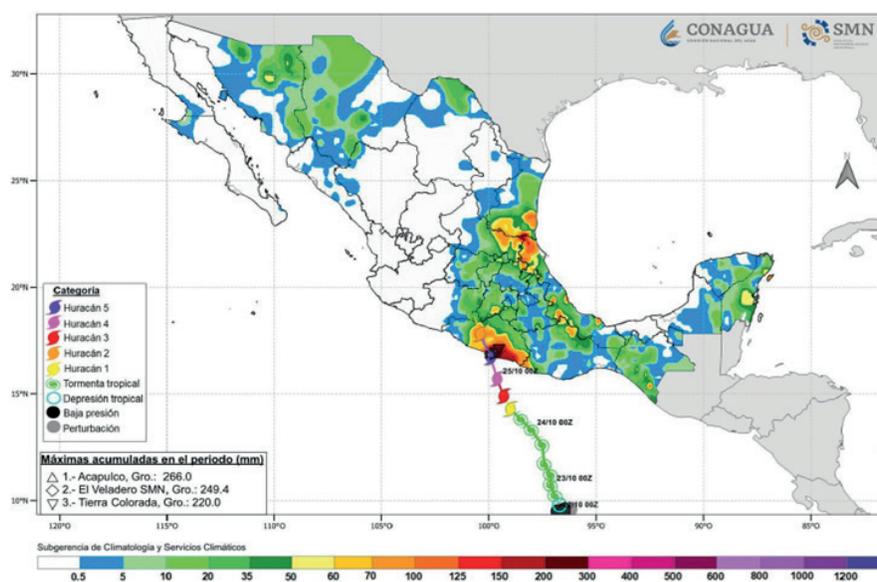


Figura 4. Lluvias acumuladas en México del 24 al 25 de octubre de 2023. La trayectoria y la intensidad se basan en la evaluación operativa del NHC. Imagen extraída de Peláez Pavón (2023).

5. Cambio climático y huracanes

5.1 El océano y la criosfera

El sol calienta al océano que desprende calor y lo transfiere a la atmósfera, y esta última lo distribuye a todo el planeta.

El océano absorbe y pierde calor más lento que las masas terrestres, así equilibra las temperaturas de la Tierra, libera calor en invierno y lo absorbe en verano.

Si el océano no regulara estas temperaturas, la Tierra sería extremadamente fría.

Las aguas marinas se están calentando, con consecuencias para las propiedades y la dinámica del océano, para sus intercambios con la atmósfera y para los hábitats de los ecosistemas marinos. Durante mucho tiempo, los debates sobre el cambio climático no han tenido en cuenta los océanos. Sin embargo, nuestra capacidad para comprender y anticipar los cambios en el clima de la Tierra depende de nuestro conocimiento detallado de los océanos y de su papel en el clima. Así lo pone de relieve el informe especial del IPCC (Pörtner et al., 2019).

5.2 Huracanes más intensos

Las simulaciones climáticas para el siglo XXI del sexto informe del IPCC (IPCC, 2023) indican que la violencia de los ciclones está aumentando como consecuencia del cambio climático. Se prevé que su intensidad media aumente un 5% y que la proporción de ciclones muy intensos (es decir, la relación entre el número de ciclones de categoría 4 y 5 y el número total de ciclones) aumente un 14%. En cuanto a las precipitaciones ciclónicas, una tendencia robusta indica un aumento de casi el 15% si se llega a un calentamiento global de 2°C. Por lo que, entre los objeti-

vos a largo plazo como guía para todos los países, del Acuerdo de París (ONU, 2015) se busca limitar el calentamiento a 1.5°C. Actualmente se tiene un calentamiento global de 1.15°C.

5.3 ¿Cómo se forman los huracanes? El Caso de Otis.

Para que se desarrolle un ciclón, las condiciones atmosféricas y oceánicas deben ser favorables. Una condición es esencial para el nacimiento y desarrollo del fenómeno: la temperatura del océano debe ser elevada en los primeros 60 metros para permitir una evaporación intensa y, por tanto, una transferencia de humedad del océano a la atmósfera.

Esta transferencia es máxima al final del verano, cuando las aguas superficiales alcanzan entre 28 y 29°C. Por ello, los ciclones no suelen formarse en el Atlántico Sur ni en el Pacífico Sureste, donde las aguas son relativamente frías. Por la misma razón, los ciclones se debilitan rápidamente a medida que se desplazan hacia el interior, donde ya no se alimentan de aguas cálidas.

En el caso del huracán Otis se tenían los elementos para su rápida intensificación: las temperaturas cálidas de la superficie del mar, de 30°C, una capa profunda de agua cálida del océano, mucha humedad y una cizalladura vertical del viento relativamente baja. La cizalladura es la diferencia de velocidad del viento entre la parte superior y la inferior de la tormenta.

En la Figura 5 se presentan las imágenes del satélite Landsat 8 antes y después de Otis.

Se observa que el paisaje en Acapulco cambia, la vegetación antes es verde y exuberante, y después se ve color marrón. Casi

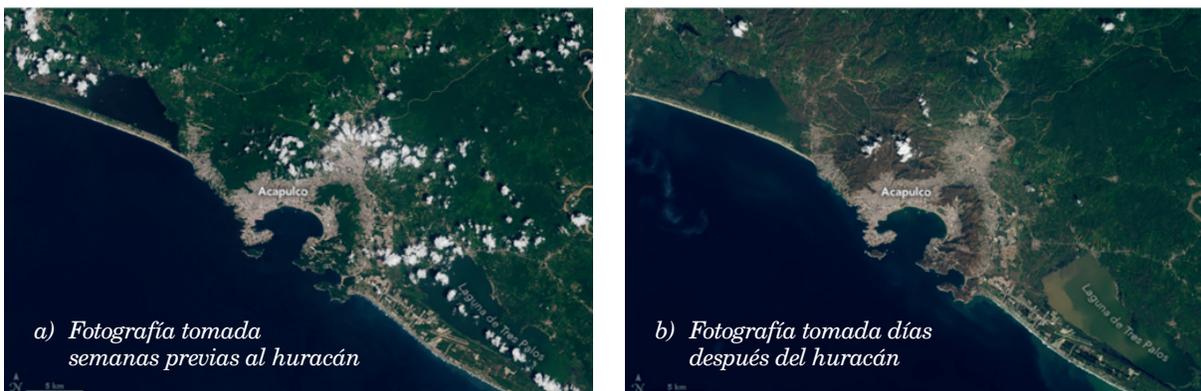


Figura 5. Imágenes del satélite Landsat 8, a) antes del huracán Otis el 21 de septiembre de 2023, y, b) después, el 31 de octubre. Tomada de <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/acapulco-despues-del-huracan-otis/>

una semana después de la tormenta, se puede observar en la Laguna de Tres Palos, los sedimentos arrastrados por el escurrimiento provocado por las lluvias extremas.

6. Avances en observaciones de huracanes

Se disponen de observaciones de huracanes desde finales del siglo XIX, especialmente sobre el Atlántico. Dado que estos fenómenos se originan sobre los océanos, podían pasar desapercibidos antes de la llegada de los satélites. Desde los años 70, la creación de una amplia red de satélites que escudriñan constantemente la Tierra ha permitido constituir una base de datos homogénea y precisa. Gracias a estas observaciones por satélite, se han podido identificar tendencias fiables en la actividad ciclónica desde 1970 hasta nuestros días. Dos tendencias llamativas son el aumento de la proporción de ciclones muy intensos y la extensión de la zona de actividad ciclónica hacia los polos. Con esto se esperaría que, hacia la segunda mitad del siglo XXI, la actividad ciclónica se desplazará hacia el norte, con lo que el Mar Caribe y el Golfo de México serán más tranquilos, en detrimento de la costa este de *EUA*.

En el Atlántico Norte, en particular, la actividad ciclónica varía de forma natural según ciclos que duran varias décadas y están vinculados a anomalías de la temperatura de la superficie oceánica.

7. Conclusiones

Los informes del IPCC reportan que ante el incremento de la temperatura de los océanos, la violencia de los ciclones aumentará como consecuencia del cambio climático. En ese sentido, el huracán Otis sorprendió por el incremento de su intensidad a medida que se acercaba a la costa, alcanzando la categoría 5 con vientos de más de 265 km/h. En la madrugada del 25 de octubre de 2023, en las costas de Acapulco, en el Estado de Guerrero, el huracán Otis se encontró con las aguas cálidas del Océano Pacífico. La temperatura de las aguas superficiales del océano permitió una evaporación intensa y, por tanto, una transferencia de su humedad a la atmósfera. Otis tuvo los elementos para su rápida intensificación: las temperaturas cálidas de la superficie del mar, de 30°C, una capa profunda de agua cálida del océano y mucha humedad. Los modelos computacionales de pronóstico de huracanes no funcio-

naron en el caso de Otis, no previeron que una tormenta tropical pasara en 12 horas a huracán de categoría 5. La capacidad para comprender y anticipar los cambios en el clima de la Tierra depende de nuestro conocimiento detallado de los océanos y de su papel en el clima.

Referencias

Peláez Pavón L. B. Huracán Otis del Océano Pacífico. Presentación *PowerPoint*. Ciclones tropicales 2023, Servicio Meteorológico Nacional, Conagua, 2023

IPCC. Climate Change 2023, Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

OMS. 2023 WHO Review of Health in Nationally Determined Contributions and Long-term Strategies: Health at the Heart of the Paris Agreement; OMS: Gi-

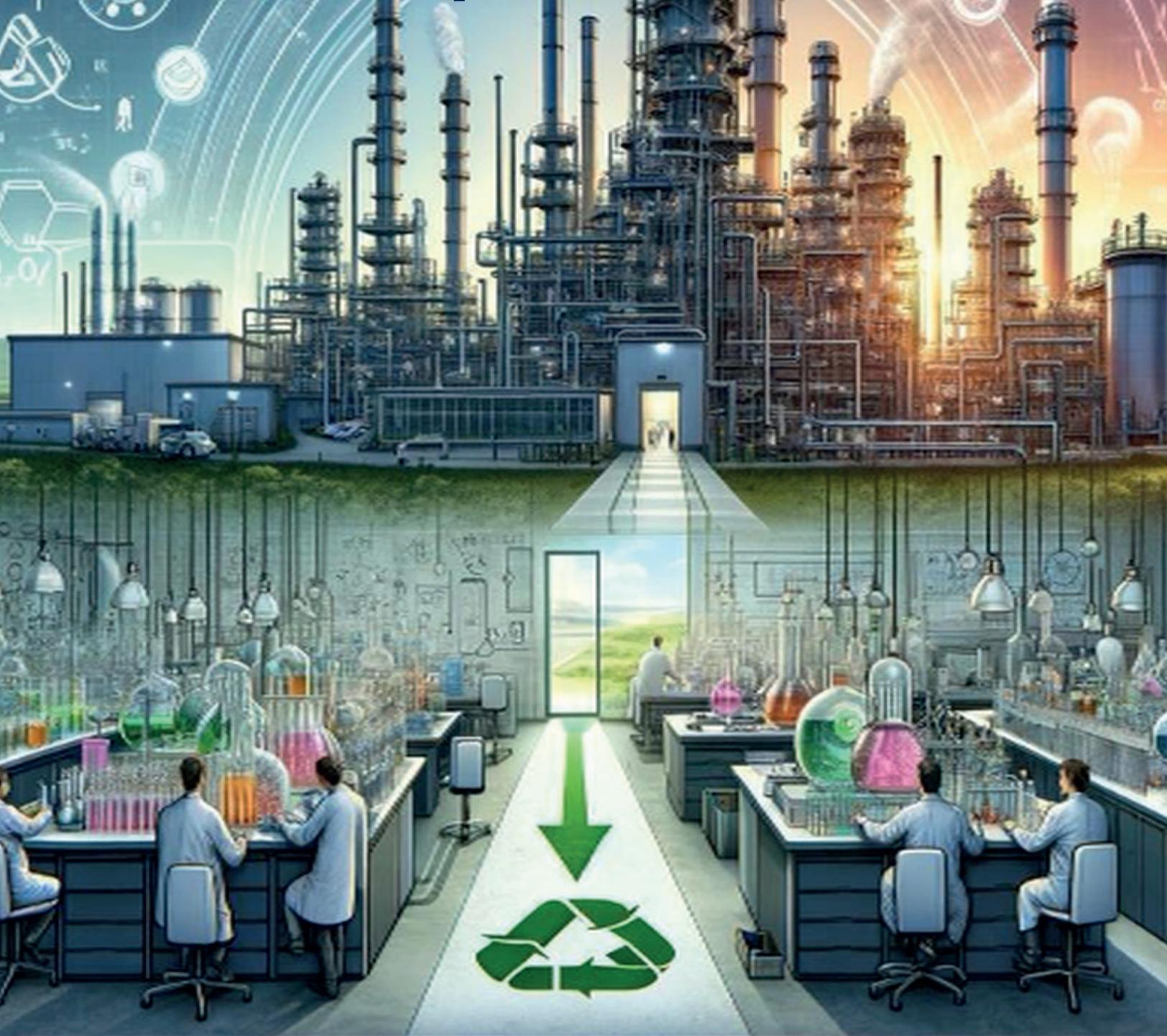
nebra, 2023, pág.10. <https://iris.who.int/handle/10665/372276>.

ONU. Acuerdo de París, 2015, Artículo 2, pág 3. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/spanish_paris_agreement.pdf

Pörtner, H., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weywe, N. M. El Océano y la Criósfera en un Clima Cambiante. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. 2019.

Reinhart Brad J. y Reinhart Amanda. Hurricane Otis, National Hurricane Center Tropical Cyclone Report, EP182023, April 2024. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP182023_Otis.pdf

La Ingeniería Química y su papel en el Desarrollo Sostenible y la Economía Circular



*Ariadna A. Morales Pérez
Carlos O. Castillo Araiza
Área de Ingeniería Química
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa*

50 años
UAM
Casa abierta al tiempo

Resumen

La Ingeniería Química se posiciona como una disciplina esencial en los próximos años para diseñar procesos bajo una concepción multiescala e interdisciplinaria y siguiendo un modelo de Desarrollo Sostenible (DS) en términos económicos, ambientales, energéticos y sociales. El presente artículo de divulgación tiene como objetivo elucidar la importancia de la Ingeniería Química en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) aplicando los principios tanto de la química verde como de la economía circular. A lo largo de este artículo se presenta de manera breve qué es la Ingeniería Química, se describe su historia y sus paradigmas desde su origen en el siglo XIX, además se hace énfasis en líneas y temas de investigación en el Área de Ingeniería Química (AIQ) en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM-I). En el AIQ se desarrollan temas de investigación tan relevantes como la producción de biocombustibles, el almacenamiento y la transformación de CO₂, el tratamiento de contaminantes presentes en agua, la producción de vectores energéticos, el almacenamiento de energía renovable, entre otros. Se hace énfasis en la investigación que se desarrolla en dos de sus laboratorios: el Laboratorio de Análisis del Agua (LANA) y el Laboratorio de Ingeniería de Reactores Catalíticos (LIRC). Finalmente, se presentan las perspectivas en términos de los desafíos que tiene la Ingeniería Química en los próximos años, donde es necesario diseñar procesos químicos y biológicos siguiendo los principios de la química verde bajo un modelo de economía circular encaminados a dar cumplimiento a los ODS.

Palabras Claves: Economía Circular, Sostenibilidad, Análisis de Agua, Ingeniería de Reactores Catalíticos.

Abstract

Chemical Engineering is nowadays positioned as an essential discipline for designing processes with a multiscale and interdisciplinary approach, following a model of Sustainable Development (SD) in economic, environmental, energy, and social terms. This article aims to elucidate the importance of Chemical Engineering in achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) by applying the principles of green chemistry and circular economy. The article provides a brief overview of what Chemical Engineering is, its history, and paradigms since its inception in the 19th century, with a focus on research areas in the Chemical Engineering at the Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa Unit (UAM-I). Key research topics in Chemical Engineering include biofuel production, CO₂ storage and transformation, water pollutant treatment, energy vector production, and renewable energy storage. The article highlights research conducted in two of its laboratories: the Laboratory of Water Analysis (LWA) and the Laboratory of Catalytic Reactor Engineering (LCRE). Finally, it discusses the future challenges for Chemical Engineering, emphasizing the need to design chemical and biological processes following green chemistry principles and a circular economy model to meet the SDGs.

Keywords: Circular Economy, Sustainability, Water Analysis, Catalytic Reactor Engineering.

1. ¿Qué son los Objetivos de Desarrollo Sostenible?

El siglo XXI se destaca por una mayor concienciación y cuestionamiento de la sociedad civil sobre la necesidad de abordar de manera integral los desafíos globales que



Producción en colaboración con TROLLBACK + COMPANY | TheGlobalGoalHub.com | +1 212 626 1010
 Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: @campagneglobal.org

Figura 1. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) incluidos en la agenda 2030.

enfrenta la humanidad, como la pobreza, la desigualdad, el cambio climático, la degradación ambiental, la paz y la justicia. En este contexto, en 2015, la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (DS). El desarrollo sostenible es un enfoque que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. La Agenda 2030 establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que abarcan las esferas económica, social y ambiental, con el propósito de erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos (Figura 1).

En 2017, México puso en marcha una Estrategia Nacional para implementar la Agenda 2030 para el DS (Gobierno de México, 2019). Esta iniciativa fue resultado de un esfuerzo conjunto que involucró al gobierno federal, los estados y municipios, el sector privado, la academia y la sociedad civil. La Estrategia Nacional tuvo como finalidad adaptar y alcanzar los 17

ODS en el país. Para ello, buscó alinear las políticas públicas y los programas gubernamentales con los principios de la Agenda 2030, promoviendo un desarrollo económico inclusivo, la equidad social y la protección del medio ambiente.

A nivel del sector académico en México, en 2019 se fundó la Red de Soluciones para el DS (SDSN, por sus siglas en inglés) (SDSN México, 2019). Esta red se creó con el objetivo de aprovechar la experiencia científica y tecnológica de las universidades e instituciones para desarrollar soluciones prácticas enfocadas en el desarrollo sostenible, basándose en los ODS. Desde su creación, distintas instituciones han contribuido al Banco de Proyectos de la red, un repositorio que agrupa y organiza diversos estudios enfocados en la sostenibilidad, y que se divide en cuatro ejes temáticos:

- Comunidades Sostenibles y Bienestar Social.
- Medio Ambiente, Actividades Agropecuarias y Alimentación.

- Economía Circular y Tecnologías Sostenibles.
- Educación para la Sostenibilidad.

A pesar de los progresos realizados, todavía se enfrentan desafíos importantes y utópicos para alcanzar los ODS debido a la magnitud de los problemas y la necesidad de transformaciones profundas en varias áreas en México. Sin embargo, establecer objetivos claros a corto plazo y movilizar a diversos sectores son pasos esenciales hacia un DS. El éxito dependerá de la voluntad y el compromiso tanto de la política como de la industria, junto con la capacidad para integrarse con los sectores académico y social, lo cual ha sido un reto histórico sociopolítico en México.

2. ¿Qué es la Economía Circular?

El concepto de economía circular empezó a tomar forma a finales del siglo XX, ganando impulso en el siglo XXI a medida que crecían las preocupaciones sobre la sostenibilidad y el cambio climático, incluyendo el establecimiento de los ODS y el Acuerdo Climático de París. Las primeras ideas sobre la economía circular surgieron en la década de 1970, con investigadores como Walter Stahel y Geneviève Reday-Mulvey (1976), quienes propusieron un modelo económico centrado en la durabilidad y el reciclaje. Esta visión inicial subrayaba la importancia de prevenir residuos y generar empleo mediante la reparación y/o reutilización de productos. En la década de 2020, y especialmente en 2024, la economía circular se ha convertido en una prioridad global, con más países y organizaciones comprometidos a implementar prácticas circulares como parte de sus estrategias de sostenibilidad. En este sentido, la Agenda

2030 para el DS de las Naciones Unidas y el Acuerdo de París sobre el cambio climático han subrayado la importancia de la economía circular para lograr un DS y reducir las emisiones de carbono.

La economía circular es un modelo con un enfoque holístico que busca minimizar el desperdicio y hacer un uso eficiente de los recursos, creando conciencia sobre el daño que se le puede hacer al planeta en términos de contaminación y su efecto en el calentamiento global. A diferencia del modelo de economía lineal, que se basa en el ciclo de extraer, producir, usar y desechar (de la cuna a la tumba), la economía circular propone un sistema más sostenible que cierra el ciclo de vida de los productos, servicios y materiales (de la cuna a la cuna) manteniéndolos en el ciclo productivo. Además, busca un equilibrio y sinergia entre la economía, la sociedad y el ambiente en concordancia con el DS.

El objetivo de la economía circular es crear un sistema económico que sea regenerativo por diseño, reduciendo así la dependencia de los recursos naturales finitos y disminuyendo la generación de residuos. Este modelo no solo tiene beneficios ambientales, sino que también puede generar oportunidades económicas, fomentar la innovación y crear empleos. Un aspecto clave de la economía circular es el rediseño de productos y procesos para reducir el impacto ambiental asociado a la obtención de un producto o un servicio. Esto puede incluir el uso de materiales reciclados, la eliminación de sustancias tóxicas y la creación de productos que sean más fáciles de reparar y reciclar. Además, promueve la utilización de energías renovables, la reducción del consumo de recursos naturales, y el al-

macenamiento y valorización de contaminantes que son subproductos no deseados dentro del diseño de procesos dirigidos a la obtención de compuestos de alto valor agregado (Figura 2).



Figura 2. Principios de la Economía Circular: Reciclaje de Materiales, Uso de Energías Renovables, Valorización de Residuos y Diseño Sostenible de Productos.

La implementación de la economía circular requiere la colaboración entre la academia, el gobierno, la industria, las empresas y los consumidores. La ciencia básica y de frontera puede hacer propuestas sobre el diseño de procesos basados en la economía circular, mientras que las políticas públicas pueden incentivar prácticas circulares a través de regulaciones y apoyos financieros. Por su parte, las empresas pueden implementar modelos de negocio circulares que capitalicen las

oportunidades de un mercado más sostenible, mientras que los consumidores pueden elegir productos ecológicos y participar en prácticas de reciclaje y reutilización. Estas decisiones pueden estar respaldadas por información sobre la huella hídrica, la huella de carbono y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de cada producto, promoviendo así una economía más responsable y alineada con los objetivos de sostenibilidad global.

3. ¿Qué es la Ingeniería Química?

La Ingeniería Química es una disciplina de la ingeniería que aplica principios de termodinámica, química, física, matemáticas, biología y economía para diseñar y optimizar el funcionamiento de procesos químicos y biológicos industriales, transformando materias primas en productos de valor añadido bajo una concepción sostenible. La Ingeniería Química se aplica a una variedad de industrias, incluyendo la petroquímica, farmacéutica, alimentaria, ambiental, de materiales y de energía.

El diseño y la optimización de un proceso se basan en transferir la información de la escala atómica a la industrial y viceversa, aplicando los fundamentos de la Ingeniería Química y los principios de sostenibilidad. Aunado a lo anterior, la Ingeniería Química desempeña un papel esencial en la implementación de la economía circular, donde es fundamental la generación y el uso de energía renovable, la reducción y valorización de residuos, la minimización del uso de recursos y la maximización de la eficiencia energética (Figura 3).

La Ingeniería Química se estableció como una disciplina formal durante la Revo-



Figura 3. Del laboratorio a la industria bajo una concepción de la economía circular. Imagen realizada con inteligencia artificial (DALL-E) que muestra, en la parte inferior, la base en el diseño industrial que es el trabajo a nivel de laboratorio, y en la parte superior, cómo este trabajo se debe transferir a la industria. Tanto a nivel del laboratorio como de la industria, se muestran imágenes relacionadas con la concepción de la economía circular.

lución Industrial a finales del siglo XIX, cuando el crecimiento de la industria química exigía profesionales capacitados para diseñar y operar procesos industriales complejos. George E. Davis, un pionero en el campo, impartió el primer curso de Ingeniería Química en 1887. En 1888, el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) creó el primer programa universitario en Ingeniería Química. A lo largo de su historia, la Ingeniería Química ha tenido tres paradigmas, cuyas características principales se presentan a continuación:

Primer Paradigma (Siglo XIX)

- Se tiene una concepción de diseño de

procesos industriales siguiendo el modelo de Economía Lineal.

- La investigación y diseño de procesos industriales se llevaba a cabo desde una perspectiva multidisciplinaria, pero limitada a un mínimo de disciplinas científicas.
- El diseño y operación de procesos se llevaban a cabo viendo a éstos como una caja negra desde un punto de vista macroscópico.
- Las estrategias de diseño y operación de procesos químicos se basan en fundamentos aplicados de la termodinámica.

ca y la química, con una heurística de escalamiento que tiene sus bases en la intuición y la experiencia adquirida en la industria.

Segundo Paradigma (Mediados del Siglo XX)

- Persiste el enfoque de economía lineal.
- El diseño de procesos industriales se lleva a cabo desde una perspectiva multidisciplinaria, es decir, cada disciplina científica trabajaba de manera independiente en su tema de interés. Varias disciplinas científicas se enfocan en generar fundamentos desde su área para el diseño de procesos industriales.
- El diseño de procesos se lleva a cabo bajo un análisis de diferentes escalas: microscópica, mesoscópica y macroscópica.
- Se consolidan los fundamentos de fenómenos de transporte e ingeniería de reactores, los cuales, junto con la catálisis, termodinámica, química y matemáticas aplicadas, se vuelven los pilares en la Ingeniería Química para el diseño y operación de un proceso industrial.
- El diseño y operación se lleva a cabo bajo una concepción multiescala, realizando un análisis desde la escala molecular hasta las escalas microscópica, mesoscópica y macroscópica, lo cual, además de diseñar procesos sostenibles de manera más confiable, permite generar un entendimiento que puede transferirse para intensificar un proceso industrial.

Tercer Paradigma (Finales del Siglo XX y Siglo XXI)

- Cambio de enfoque hacia la economía circular, con el objetivo de diseñar y operar procesos bajo la concepción que marcan los objetivos del desarrollo sostenible.
- Se sigue una aproximación holística: Integración de principios de termodinámica, química, biología, física y matemáticas desde un punto de vista interdisciplinario para diseñar y optimizar procesos industriales químicos y biológicos.

Bajo el concepto de la economía circular, la Ingeniería Química se basa en la química verde, una disciplina definida en 1998 (Anastas & Warner, 1998). En la Ingeniería Química, la química verde busca desarrollar productos y procesos químicos y biológicos más sostenibles y seguros, siguiendo principios como la prevención de residuos, economía de átomos, uso de materias primas renovables, reducción de derivados, eficiencia energética, biocatálisis, diseño para la degradación, síntesis de productos menos peligrosos, uso de disolventes más seguros, análisis en tiempo real para evitar la contaminación y diseño seguro para prevenir accidentes.

4. La Ingeniería Química en la UAM-I: Innovación y Sostenibilidad al Servicio de México.

El Área de Ingeniería Química (AIQ), de la Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa (UAM-I), ha desarrollado líneas de investigación integrales orientadas a la generación y aplicación de los fundamentos de esta disciplina bajo un enfoque multiescala e interdisciplinario. Desde su creación, la investigación en Ingeniería Química ha evolucionado significativamente, adaptándose a las necesidades del país y contribuyendo de manera crucial a la solución de problemas nacionales.

En la UAM-I, el AIQ funda la licenciatura en Ingeniería Química en 1974, cinco

años más tarde (1979) funda la Maestría y en 1984 da inicio al programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química. El AIQ ha formado a pioneros en diversas líneas y temas de investigación dentro de la Ingeniería Química, estableciendo una sólida tradición de excelencia académica y contribución científica tanto a nivel nacional como internacional. Con este antecedente, la investigación en el AIQ ha sido fundamental en abordar problemas críticos como la soberanía alimentaria, la energía, la petroquímica, la refinación del petróleo, el medio ambiente y el cambio climático. La investigación en la UAM-I se ha enfocado en cinco líneas principales, cada una con un enfoque en el DS: económico, ambiental, energética, y social. Estas cinco líneas se resumen a continuación:

- **Fenómenos de Transporte en Sistemas Multifásicos:** Se centra en el uso y desarrollo de principios relacionados con los fenómenos de transporte para diseñar e implementar procesos que involucren sistemas con múltiples fases físicas, químicas o biológicas.
- **Ingeniería de Sistemas de Procesos Químicos:** Se utilizan los fundamentos de la Ingeniería Química para desarrollar experimentos y modelos que optimicen procesos químicos, físicos y biológicos, apoyados por el avance de las tecnologías de la información como la ciencia de datos.
- **Bioprocesos y Tecnología de Alimentos:** Esta línea integra la Ingeniería Química y la biotecnología para desarrollar procesos biológicos que ofrezcan soluciones en las industrias alimentaria, farmacéutica, petroquímica

ca y de refinación del petróleo, utilizando células vivas o sus componentes.

- **Catálisis y Materiales:** Se enfoca en desarrollar nuevos materiales para distintos procesos químicos o electroquímicos. Sus aplicaciones incluyen la remoción de compuestos orgánicos volátiles y el desarrollo de materiales con propiedades ópticas, catalíticas o de almacenamiento energético mejoradas, esenciales para tecnologías sustentables y limpias.
- **Ingeniería de Reactores Catalíticos:** Se dedica al diseño, optimización e intensificación de reactores catalíticos. Combina experimentación, fundamentos aplicados de termodinámica, fenómenos de transporte, cinética química y matemáticas para el desarrollo eficiente de reactores catalíticos, con aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica, energética, electroquímica y biológica.

Estas líneas de investigación se han aplicado a una variedad de temas de relevancia hoy en día tanto a nivel nacional como internacional, por ejemplo:

- Celdas de combustible para la producción de vectores energéticos.
- Baterías de ion litio y otros sistemas de almacenamiento de energía.
- Gasificación para producir gases de síntesis (syngas) a partir de biomasa y residuos sólidos
- Hidrotratamiento de combustibles convencionales y provenientes de energías renovables

- Eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el tratamiento de agua mediante catalizadores fotoasistidos
- Captura de CO₂ y su valorización para producir combustibles sintéticos y productos químicos de alto valor agregado
- Síntesis de productos químicos utilizando catalizadores heterogéneos, biocatalizadores y microorganismos
- Cultivo y utilización de microalgas para la producción de biocombustibles y productos de alto valor agregado
- Minimización de residuos y maximización del valor de los subproductos bajo un enfoque de economía circular
- Ciencia de alimentos aplicada a la estabilización de sistemas dispersos alimentarios y el diseño de alimentos funcionales
- Uso de membranas en la intensificación de reactores para producir vectores energéticos
- Potabilización del agua mediante tratamientos físicos y químicos.

Para terminar con esta sección, a continuación, se describe el quehacer de dos laboratorios del AIQ: el Laboratorio de Análisis de Agua (LANA) y el Laboratorio de Ingeniería de Reactores Catalíticos (LIRC). Ambos laboratorios tienen una participación activa en el desarrollo sostenible (DS) bajo dos enfoques: investigación e impacto social.

Investigación.

La investigación en el LANA se centra en los Procesos de Oxidación Avanzada (Foto-

catálisis, Fenton, FotoFenton, ozonización, UV, etc.) para el tratamiento de agua, aplicando nuevos nanomateriales sintetizados o valorizando materiales reciclados para reincorporarlos al ciclo productivo. Se trabaja con un enfoque sostenible, no solo para generar procesos que descontaminen las aguas residuales, sino también para producir compuestos con alto valor agregado, como el hidrógeno verde (ODS 7), utilizado como vector energético por su alta capacidad calorífica. También se investiga la fotosíntesis artificial para combatir las emisiones de CO₂, transformándolo en hidrocarburos de cadena corta que sirven como materia prima en la industria, abordando el ODS 13.

La investigación en el LIRC se lleva a cabo mediante un enfoque multiescala y multidisciplinario, diseñando tecnologías sostenibles y de economía circular que abordan varios ODS (6, 7 y 13). Las investigaciones actuales incluyen obtener biocombustibles a partir de aceites de cocina usados, transformar el CO₂ en combustibles y productos químicos de alto valor agregado, usar tecnologías de oxidación avanzadas como la fotocatalisis para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, aprovechar residuos agroindustriales para la producción de compuestos de interés en las industrias farmacéutica y alimentaria, innovar en reactores catalíticos para la industria petroquímica para reducir el impacto ambiental y aumentar la eficiencia energética, y estudiar baterías para aplicaciones en energías renovables, la red eléctrica y la industria automotriz. Los proyectos del LIRC han generado conocimiento de ciencia básica y de frontera y de manera indirecta han contribuido al diseño de reactores para un futuro sostenible.

Impacto Social.

El LANA y el LIRC, como parte de una universidad pública en un área metropolitana, realizan diversas iniciativas para fortalecer la conexión entre la academia y la sociedad, impulsar la educación científica y fomentar un impacto positivo en la comunidad. Estas actividades enriquecen la formación académica de estudiantes de licenciatura y posgrado y también involucran a la comunidad en el diálogo científico y el desarrollo social. Ejemplos de estas iniciativas incluyen:

- **Proyecto “Agua Salubre para Todos” (LANA):** El objetivo principal es atender las necesidades hídricas de las comunidades en las regiones de emergencia sanitaria y ambiental (RESA), vulnerables a la contaminación antropogénica de sus fuentes de agua. Se evalúa la calidad del agua, se identifican los contaminantes y se propone un tren de tratamiento para potabilizarla. Este proyecto está inscrito en el banco de proyectos de la red SDSN-México y atiende el ODS número 6 (<https://sds-nmexico.mx/banco-de-proyectos/comunidades-sostenibles-y-bienestar-social/agua-salubre-para-todos/>).
- **Proyectos de Servicio Social (LIRC):** Permiten a los estudiantes aplicar sus conocimientos en contextos reales, en algunos escenarios colaborando con el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural (CESDER) para buscar soluciones innovadoras a problemas locales.
- **Presencia Digital (LIRC):** Creación de páginas de Facebook, X, Instagram, LinkedIn, canales de YouTube y sitios web para difundir conocimiento científico a un público más amplio.
- **Simposios y Talleres de Divulgación (LANA y LIRC):** Promueven el interés y la comprensión de la ciencia desde edades tempranas, ofreciendo aprendizaje práctico y dinámico.
- **Educación Continua y Conferencias (LANA y LIRC):** Cursos y conferencias a nivel de divulgación para el alumnado y el público en general, complementados con infografías y videos de acceso universal.
- **Recepción de Estudiantes para Estancias de Investigación (LIRC):** Promueve la equidad en el acceso a oportunidades de investigación de alta calidad para estudiantes de regiones menos favorecidas.
- **Docencia (LANA y LIRC):** Participan en la formación de estudiantes de pregrado y posgrado, ofreciendo oportunidades para proyectos terminales, tesis y estancias de investigación. Además, se estructuran cursos para el alumnado de ingeniería química para fortalecer e integrar su formación académica.
- **Servicios (LANA y LIRC):** Se ofrecen servicios de uso de equipos analíticos, caracterización de muestras y asesorías en el desarrollo de tecnologías químicas y biológicas dirigidas al DS.

Estas actividades demuestran el compromiso con la responsabilidad social de la academia, mostrando que la educación y la investigación científica son esenciales para el desarrollo social y la promoción de una sociedad más informada y participativa.

5. Perspectivas

En los próximos años, la Ingeniería Quí-

mica enfrentará varios desafíos importantes en su esfuerzo por alcanzar los ODS y promover la economía circular:

- **Integración de Energías Renovables:** La transición hacia un uso más amplio de energías renovables requiere innovaciones en almacenamiento de energía. Los desarrollos en baterías avanzadas y tecnologías de almacenamiento serán esenciales para garantizar un suministro energético estable y sostenible.
- **Reducción de Emisiones de CO₂:** Aunque el almacenamiento y la transformación de CO₂ en productos útiles está en progreso, escalar estas tecnologías para un impacto significativo sigue siendo un reto.
- **Tratamiento de Contaminantes:** La eliminación eficaz de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua y otros medios es vital para la sociedad. Se necesitan tecnologías de tratamiento avanzadas que sean tanto eficaces como económicamente viables.
- **La Industria Petroquímica:** Innovar en reactores catalíticos y otros procesos petroquímicos para minimizar el impacto ambiental y aumentar la eficiencia energética sigue siendo un área de enfoque crítica. Lograr esto requiere avances en materiales catalíticos y técnicas de procesamiento.
- **Educación y Formación:** Formar a la próxima generación de ingenieros químicos con un enfoque actual de la Ingeniería Química en sus fundamentos, en la sostenibilidad y en la economía circular será crucial. Esto incluye actualizar currículos académicos y proporcionar oportu-

nidades de investigación aplicada.

Es esencial que en México se promueva la colaboración entre la academia, el gobierno, la sociedad civil y el sector privado para lograr la tan necesaria sostenibilidad, incluyendo la incorporación del modelo de economía circular. Esta colaboración permitirá el desarrollo e implementación de tecnologías innovadoras que reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentarán la eficiencia energética y promoverán el uso de energías renovables, contribuyendo así a mitigar el cambio climático y a construir un futuro sostenible para las próximas generaciones. La UAM-I, con su compromiso con la sostenibilidad y la economía circular, seguirá liderando el camino hacia un desarrollo industrial más limpio y eficiente, contribuyendo así a un futuro sostenible para las próximas generaciones.

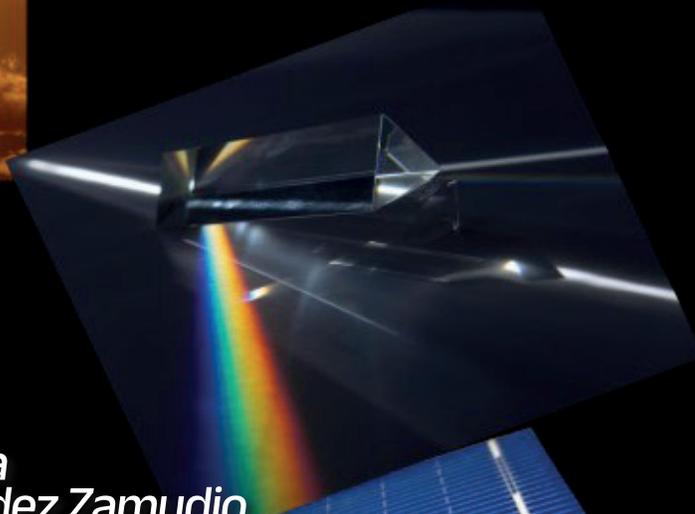
Referencias

- Gobierno de México. (2019). Estrategia Nacional para la Implementación de la Agenda 2030 en México. Secretaría de Relaciones Exteriores. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/514075/EN-A2030Mx_VF.pdf
- SDSN México. (2020). Red SDSN México. Recuperado de <https://sdsnmexico.mx/>
- Stahel, W., & Reday-Mulvey, G. (1976). Jobs for Tomorrow: The Potential for Substituting Manpower for Energy. Report to the Commission of the European Communities (now European Commission), Brussels. Brussels: Commission of the European Communities.
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press.



Acondicionamiento de luz a través de materiales luminiscentes

Rosalba Carrera Peralta
Rubén Alfredo Hernández Zamudio
Federico González García
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa



Abstract

Light is energy, and due to this fact, it may be transformed into different useful manifestations of energy such as thermal and electrical. However, another possibility is to transform light into light. In this regard, inorganic luminescent materials are of paramount importance since they allow to tailor the features of light according to specific needs. Among the salient applications, there are the artificial lighting based on a LED plus a luminescent material, and photon downconversion for increasing the efficiency of a silicon crystalline photovoltaic solar cell.

Keywords: light, energy, luminescent material, downconversion

Resumen

La luz es energía y debido a este hecho puede ser transformada en distintas manifestaciones útiles de ésta como térmica y eléctrica. Sin embargo, otra posibilidad es la transformación de luz en luz. En este sentido, los materiales luminiscentes inorgánicos son de primera importancia pues a través de ellos la luz puede adecuarse a fines específicos. Entre las aplicaciones de interés están la producción de luz artificial a base de un LED y un material lumi-

niscente y la conversión descendente para incrementar la eficiencia de una celda solar fotovoltaica de silicio cristalino.

Palabras clave: luz, energía, material luminiscente, conversión descendente

1.- Luz y energía

La experiencia cotidiana de la gran mayoría de los seres humanos incluye la percepción de la luz. A esta cualidad se le denomina sentido de la vista y es el resultado de la interpretación que el cerebro da, a través del ojo, al estímulo de la energía que posee la luz. Vale la pena mencionar que en la física la palabra luz se usa para referirse tanto al espectro electromagnético de todas las longitudes de onda como a la región de éste que produce una respuesta a través del sentido de la vista (Fig. 1). A lo largo de este texto la palabra se empleará en ambos sentidos.

A diferencia de los objetos que poseen masa, en la que una parte de la energía es inaccesible, la luz no la posee y es toda ella energía. De hecho, como cualidad de la naturaleza, la energía es una propiedad inherente de ésta, pero que por ser en cierto modo inasible es conceptualizada como potencial, cinética, nuclear, térmica, química, luminosa, y un largo etcétera.

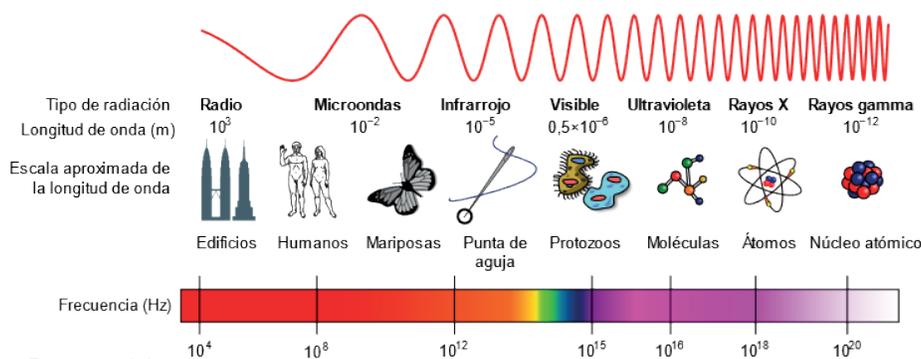


Fig. 1. Diagrama del espectro electromagnético. Se muestran propiedades como la longitud de onda con elementos que corresponden a su escala y la frecuencia.

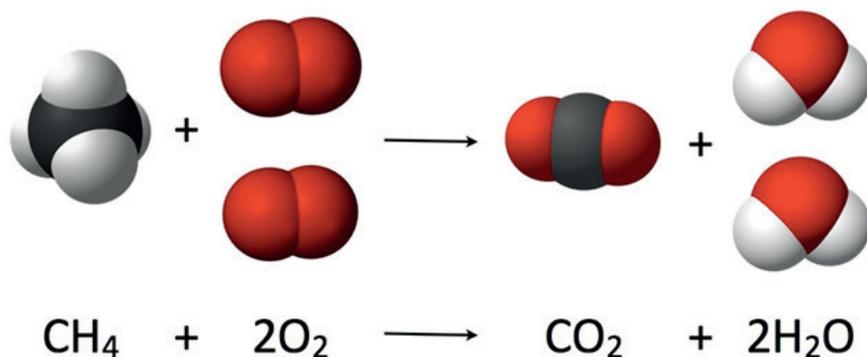


Fig.2. Diagrama estequiométrico de la reacción de combustión del metano.

Otro hecho significativo en relación con la energía es que se conserva. Este principio abstracto de base matemática dice que hay una cantidad numérica que no cambia cuando la naturaleza hace de las suyas en su complejo devenir. Para fines prácticos, la relevancia de este principio es el efecto que la energía tiene cuando adopta una de sus formas particulares. Para aclarar el sentido de lo dicho, se puede considerar a la cocción de un alimento, una tortilla, por ejemplo. Sin importar cual sea su origen, es necesaria una fuente de calor, es decir, la forma en que la energía se encuentra almacenada en el gas o la leña tiene que transformarse en energía térmica y luminosa. En este caso, la energía química almacenada en las moléculas de los que están hechos el gas y la leña. Visto a un nivel microscópico, se trataría de la ruptura de los enlaces (entre electrones) de esas moléculas y la formación de otros nuevos que cobran forma en compuestos distintos a los originales. A estos procesos se les denomina reacciones químicas. En la Fig. 2, se muestran en forma esquemática la molécula de metano, el componente mayoritario del gas natural, la de oxígeno, presente en el aire, y las de los productos de la reacción: dióxido de carbono y agua, así como la reacción respectiva.

La energía que se libera en la combustión de la leña o el gas induce también algunos cambios fisicoquímicos en la masa de maíz hecha tortilla. Sin embargo, de toda la energía liberada, una parte significativa no se aprovecha; simplemente se dispersa en el espacio circundante a la zona de cocción, sea un comal o una máquina tortilladora. Así, para que la energía tenga un efecto útil, parte de ésta se perderá en forma inexorable.

La luz es descrita como una onda electromagnética de modo que puede caracterizarse por su longitud de onda, su frecuencia o su energía. En forma sencilla, a cada valor dado de estas tres cantidades le corresponde un color. La rapidez de la luz en el vacío es una constante universal y en esta condición la rapidez de la luz, su frecuencia y su longitud de onda están relacionadas a través de la siguiente expresión

$$c = \lambda \nu$$

en donde c es la rapidez de la luz en el vacío, λ es la longitud de onda y ν es la frecuencia.

Como se señaló, la luz es pura energía. Una forma útil para determinar la energía asociada a la luz está dada por la ecuación

$$E=h\nu$$

en donde E es la energía y h es la constante universal de Planck.

De las ecuaciones anteriores, se puede decir, por ejemplo, que, en la región visible (ver Fig. 1), la luz roja es la que posee las longitudes de onda más grandes, y las frecuencias y energías más pequeñas. Por el contrario, la luz violeta y azul poseen las longitudes de onda más pequeñas, y las frecuencias y energías más grandes.

La luz puede ser transformada en otras manifestaciones de la energía. La más simple, es su transformación en energía térmica. Una superficie expuesta a los rayos del sol aumenta su temperatura evidenciando dos hechos: la energía de la luz proveniente del sol se almacena en la superficie y la energía se transforma en energía térmica. Este mismo fenómeno se emplea para mantener calientes algunos alimentos a través de su iluminación con focos de cierta potencia. La luz puede transformarse también directamente en energía eléctrica. A este fenómeno se le denomina efecto fotovoltaico. No obstante, para que ocurra es preciso emplear un intermediario. Este intermediario es un material semiconductor; el más empleado es el elemento químico silicio, en el que por la forma en que los electrones ganan la energía de la luz, es posible disponer de energía eléctrica.

La luz tiene otra posibilidad de transformación: su transmutación en luz con otra cualidad, es decir, con otra frecuencia, longitud de onda, energía o color. Este proceso ocurre en las lámparas de

LED. Aplicaciones más sofisticadas de esta transformación podrían dar lugar al incremento en la eficiencia de celdas fotovoltaicas de silicio cristalino. En lo sucesivo se presentarán algunos ejemplos de acondicionamiento de luz para fines específicos y la importancia que en ellos tienen algunos materiales inorgánicos.

En la Fig. 3 se muestran esquemáticamente los procesos de transformación de la luz que se han descrito en forma sencilla. Debe enfatizarse que, para que éstos ocurran, es imprescindible la presencia de algún tipo de material.

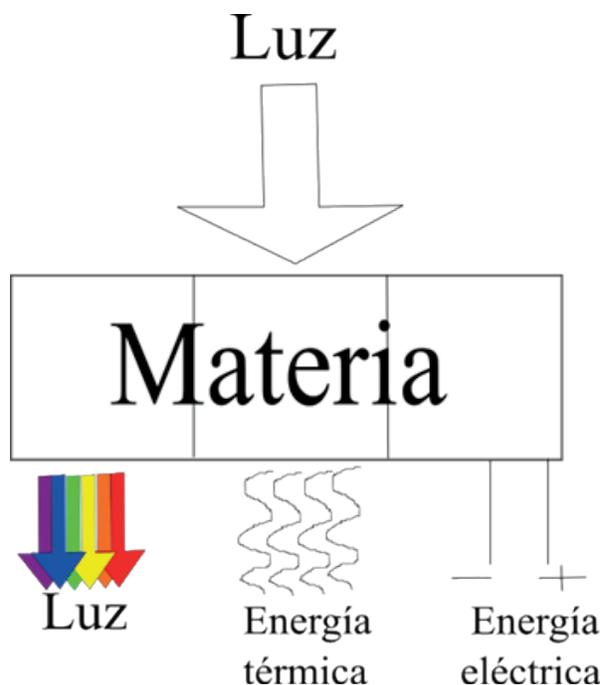


Fig. 3. Esquema de los procesos de transformación de la luz, en los que un material media el proceso.

Un elemento fundamental para transformar la luz en luz son los materiales luminiscentes. En éstos, la luz que se absorbe incrementa la energía de sus electrones, pero en un hecho poco común, una parte de esa energía absorbida es

devuelta al entorno también en forma de luz. El resto de la energía absorbida sólo incrementa la agitación de los átomos que constituyen el material. A partir de este hecho, y en consonancia con el principio de conservación de la energía, lo que se observa es el corrimiento hacia el rojo de la luz emitida, es decir, hacia longitudes de onda mayor (menor energía / menor frecuencia) en relación con el color de la luz absorbida. Este hecho puede ser comprendido a partir de la Fig. 1, al notar que el color de la luz emitida por un cuerpo estaría a la izquierda, desplazada hacia el rojo, en relación con el de la luz absorbida.

2., Luz para consumo humano: iluminación artificial a base de un LED y un material luminiscente

La luminiscencia es un fenómeno en el que un sistema físico emite luz cuando es estimulado por una fuente de energía, pero no necesariamente térmica. De hecho, el proceso en el que, por virtud del aumento en la temperatura un sistema emite luz, se denomina, en el caso ideal, emisión de cuerpo negro. En las aplicaciones que se presentan, la fuente de energía que induce la luminiscencia es luz, de ahí que suela emplearse el término de fotoluminiscencia para designar al proceso. En la Fig. 4 se presenta un ejemplo de luminiscencia que por la duración durante la cual se mantiene la emisión se llama luminiscencia persistente. En este caso el material es un óxido de aluminio y estroncio al cual se le ha agregado pequeñas cantidades de un par de iones lantanoides de europio y disprosio, y que al ser iluminado por la luz del sol u otra fuente de luz con componentes ultravioleta o azul emite en el verde.

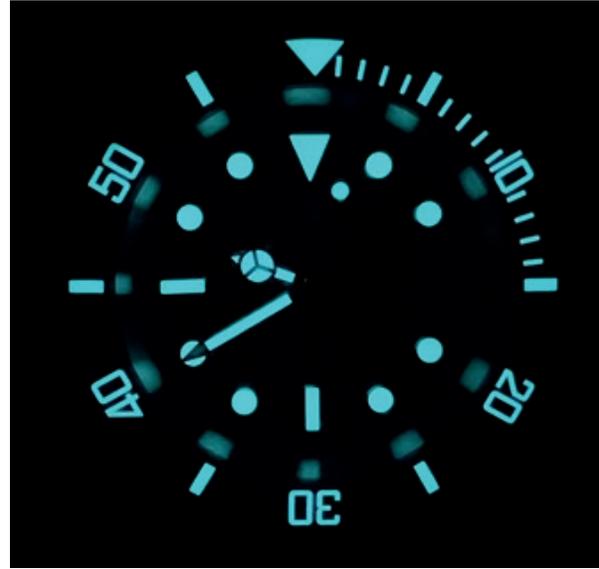


Fig. 4. Luminiscencia de un material colocado en algunas partes de la carátula de un reloj de pulsera.

Un hito en la producción de luz artificial lo representó el descubrimiento del LED azul que produce luz de ese color de manera muy eficiente. La luz azul corresponde a la de mayor energía de entre las tres que una fuente de iluminación debe emitir para resultar apropiada al ojo humano. Las otras dos son la luz verde y roja que pueden, en términos energéticos, ser producidas a partir de la azul. Es en este contexto que los materiales luminiscentes, que son capaces de absorber luz azul y transformarla en forma eficiente en verde y roja, resultan cruciales. Adicionalmente a una conversión eficiente, la síntesis de estos materiales debe consumir poca energía, es decir, que la temperatura de fabricación de los materiales sea lo más baja posible y que el entorno no necesite de gases distintos al aire ni presiones mayores a las del ambiente. La producción de materiales en estas condiciones tiene como premisa abatir el impacto al ambiente. Otro aspecto importante a nivel de investigación en

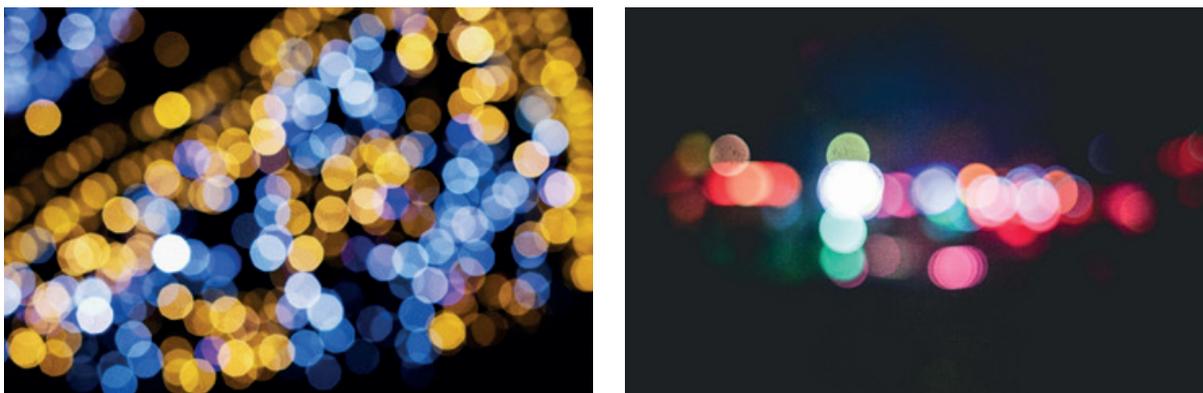


Fig. 5. A la izquierda se muestra esquemáticamente la combinación de la luz generada por un LED azul con luz amarilla que resulta de la conversión de la luz azul en amarilla. El resultado es luz blanca fría. A la derecha se aprecia la modificación de la luz hacia colores más cálidos por la adición de luz roja.

la iluminación artificial es desarrollar materiales que transformen eficientemente la luz azul en roja, pues ello permitiría la producción de luz más cálida, cuya calidad es más próxima a la ideal y que corresponde a la que produce el sol. En la Fig. 5 se evidencia la importancia del rojo en la producción de luz blanca de calidad.

Como un apunte adicional, es preciso comentar que en México el consumo de energía eléctrica para iluminación artificial a nivel residencial y comercial representa casi el 35% del consumo de energía eléctrica [1,2]. En este sentido el desarrollo de nuevos materiales puede permitir la disminución en la demanda de energía eléctrica.

3.- Aumento de la eficiencia de celdas fotovoltaicas de silicio cristalino: materiales luminiscentes con efecto de conversión descendente de fotones

La crisis ambiental provocada por la acción humana demanda, entre otras acciones, la búsqueda de estrategias que limiten la necesidad del consumo de combustibles fósiles. La generación de energía a través de tecnologías solares fotovoltaicas

se enmarca en esas estrategias y es clave para diseminar el aprovechamiento de la energía solar, coadyuvando a mitigar los efectos del cambio climático.

Actualmente, las celdas solares fotovoltaicas basadas en silicio cristalino, policristalino y amorfo representan más del 95% de la producción mundial de este tipo de tecnologías [3]. El uso del silicio cristalino ha permitido a los sistemas fotovoltaicos de unión simple tener una eficiencia máxima teórica de conversión de luz a electricidad de aproximadamente 30%, de modo que aproximarse a este límite es de particular interés. El principal reto para mejorar la eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas hechas a base de un semiconductor de unión simple, es resolver el problema de la discrepancia espectral entre la distribución de la energía de la luz solar y aquella que hace óptima su conversión a través del semiconductor en energía eléctrica. El silicio cristalino solo puede aprovechar eficientemente la luz roja e infrarroja que poseen menores energías que la luz visible de otros colores y la luz ultravioleta [4]. En la Fig. 6 se muestran

esquemáticamente la respuesta espectral de una celda solar fotovoltaica de Si-c, es decir, la contribución a la producción de energía eléctrica de la luz de cada color, y el espectro de irradiancia solar estándar AM1.5G (correspondiente al que se obtiene en condiciones de cielo despejado con el sol a aproximadamente 48° respecto al cenit), equivalente a 1000 W/m^2 . En la Fig. 6 se observa que la respuesta espectral de la celda solar de Si-c en la zona de alta energía del espectro solar (entre 325 nm (UV) y 550 nm (verde)) es deficiente. De ahí que el desarrollo de materiales luminiscentes que transformen eficientemente la luz de ese intervalo del espectro en luz roja o infrarroja es un tópico de investigación de especial importancia, pues al acoplarse a las celdas solares fotovoltaicas de silicio mono y policristalino, mejoraría en ellas el aprovechamiento de la luz asociada a la región más energética del espectro solar. A diferencia de las estrategias más socorridas en las que se adapta a la celda fotovoltaica al espectro solar, en el caso del uso de materiales luminiscentes con las cualidades descritas previamente, lo que se adapta es el espectro solar a la celda fotovoltaica, específicamente, a las hechas de Si-c.

El tipo más eficiente de conversión de luz de mayor energía en luz de menor energía se denomina conversión descendente. Se trata de duplicar la intensidad de la luz de menor energía respecto de la de mayor energía. Dicho de manera simple y en el contexto de una celda solar, cuando este tipo de conversión opera, la corriente que produce la celda se duplica. En el caso de una celda fotovoltaica de Si-c, en el intervalo que va de los 325 nm a los 550 nm [5]. En términos más técnicos, la conversión descendente de energía se refiere a la

conversión de un fotón de alta energía, es decir, con longitudes de onda en el ultravioleta (UV), el violeta, el azul y el verde, en dos o más fotones de baja energía con longitudes de onda en el cercano infrarrojo (NIR, por sus siglas en inglés) y que puedan ser absorbidos de forma eficiente por una celda solar. En la Fig. 7, se muestra el esquema de un sistema de conversión descendente de energía adaptado a una celda solar fotovoltaica de silicio cristalino.

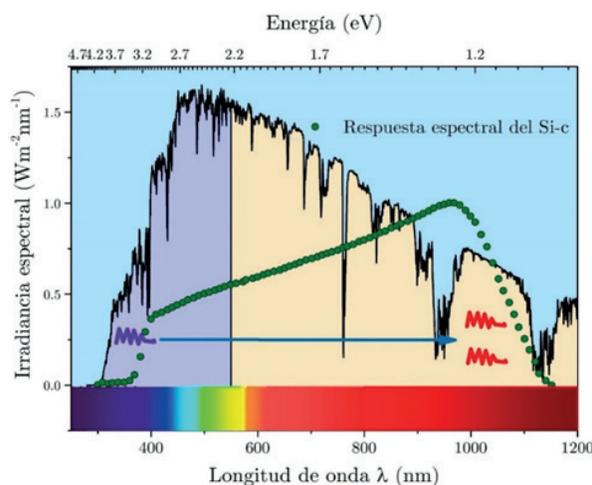


Fig. 6. Esquema del espectro de irradiancia solar estándar (AM1.5 G 1000 W/m^2) junto con la respuesta espectral de una celda solar de Si-c. Las franjas de colores en la parte inferior de la figura indican el color al que corresponde cada longitud de onda de la luz visible. En el caso de la luz infrarroja, el color solo es una referencia dado que el ojo humano es incapaz de detectarla.

La realización práctica de estos materiales luminiscentes pasa por la incorporación de los iones lantanoides trivalentes de Pr e Yb (o de otra pareja de este tipo de iones) a un material inorgánico anfitrión como el óxido de itrio (Y_2O_3). El Pr^{3+} y el Yb^{3+} , a partir del alineamiento de sus niveles de energía, como se ilustra en la Fig. 8, permiten generar una respuesta luminiscen-

te que da lugar a la conversión descendente de fotones [6]. Con el empleo de este tipo de materiales, en principio, sería posible mejorar la eficiencia de transformación de la energía solar (luz) en energía eléctrica a través de una celda fotovoltaica [7].

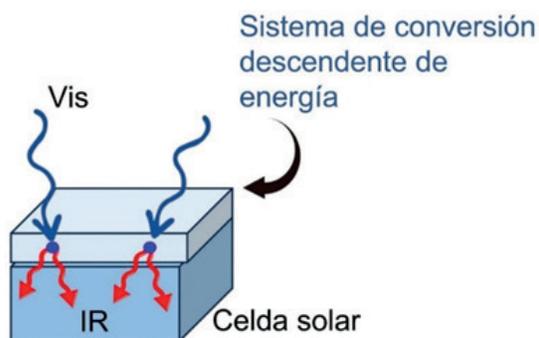


Fig. 7. Sistema de conversión descendente de energía adaptado a una celda solar fotovoltaica de Si-c, en el que se esquematiza la transformación de un fotón de luz visible (Vis) en dos fotones en el infrarrojo (IR).

4.- Epílogo

La luz es una de las manifestaciones de la energía. Su transformación y aprovechamiento requiere de materiales con propiedades que responden a necesidades específicas. Aplicaciones relevantes que involucran la transformación de luz en luz requieren de materiales luminiscentes en los que la luz en primera instancia es absorbida y luego devuelta al medio, pero ya con características particulares. La iluminación artificial a base de un LED azul y un material luminiscente que es capaz de transformar la luz producida por el LED en luz verde y roja ha dado lugar a una revolución en la forma en que se produce luz para consumo humano. Lo trascendental de este hecho está en el ahorro de energía y la consecuente disminución de la emisión de gases que provocan el calentamiento

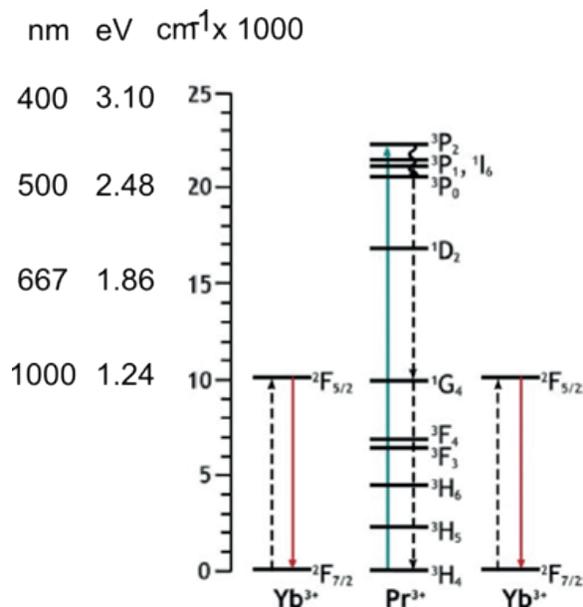


Fig. 8. La pareja de iones lantanoides trivalentes Pr e Yb, en principio permite la realización práctica de la conversión descendente de fotones. En este caso la flecha vertical que apunta hacia arriba en el diagrama de energía del Pr^{3+} equivale a la luz (de alta energía) absorbida. El Pr^{3+} para regresar a su estado de mínima energía, y en presencia de dos Yb^{3+} , se relaja en dos pasos (flechas quebradas que apuntan hacia abajo).

Los dos pasos descendentes dan lugar a la transferencia de energía hacia los Yb^{3+} (flechas quebradas que apuntan hacia arriba) de donde finalmente dos fotones infrarrojos son emitidos (flechas sólidas que apuntan hacia abajo). Los valores en el eje vertical en eV y cm^{-1} corresponden a energía. También se presentan algunos valores representativos de la longitud de onda como referencia (escala no lineal).

global, gracias a la alta eficiencia en que la luz se produce de esta manera. Una posibilidad en ciernes es el aumento de la eficiencia de las celdas solares fotovoltaicas de Si-c a través de materiales luminiscentes que sean capaces de duplicar la intensidad luminosa de la luz en la

región espectral donde la transformación de energía solar en eléctrica es más eficiente. Este proceso se basa en la conversión descendente de fotones en la que un fotón de alta energía es dividido en dos que poseen la mitad de energía respecto del original.

Referencias

[1] INEGI, Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares ENCEVI, [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>. [Último acceso: 2024 mayo 29].

[2] SENER, Balance general energía, 27 noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>. [Último acceso: 29 mayo 2024].

[3] A. Jäger-Waldau, PV Status report 2019, publications Office of the European Union, pp. 7-94, 2019.

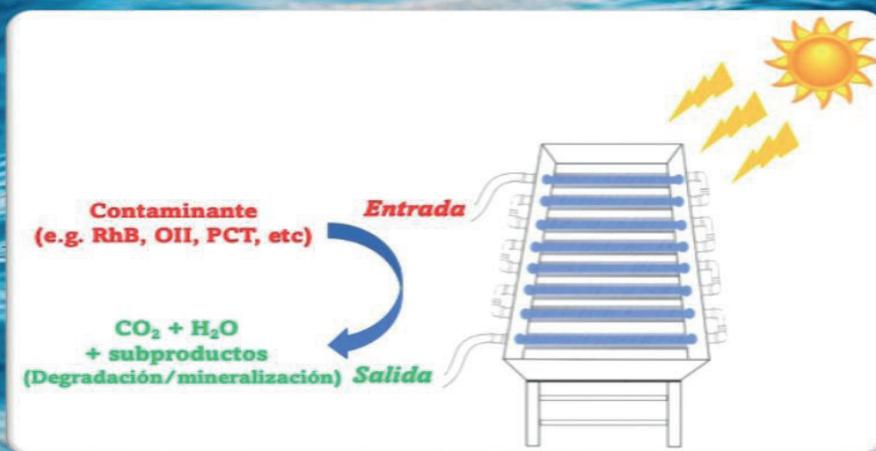
[4] B. M. van der Ende, L. Aarts, A. Meijerink, Near-infrared quantum cutting for photovoltaics, *Advanced Materials*, vol. 21, n° 30, pp. 3073-3077, 2009.

[5] B. Richards, Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Down-conversion, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, n° 9, pp. 1189-1207, 2006.

[6] C. Strümpel, M. McCann, G. Beaucarne, V. Arkhipov, A. Slaoui, V. Švrček, C. del Cañizo, I. Tobias, Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency—An overview of available materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, n° 4, pp. 238-249, 2007.

[7] T. Trupke, M. A. Green y P. Würfel, Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons, *Journal of Applied Physics*, vol. 92, pp. 1668-1674, 2002.

Sistema fotocatalítico solar integrado con colectores CPC para la degradación de contaminantes recalcitrantes en aguas residuales: nivel planta piloto



Elizabeth Rojas García
Richard S. Ruiz Martínez
Área de Ingeniería Química,
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa

Abstract

Solar photocatalysis is presented as a potential application to the treatment of water contaminated with organic waste whose degradation is hindered by conventional means of treatment. To this end, both the characteristics of photocatalysis to degrade pollutants and the design of a photocatalytic reactor that uses reflective surfaces to concentrate solar radiation in the reactor are highlighted. Finally, based on the experience of a pilot plant of the degradation of a dye for industrial use, the potential of this technology to degrade recalcitrant compounds in wastewater is discussed.

Keywords: Photocatalysis; solar; wastewater; pilot plant.

Resumen

Se presenta a la fotocatalisis solar como una potencial aplicación al tratamiento de aguas contaminadas con residuos orgánicos cuya degradación se dificulta por medios convencionales de tratamiento. Para ello, se destacan tanto las características de la fotocatalisis para degradar sustancias contaminantes como también las del diseño de un reactor fotocatalítico que emplea superficies reflejantes para concentrar la radiación solar en el reactor. Finalmente, basados en la experiencia de planta piloto de la degradación de un colorante de uso industrial, se discute la potencialidad de esta tecnología para degradar compuestos recalcitrantes en aguas residuales.

Palabras clave: Fotocatalisis; solar; aguas residuales; planta piloto.

1. Importancia de tratar las aguas residuales contaminadas

La contaminación de aguas residuales es un problema ambiental grave que surge

cuando el agua utilizada en actividades humanas, industriales, agrícolas o municipales contienen una variedad de sustancias y materiales que representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, si no se tratan adecuadamente antes de ser liberadas al entorno natural. Algunas de las principales fuentes de contaminación en aguas residuales incluyen (Manasa y Mehta, 2020):

1. Descargas industriales: Las industrias liberan una amplia gama de contaminantes en sus aguas residuales, que van desde productos químicos tóxicos hasta metales pesados y compuestos orgánicos.

2. Agricultura: El uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura puede provocar la escorrentía de nutrientes y productos químicos a las fuentes de agua, causando la contaminación del agua.

3. Actividades domésticas: El vertido de productos químicos domésticos, aceites, grasas, medicamentos no utilizados y otros desechos domésticos en el sistema de alcantarillado puede contribuir a la contaminación del agua.

4. Sistemas de alcantarillado defectuosos: Las fugas en los sistemas de alcantarillado pueden permitir que aguas residuales no tratadas se filtren al medio ambiente, contaminando ríos, arroyos y acuíferos.

La contaminación de aguas residuales está presentando varios impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana, incluyendo la degradación de ecosistemas acuáticos, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua potable y la propagación de enfermedades

transmitidas por el agua. Para abordar este problema, es crucial implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales efectivos y promover prácticas sostenibles en industrias, agricultura y actividades domésticas para reducir la cantidad de contaminantes liberados en el medio ambiente (INCyTU, 2019). Además, se requiere una regulación ambiental sólida y una gestión adecuada de los recursos hídricos para proteger la calidad del agua y garantizar la salud y el bienestar de las comunidades y los ecosistemas.

2. ¿Qué son los contaminantes recalcitrantes?

Los contaminantes recalcitrantes son sustancias que son difíciles de degradar o eliminar mediante los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Estos compuestos pueden persistir en el medio ambiente durante períodos prolongados y representar un riesgo significativo para la salud humana y el ecosistema (Römpp, 2017). Algunos ejemplos de contaminantes recalcitrantes incluyen ciertos productos químicos industriales (como los colorantes), compuestos orgánicos persistentes como los pesticidas y algunos productos farmacéuticos. Cuando las aguas residuales están contaminadas con estos tipos de contaminantes, es necesario emplear tecnologías de tratamiento más avanzadas y costosas para eliminarlos completamente o reducir su concentración a niveles seguros. Estos métodos pueden incluir procesos de oxidación avanzada, tratamiento con ozono, membranas de filtración avanzada y otros procesos de tratamiento químico y biológico especializados.

3. ¿Qué es la fotocatalisis heterogénea, como proceso efectivo para la eliminación de contaminantes recal-

itrantes de aguas residuales?

La fotocatalisis heterogénea es un proceso químico que utiliza la luz para acelerar una reacción catalítica en la superficie de un material sólido. En este proceso, un catalizador sólido absorbe la energía de la luz y la utiliza para iniciar una reacción química en una fase diferente a la del catalizador (Hoffmann, 1995). La fotocatalisis heterogénea es especialmente útil en la descomposición de contaminantes difíciles de degradar presentes en el agua y el aire. Por ejemplo, los contaminantes pueden adsorberse en la superficie de un material fotocatalítico, como el dióxido de titanio (TiO_2), y luego la luz ultravioleta (UV) excita el material catalítico, generando pares de electrones y huecos. Estos electrones y huecos pueden participar en reacciones redox que descomponen los contaminantes orgánicos en productos más seguros, como dióxido de carbono y agua.

La fotocatalisis heterogénea tiene varias ventajas, incluyendo su capacidad para degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos, su efectividad bajo condiciones suaves de temperatura y presión, y su capacidad para funcionar de manera continua sin consumir productos químicos adicionales. Este proceso se está investigando y desarrollando activamente como una tecnología de tratamiento de aguas residuales y aire contaminado, ya que tiene el potencial de ser una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente para abordar la contaminación.

4. ¿Porqué los reactores fotocatalíticos solares son una alternativa viable para la degradación de contaminantes en aguas residuales?

Los reactores fotocatalíticos solares son sistemas que utilizan la energía solar

para llevar a cabo procesos de fotocatalisis heterogénea, como la descomposición de contaminantes orgánicos en aguas residuales o aire contaminado. Estos sistemas aprovechan la luz solar como fuente de energía para activar el catalizador fotocatalítico y desencadenar las reacciones químicas deseables.

En un reactor fotocatalítico solar típico, se coloca un catalizador fotocatalítico, como el dióxido de titanio (TiO_2), en un sistema que permite la exposición directa a la luz solar. El catalizador puede estar presente disperso en la solución contaminada, o en una matriz porosa o recubriendo una superficie específica, siendo estas últimas opciones las más viables dado que aumenta su área de exposición a la luz solar.

Los reactores fotocatalíticos solares tienen varias ventajas, como su capacidad para utilizar una fuente de energía renovable y abundante (la luz solar), su potencial para funcionar de manera continua y su efectividad para tratar una variedad de contaminantes orgánicos (Sundar, Kanmani, 2020). Sin embargo, también pueden presentar desafíos relacionados con la variabilidad de la intensidad solar y la necesidad de diseñar sistemas robustos y eficientes. Estos sistemas se están investigando y desarrollando activamente como una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales y la purificación del aire, especialmente en áreas donde la disponibilidad de energía solar es alta y se requieren soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

5. Reactores fotocatalíticos solares integrados con concentradores parabólicos compuestos

El flujo de energía solar que incide sobre

el catalizador es una variable importante que impacta directamente en el desempeño de un reactor fotocatalítico solar, por lo cual se suelen emplear superficies reflejantes en forma de CPCs (Concentradores Parabólicos Compuestos) para incrementar la luz incidente al reactor (Figura 1).

Un caso particular de estos sistemas es el de los reactores fotocatalíticos con CPCs (Concentradores Parabólicos Compuestos). Estos sistemas combinan la fotocatalisis heterogénea con la concentración de luz solar, para lo cual se emplean concentradores con geometría parabólica que enfocan la luz solar incidente en un área más pequeña, aumentando así la intensidad de la luz sobre el catalizador fotocatalítico y mejorando la eficiencia del proceso. En estos reactores los concentradores parabólicos compuestos están dispuestos de manera que recojan y concentren la luz solar incidente a lo largo de un eje focal, donde se encuentra el catalizador fotocatalítico. Esta concentración de luz solar aumenta la cantidad de energía por unidad de área que llega al catalizador, lo que puede acelerar las reacciones fotocatalíticas y mejorar la eficiencia del proceso.

Al utilizar concentradores parabólicos compuestos, los reactores fotocatalíticos pueden aprovechar la luz solar directa de manera más eficiente, lo que puede ser especialmente beneficioso en áreas con alta irradiación solar. Además, estos sistemas pueden diseñarse para ser modulares y escalables, lo que permite adaptarlos a diferentes aplicaciones y necesidades de tratamiento. Los reactores fotocatalíticos con CPCs tienen el potencial de ser una solución eficaz y sostenible para el tratamiento de aguas residuales y la purificación del aire, especialmente en áreas

donde se requiere un alto rendimiento y se dispone de abundante luz solar. Sin embargo, su diseño y operación adecuados son fundamentales para maximizar su eficiencia y rendimiento.

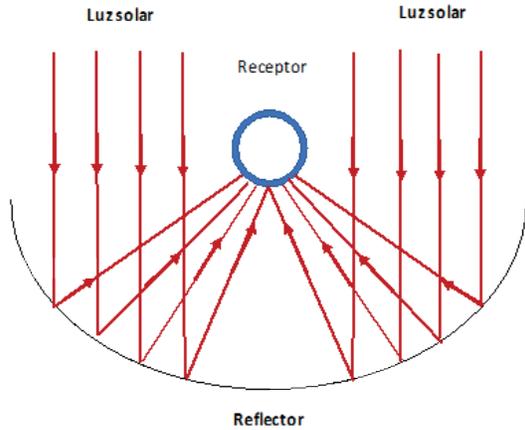


Figura 1. Diagrama de un concentrador solar parabólico que refleja los rayos solares en un punto focal (receptor, o reactor)

5.1 Aspectos generales sobre el diseño de un colector CPC

Los reactores CPC tienen la capacidad de concentrar la irradiación solar que incide en lo que se denomina área de apertura (Figura 2) y concentrarla en un área de recepción, que en el caso de un reactor corresponde al tubo o reactor fotocatalítico. Los CPC son colectores estáticos, es decir no requieren moverse para seguir el movimiento solar y se diseñan para cubrir la declinación solar entre los solsticios de verano e invierno. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad de concentrar en el receptor tanto irradiación solar directa como reflejada, y las ecuaciones de diseño de la geometría de las superficies reflejantes están disponibles en la literatura (Salgado-Tránsito et. al., 2015; Soria-Mejía et.al, 2019). Para el propósito de reflejar y concentrar los rayos solares, las paredes del CPC se fabrican con materiales de alta

reflectividad como el aluminio o chapados con materiales de tales características.

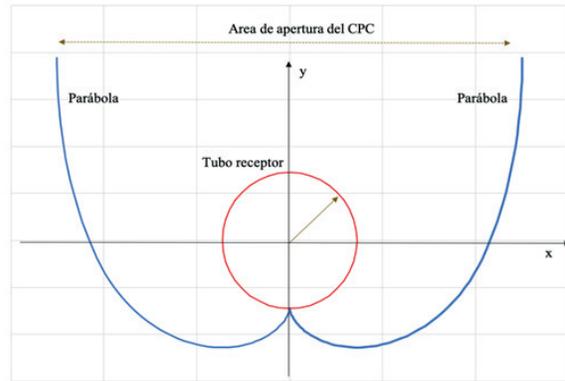


Figura 2. Diagrama esquemático de un colector CPC donde el tubo receptor corresponde a las paredes del reactor (color rojo) y las parábolas a las paredes reflejantes (color azul).

Al momento de diseñar un reactor fotocatalítico se habrá de tener presente algunas de las variables principales que afectan la reacción tales como son la fuente de luz, UV o visible (también si se tratará de una lámpara o de luz solar), la concentración del catalizador y si éste habrá de emplearse en forma de polvo disperso en el agua, o si habrá de estar fijo sobre algún material de soporte. Otro factor para considerar es la configuración del reactor y forma geométrica pues, por ejemplo, existen reactores con forma de tanque cilíndrico con agitación y otros que consisten en sistemas de tubos largos, y entre los cuales comparativamente habrá diferencias en el tipo de flujo y mezclado prevalente en cada uno de ellos que podrá afectar de manera diferente el desempeño de un sistema de reacción. En el caso particular de un reactor CPC, la reacción ocurre en tubos de vidrio (receptores) que deben ser lo más transparente posible al paso de la luz (Figura 3).

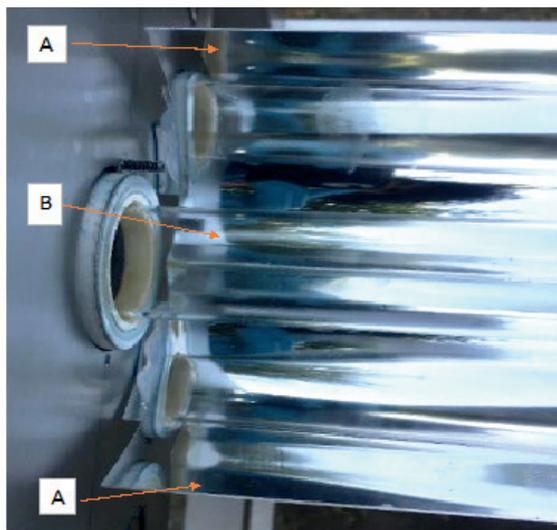


Figura 3. Sección de un reactor fotocatalítico con CPC, donde se muestra las láminas reflejantes en aluminio pulido (A) y el tubo receptor de cuarzo (B).

Existen diversos materiales que pueden emplearse para los tubos, sin embargo, su elección está íntimamente ligada a la energía lumínica con que se activa el fotocatalizador, pues una diversidad de materiales catalíticos requiere de energía UV para funcionar (principalmente por debajo de los 300 nm) mientras que otros que pueden operar también con luz visible (380-760 nm). Para los catalizadores que requieren fuentes lumínicas como la UV es recomendable usar materiales de alta transmitancia en regiones por debajo de 300 nm, aproximadamente, como es el caso de tubos comerciales de cuarzo, principalmente, seguido por tubos de borosilicato (e.g. vidrio Pyrex®). Para tales casos son menos recomendables los tubos de vidrio común, pues no resultan ser tan eficientes en permitir el paso de irradiación por debajo de los 300 nm comparado con los materiales previamente mencionados como se puede ver de la Figura 4 donde se compara su transmitancia, lo cual es una

medida del porcentaje de luz, de cierta longitud de onda, que deja pasar una muestra del material. A pesar de lo anterior, de esta misma figura se puede ver que el vidrio común si pudiera resultar convenientes para para reactores con catalizadores que operan con irradiación en la región de luz visible. Es importante tener presente que la diferencia en costos entre estos materiales puede variar de manera apreciable, lo cual no es asunto menor, pues estos reactores pueden requerir de decenas y en muchos casos hasta centenares de metros de tubería para alcanzar altos niveles de degradación de contaminantes.

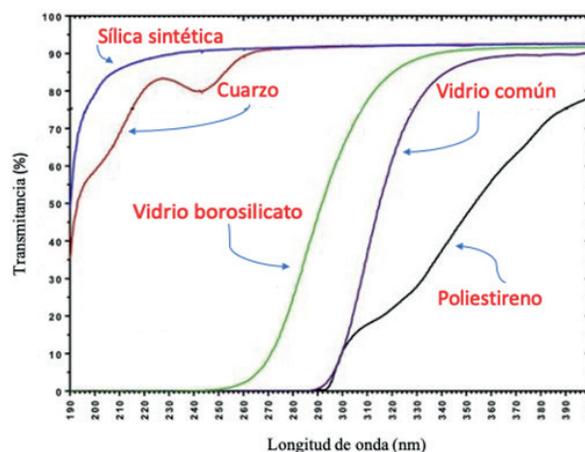


Figura 4. Comparación de la transmitancia de algunos materiales en función de la longitud de onda (adaptado a partir de Burgess, 2017).

6. Degradación de un colorante empleando un reactor CPC fotocatalítico solar

Mediante la fotocatalisis solar se ha buscado en múltiples estudios reportados en la literatura emplear la fracción UV en el espectro de luz solar para degradar contaminantes en agua. En la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, ubicada en la Ciudad de México, se

implementó un reactor experimental para estudiar su desempeño en la degradación de colorantes mediante fotocátalisis solar, a nivel planta piloto. Sustancias de este tipo suelen estar presente en aguas residuales de la industria textil y se caracterizan por ser contaminantes recalcitrantes o difíciles de degradar tanto a condiciones ambientales como por métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Para evaluar la tecnología de fotocátalisis a base de energía solar se diseñó un reactor compuesto de ocho tubos de cuarzo (cada uno de 29 mm de diámetro interno y 55 cm de largo) donde el agua con colorante circula en circuito cerrado, como se muestra en la figura 5. Por ejemplo, como contaminante a degradar se utilizó el colorante textil Negro Reactivo 5 (NR5) tipo azo, y como fotocatalizador dióxido de titanio (TiO_2 degussa) en polvo. Para llevar a cabo la reacción a nivel planta piloto, previamente fue necesario establecer experimentalmente parámetros como: concentración del catalizador, nivel de pH óptimo, orientación del reactor respecto al sol y la inclinación de la plataforma de tubos respecto a la horizontal, la experiencia en la materia sugiere colocar los tubos receptores en dirección este-oeste para optimizar la radiación anual que se recibe; en cuanto a la inclinación de la plataforma es posible determinar la irradiancia solar que se recibe en los tubos a distintos ángulos de inclinación mediante un piranómetro, dispositivo que mide la irradiancia en W/m^2 . En el presente caso el ángulo empleado fue de 30° . El experimento consistió en preparar 15 L de una solución de concentración conocida que contiene el contaminante (25 – 50 mg/L), posteriormente, se adiciona la cantidad de catalizador adecuada para obtener la concentración deseada (generalmente 1-2 g/L). Esta disolución es co-

locada en agitación con la ayuda de un mezclador “caframo” con propela por alrededor de 30 minutos, en obscuridad total. Seguidamente, la disolución es pasada a través de los tubos (reactores) con la ayuda de una motobomba de acero inoxidable de la marca Pedrollo (Figura 5, paso 1 y 2), hasta regresar al recipiente que contienen la disolución (Figura 5, paso 3). Finalmente, son tomadas alícuotas del recipiente que contiene la disolución a distintos tiempos de reacción, y posteriormente analizadas en un espectrofotómetro UV-vis. Los datos obtenidos nos permiten determinar los parámetros cinéticos necesarios para el diseño y escalamiento de reactores fotocatalíticos solares.



Figura 5. Reactor fotocatalítico con CPC a nivel piloto empleado en la degradación de colorante textil NR5.

En la Figura 6 se muestra un par de imágenes de agua con colorante al inicio y después de haber sido tratada por fotocátalisis solar durante 2.5 h, alrededor de medio día, en un día del mes de junio del año 2023. El porcentaje de degradación del colorante en el experimento superó el 96% y resultó comparativamente muy superior a la degradación empleando sólo luz pero sin catalizador (fotólisis), de sólo 14%. Además de estos resultados de degradación

del colorante NR5 existen en la literatura especializada varios otros estudios enfocados en la degradación de contaminantes recalcitrantes y que destacan a la presente como una tecnología prometedora para eliminar compuestos difíciles de degradar por métodos convencionales. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados obtenidos con esta tecnología aún se está lejos de ser aplicada a nivel industrial, principalmente debido a las limitaciones que representa concentrar la radiación solar y dirigir esta hacia el receptor (reactor), controlar la temperatura de la reacción, disposición de la luz solar durante un periodo corto durante el día, entre otras. Por ello, nuestras futuras investigaciones estarán dirigidas en tratar de minorizar estas limitaciones mejorando la captación de la luz solar, la disposición del catalizador, y colocar un sistema que permita controlar la temperatura de la reacción, entre otras.



Figura 6. Imágenes de coloración de solución de NR5 al inicio y después de 2.5 h de tratamiento por fotocatalisis.

7. ¿Hacia dónde vamos?

El tratamiento de agua residual por medio de fotocatalisis solar es una tecnología promisoriosa que aborda el problema de la contaminación empleando energía renovable ampliamente disponible en la mayor parte

de México. A pesar de los excelentes resultados obtenidos en nuestro laboratorio a nivel planta piloto, estos se realizaron utilizando moléculas modelo como colorantes (Orange II, y Negro reactivo 5) y metales pesados (cromo hexavalente). Por ello, a pesar de dicho potencial, todavía no se trata de una tecnología madura y se requiere profundizar en varios aspectos del diseño del sistema de reacción para optimizar su desempeño. Por ejemplo, (1) utilizar membranas tubulares fotocatalíticas que permitan minorizar los problemas que se presentan cuando el catalizador esta disperso en el agua contaminada, tales como daño en las bombas, mangueras y tubos (reactores), y separación del catalizador del agua tratada, (2) utilizar aguas residuales reales provenientes, por ejemplo de PTARs donde se contemplen procesos secundarios (generalmente biológicos), y (3) controlar la temperatura de la reacción ya que al utilizar la luz solar como fuente de energía para activar el fotocatalizador, la temperatura de la mezcla de reacción suele incrementarse durante el transcurso de la reacción. Por tanto, estas serían nuestras próximas metas a cumplir en futuros proyectos de investigación.

8. Conclusión

Si bien la fotocatalisis solar es un proceso viable para la eliminación de contaminantes recalcitrantes de aguas residuales como los colorantes tipo azo, está aún lejos de su aplicación a nivel industrial. Las principales razones recaen en mejorar la captación/aprovechamiento de la luz solar, la disposición del fotocatalizador en la solución contaminada, disminuir el tamaño de los reactores, limitaciones relacionadas con la disposición de la luz solar durante el día, etc. Por ello en aportación a este

tema, la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, implementó un reactor experimental para estudiar su desempeño en la degradación de colorantes tipo azo mediante fotocatalisis solar, a nivel planta piloto.

A pesar de que los resultados obtenidos son muy interesantes es necesario mejorar algunos aspectos como la disposición del fotocatalizador, diseñar nuevos catalizadores que permitan incrementar la actividad fotocatalítica, control de la temperatura de la reacción, incrementar la captación de la luz solar mediante el diseño de CPCs de más de 1 sol, entre otros, siendo estos nuestros siguientes objetivos a desarrollar para seguir aportando en la investigación de este tema tan relevante para las futuras generaciones.

Referencias

Burgess, C., *The Basis for Good Spectrophotometric UV-Visible Measurements, UV-Visible Spectrophotometry of Water and Wastewater* (Second Ed.), Elsevier, pp.1-35. ISBN: 978-0-44-463897-7, 2017.

Ceja de la Cruz, Z.T., Rentería-Rodríguez M.E., Tratamiento de aguas residuales, *INCyTU*, número 28, CDMX, 2019.

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., y Bahnemann, D. W., Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical reviews*, 95(1), 69-96, 1995.

Manasa, R. L., y Mehta, A., Wastewater: sources of pollutants and its remediation. *Environmental Biotechnology* Vol. 2, 197-219, 2020.

Römpp H., *Harzadous Chemicals Handbook*, Elsevier, 2017.

Salgado-Tránsito, I., Jiménez-González, A. E., Ramón-García, M. L., Pineda-Arellano, C. A., y Estrada-Gasca, C. A., Design of a novel CPC collector for the photodegradation of carbaryl pesticides as a function of the solar concentration ratio, *Solar Energy*, 115, pp. 537-551, 2015.

Soria-Mejía S.P., Ambrosio-Juarez J.E., Toledo-Manuel I. y Sabás-Segura J., Diseño y construcción de un Colector Solar de Tipo Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) para pruebas de calentamiento de aire, *Revista de Energía Química y Física*, 6(19), pp. 22-30, 2019.

Sundar K.P. y Kanmani S. Progression of Photocatalytic reactors and its comparison: A Review, 154, pp. 135-150, 2020.

De Leibniz a los reactores nucleares: el desarrollo del Cálculo fraccional



Carlos Antonio Cruz López
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa

Abstract

Fractional calculus can be understood as a generalization of the classical concepts of derivatives and integrals, that provides new interpretations to well-known physical phenomena. Its development can be traced to an epistolary correspondence between Gottfried Leibniz and Guillaume de l'Hôpital in the XVII century, but their formal applications started in the last decades of the current era. Particularly, there are important applications of Fractional calculus in the nuclear engineering field, that improve classical models and develop a more realistic description of energy processes that take place in a nuclear reactor. In the present article of scientific dissemination, a gentle introduction to the meaning and to the concept of fractional calculus is given, where the main ideas and motivations of the development of this field are analyzed. Additionally, a brief discussion about its importance in the nuclear engineering field is carried out, focusing in the reformulating of mass balance equations.

Keywords: Fractional Calculus, Nuclear Engineering, Physical Modeling, Diffusion, Mass balance.

Resumen

El cálculo fraccional puede ser entendido como una generalización de los conceptos clásicos de derivadas e integrales, que proporciona una nueva interpretación a fenómenos físicos bastante conocidos. Su desarrollo puede rastrearse a la correspondencia epistolar entre Gottfried Leibniz y Guillaume de l'Hôpital, en el siglo XVII, pero sus aplicaciones formales comenzaron en las últimas décadas de la era actual. De forma particular hay importantes aplicaciones del cálculo fraccio-

nal en el campo de la ingeniería nuclear, que mejoran los modelos clásicos y desarrollan una descripción más realista de los procesos energéticos que tienen lugar en un reactor nuclear. En el presente artículo de divulgación científica, se proporciona una introducción amigable al significado y al concepto de cálculo fraccional, donde las principales ideas y la motivación del desarrollo de este campo son analizadas. Adicionalmente, se lleva a cabo una breve discusión sobre la importancia de esta teoría en el campo de la ingeniería nuclear, centrándonos en la reformulación de ecuaciones de balance de masa.

Palabras Claves: Cálculo fraccional, Ingeniería Nuclear, Modelos físicos, Difusión, Balance de masa.

1.- Introducción: la curiosidad y el asombro de los matemáticos

Es posible que el lector pueda recordar, no sin un poco de nostalgia, uno de los descubrimientos matemáticos más tempranos de nuestra vida y que por lo regular suele tener lugar en la infancia: la idea de que los números no tienen fin. Se trata de un hallazgo importante, ya sea que nos haya sido transmitido o que haya sido indagado por nosotros mismos, y que suele despertar la noción de inmensidad y de infinito en nuestras mentes. Para convencernos de este descubrimiento, basta sumar una unidad al número que propongamos como el más grande, después de lo cual tendremos un número mayor. Dado que este proceso puede repetirse, una y otra vez, terminaremos por concluir que los números no tienen fin y que por lo tanto hay una infinidad de ellos (véase la Figura 1).

Claro, hablamos de los números naturales, que son los que solemos utilizar para

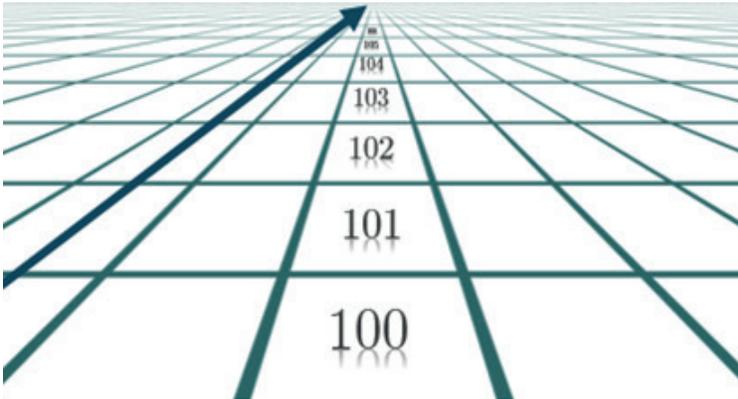


Figura 1. La idea intuitiva de que existe una infinitud de números naturales se corrobora considerando que, para cualquier número natural que propongamos como el más grande, podemos construir uno más grande sumando una unidad. Esta idea se ejemplifica con un diagrama en perspectiva donde siempre podemos avanzar hacia el horizonte, construyendo números cada vez más grandes.

contar unidades enteras positivas en el mundo real. Pero unos años más tarde de este primer descubrimiento, nos enteramos que existen otra clase de números de los que también hay una infinitud pero que, a diferencia de los naturales, nos permiten efectuar cálculos de partes no enteras. Se trata de los números racionales e irracionales. El asombro se vuelve mayor cuando descubrimos que también podemos encontrar una infinitud de estos últimos números, incluso entre dos naturales consecutivos. Esta vez, el infinito no se nos presenta necesariamente como algo enorme o sin fin, sino como algo que puede ser tan pequeño como deseamos. Así, de forma intuitiva, entendemos que la recta numérica que conocemos desde la escuela elemental no tiene huecos, sino que es un continuo y que por lo tanto en cualquier lugar que nos detengamos al recorrerla mentalmente, tendremos un número.

Detrás de muchos de estos hallazgos, algunos de los cuales no son nada intuitivos, existen tres aspectos fundamentales en el raciocinio del ser humano: el asombro, la curiosidad y la generalización. El primero constituye uno de los orígenes de la investigación y, por lo tanto, es pieza fundamental en la generación del conocimiento. En

los casos descritos antes, el **asombro** es aquello que experimentamos la primera vez que somos conscientes de la no finitud de los números naturales, o cuando intentamos asimilar que aun en un intervalo de longitud pequeña, tenemos una infinitud de números racionales e irracionales, que pueden ser tan pequeños como deseamos.

La curiosidad, por otro lado, es el motor de la investigación. Es lo que en matemáticas permite que ciertas personas no solo se interesen, sino que persistan en el estudio de problemas, pese a que estos puedan involucrar una elevada dificultad o pese a que no siempre se logre encontrar una solución o respuesta. En el ejemplo anterior, la curiosidad es aquello que nos hace investigar las propiedades de cada tipo de números y determinar su comportamiento.

Finalmente, la **generalización** es aquel trabajo que realizan los matemáticos para probar, formalmente, sus hallazgos de tal manera que se tenga total certeza de que sean verdaderos. Es la culminación de este proceso de descubrimiento y generación del conocimiento, y quizá el paso con mayor dificultad.

Siguiendo esta reflexión introductoria, es posible asegurar que detrás del origen y

del desarrollo del cálculo fraccional, se encuentran los tres elementos fundamentales que antes hemos descrito. Todo inició con el asombro al descubrir una ecuación, seguido después de un acto de curiosidad donde se pensó en extenderla, para usarla no solo con números naturales, sino con números racionales no enteros. Y finalmente, se llevó a cabo una formalización de dicha extensión, con el fin de estar totalmente seguros que podría usarse. En el presente artículo de divulgación científica, se discutirán de manera amigable el origen y los fundamentos de dicha disciplina, señalando cada uno de estos elementos y describiendo brevemente su aplicación práctica en el terreno de la ingeniería nuclear.

2.- Cartas entre matemáticos y su curiosidad

En su más reciente libro, el historiador Niall Ferguson menciona la eficiente forma en que se transmitía la información en el siglo XVIII gracias al desarrollo de las redes de publicaciones y correspondencia (cartas, correos), a tal punto que noticias sobre incidentes tan graves como el terremoto de Lisboa, ocurrido en

1755, fueron prontamente conocidas por habitantes de la ciudad de Ginebra, que se encuentra a más de mil quinientos kilómetros de distancia (Ferguson, 2021, p. 129). Estas redes existían desde al menos un siglo antes, a tal punto que, para muchos filósofos y matemáticos, resultaba la única forma de comunicación que existía tanto para discutir ideas como para realizar colaboraciones. Este proceso de intercambiar cartas, es lo que se conoce como una relación epistolar, siendo una de las más famosas en el mundo de las matemáticas la que se estableció entre Gottfried Leibniz y Guillaume de l'Hôpital, en el periodo de 1692-1701. Vale la pena mencionar en este punto, que al primero de estos matemáticos se le considera, junto con Isaac Newton, como el inventor del cálculo diferencial, siendo tan importante su aporte que a él debemos una de las notaciones o formas de escribir las derivadas más famosa que existen (véase la Figura 2). Justamente fue esta notación la que motivó la curiosidad de l'Hôpital, quien posiblemente guiado por un juego con los símbolos propuestos por Leibniz, como sugiere Ross



Gottfried Leibniz

(1646-1716)

Polímata alemán, que junto con Isaac Newton, desarrolló el Cálculo diferencial en el siglo XVII y mantuvo una relación epistolar con varios matemáticos importantes de su época. Propuso una de las notaciones más usadas para denotar derivadas, dada por $d^n y / dx^n$ (Muñoz Santonja, 2013), que posteriormente daría lugar al cálculo fraccional gracias a una pregunta de l'Hôpital (Ross, 1977, p. 76).

Figura 2. Breve semblanza de Leibniz.

(1977, p. 76), se preguntó qué significado tendría la siguiente expresión:

$$\frac{d^n y}{dx^n}, \text{ para } n = 1/2, \quad (1)$$

Figura 2. Breve semblanza de Leibniz.

en otras palabras, se preguntó qué pasaría si se colocara el valor de $\frac{1}{2}$ en la posición de n , en lugar de un número entero. De este modo se planteó por primera vez la pregunta sobre **¿qué significado tendría una derivada “media”?** Seguramente, estimado lector, has tenido dudas similares en cuanto a los posibles valores que puede permitir una operación o función. De hecho, parte de los temas que se estudian en los últimos semestres del bachillerato (o preparatoria), y en los primeros de la universidad, incluyen el concepto de *dominio* de una función, que nos permite determinar qué valores admite ésta y cuáles no. Y ni qué decir sobre la división por cero, que bien sabemos que no está definida. En este sentido, preguntarse si una expresión u operación matemática es válida para determinados valores, sigue un procedimiento similar, en cuanto a analizar el comportamiento de dicha relación, determinando si es válida o si tiene sentido. En nuestra discusión nos preguntamos si ¿la fórmula dada en la relación (1) admite valores no enteros en n ? Leibniz respondería afirmativamente a esta pregunta de l'Hôpital, calculándola para el caso donde $y = x$:

$$\frac{d^{\frac{1}{2}} y}{dx^{1/2}} = \frac{d^{\frac{1}{2}} x}{dx^{1/2}} = 2\sqrt{\frac{x}{\pi}}. \quad (2)$$

¿Cómo llegó a esta expresión Leibniz?, y lo que es aún más importante, ¿qué significado tiene esta nueva operación que usa un número racional no entero como el orden de la derivada? Antes de

intentar responder estas cruciales interrogantes, es importante observar que los elementos de los que hablamos en la introducción de este artículo están presentes en este intercambio epistolar: el asombro, la curiosidad y la generalización. Las primeras dos manifestadas por l'Hôpital, quién se preguntó qué significado tendría una expresión para un caso particular, y la última en la respuesta que dio Leibniz, que como veremos más adelante, consiste en formalizar y extender una definición.

3.- Integrales repetidas

Discutir la forma en cómo Leibniz resolvió el problema planteado por l'Hôpital puede no ser tan intuitiva, y por ello abordaremos un método distinto, que es más fácil y elemental de seguir. Dicho método está relacionado con el desarrollo de la integral fraccional, en lugar de la derivada, pero puede extenderse a esta última. Para ello pensemos en integrar una vez una función $f(t)$, lo cual escribiremos como:

$$\int_0^t f(t) dt. \quad (3)$$

Hemos utilizado los límites de 0 a t , para evitar utilizar una constante de integración. Dado que el resultado de esta integral será otra función que dependerá también de t , podemos integrarla una segunda vez, es decir:

$$\underbrace{\int_0^t \int_0^t f(t) dt dt}_{\text{Función integrada dos veces}}. \quad (4)$$

Por ejemplo, si nuestra función es $f(t) = t$, la podemos integrar de forma repetida en dos ocasiones, de tal forma que integramos una primera vez, y al resultado de dicha integración lo volvemos a integrar:

$$\underbrace{\int_0^t f(t) dt = \int_0^t t dt = \frac{t^2}{2} \Big|_0^t = \frac{t^2}{2} - \frac{0^2}{2} = \frac{t^2}{2}}_{\text{Integrando una vez}}$$

$$\underbrace{\int_0^t \int_0^t f(t) dt dt = \int_0^t \int_0^t t dt dt = \int_0^t \frac{t^2}{2} dt = \frac{t^3}{6}}_{\text{Integrando dos veces}} \quad (5)$$

Podemos utilizar la letra I con un exponente al que llamaremos “orden”, encerrado entre paréntesis, para indicar el número de veces que una función es integrada de forma repetida. Por ejemplo, si efectuamos el proceso seis veces, entonces podemos escribir la integral de **orden sexto** como:

$$I^{(6)}f(t) = \int_0^t \int_0^t \int_0^t \int_0^t \int_0^t \int_0^t f(t) dt dt dt dt dt dt. \quad (6)$$

Ciertamente tenemos más experiencia hablando del orden de una derivada, y por ello suele sorprendernos escuchar sobre el orden de una integral, pero debemos tener en mente que lo único que denota es el número de veces en que se debe realizar dicha operación. Generalizando lo anterior para cualquier n , tendremos:

$$I^{(n)}f(t) = \int_0^t \int_0^t \dots \int_0^t f(t) \underbrace{dt dt \dots dt}_n, \quad (7)$$

donde los puntos suspensivos indican que la operación se está repitiendo y donde suele ser adecuado indicar el valor de n , como subíndice.

4.- Integración de Cauchy e integrales fraccionales

El proceso de integrar de manera repetida que se discutió en la sección anterior puede simplificarse si se utiliza la fórmula desarrollada por el matemático Augustin-Louis Cauchy (véase Figura 3), que puede escribirse del modo siguiente:

$$I^{(n)}f(t) = \frac{1}{(n-1)!} \int_0^t (t-\tau)^{n-1} f(\tau) d\tau. \quad (8)$$

donde el símbolo “!” denota el factorial de un número, definido como el producto consecutivo de los primeros n naturales:

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n. \quad (9)$$



Augustin Louis Cauchy

(1789-1857)

Matemático francés, al que se le atribuye una buena parte del formalismo que poseen las matemáticas modernas. Fue prolífico en la cantidad de resultados y trabajos publicados, contribuyendo en ramas como Variable compleja, en Teoría de Números y en Análisis Real.

Es autor de la fórmula de integración repetida, que puede considerarse como el fundamento detrás de la idea de la integral fraccional (Belhoste, 1991).

Figura 3. Breve semblanza de Cauchy.

Nótese que la integral dada en la ecuación (8) tiene un parámetro τ , que introduce una modificación en la función, pero que no tiene un valor en concreto. La fórmula de Cauchy es en extremo valiosa, porque en lugar de integrar una y otra vez, como hicimos en la sección anterior, con dicha expresión se pueden reducir todas esas operaciones al cálculo de una sola integral, algo que no puede más que despertar sorpresa en nosotros. Por ejemplo, la integral sexta que escribimos en la ecuación (6), puede calcularse para cualquier función $f(t)$ que sea seis veces integrable, con la siguiente integral simple:

$$I^{(6)}f(t) = \frac{1}{(6-1)!} \int_0^t (t-\tau)^{6-1} f(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Pero la importancia de este hallazgo no se reduce a disminuir el número de operaciones a una sola, sino que a partir de la ecuación (8) podemos comenzar a pensar en una integral fraccional. En efecto, tal como hizo l'Hôpital a Leibniz, podemos preguntarnos en este punto: ¿qué significaría utilizar un número racional no entero positivo, en lugar de un natural n , en dicha fórmula? Ciertamente, dicha pregunta no habríamos podido plantearla usando la ecuación (7), pero ahora, usando la relación dada en la ecuación (8), ya resulta más sencillo ver la dependencia del valor n de forma explícita y analizar cómo podemos utilizar un valor distinto ahí. Y si bien omitiremos muchos de los detalles de la formalización, para mantener el enfoque divulgativo, podemos asegurar que es posible extender dicho resultado de Cauchy, definiendo la integral fraccional (también llamada de Riemann-Liouville) como:

$$I^{(\alpha)}f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau, \quad (11)$$

donde α es justamente el orden fraccional positivo y $\Gamma(\alpha)$ denota a la función Gamma, que es una generalización del factorial dado en la ecuación (8), es decir, es la función que permite “extender” el producto de los primeros n naturales, al caso de números reales positivos. Obsérvese que esta nueva integral tiene prácticamente la misma estructura que la fórmula de Cauchy, salvo por los dos cambios mencionados antes. Sin embargo, a pesar de que podría parecer sencillo el hacer estos cambios, la realidad es que hay mucho trabajo detrás de la ecuación (11), en cuanto a probar que tal definición tiene sentido y que es posible dicha generalización. Pero esto último es trabajo de los matemáticos, quienes se encargan de corroborar y formalizar los resultados, para que todos los demás podamos aplicarlos con seguridad y confianza. De esta manera, aunque ellos no necesariamente apliquen tales hallazgos, sí desarrollan las teorías que dan soporte a gran parte del conocimiento que poseemos hoy en día. Antes de finalizar esta sección, es importante mencionar que un método similar puede seguirse para construir y justificar la definición de la derivada fraccional, a pesar de que dicha discusión no se llevará a cabo en el presente artículo divulgativo.

5.- Aplicaciones del cálculo fraccional a la ingeniería nuclear

Y si bien la curiosidad suele ser uno de los motores de la investigación en varias ramas de las matemáticas, lo que vuelve importantes a las generalizaciones que se obtienen a través de ella, es qué tan valiosas son en términos de sus aplicaciones a casos prácticos o a problemas del mundo real. En el caso del cálculo fraccional, hay muchos ejemplos donde el utilizar derivadas e integrales de orden no entero, permite modelar

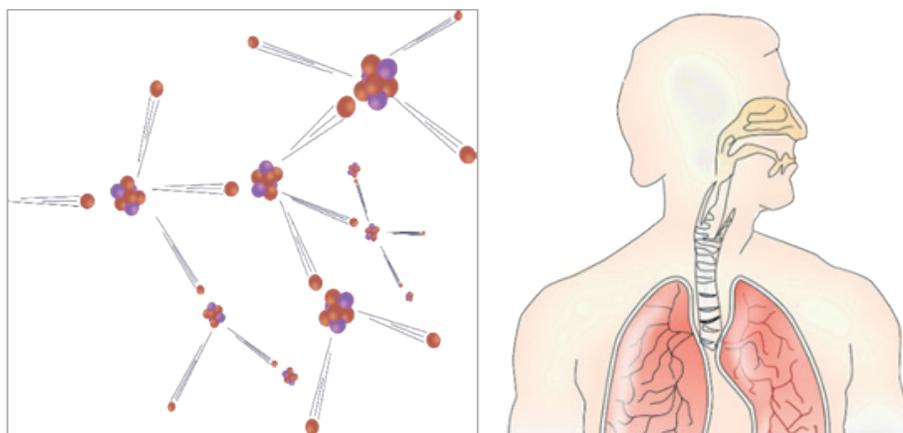


Figura 4. El proceso de difusión describe el movimiento o transporte de sustancias, moléculas y partículas, de regiones de alta concentración a regiones de baja concentración. El movimiento de neutrones en ciertos medios (izquierda), así como la absorción de ciertos fármacos en el cuerpo humano (derecha), exhiben dicho comportamiento.

con mayor precisión fenómenos físicos, químicos o económicos que ocurren en la vida diaria. Un ejemplo notable de esto último se da en la Farmacocinética, disciplina que estudia, entre otros aspectos, la forma en cómo los fármacos se distribuyen, asimilan y desechan en nuestro cuerpo.

Desde el 2009 se han desarrollado modelos fraccionales en dicho campo, los cuales permiten describir con mayor precisión la forma en cómo se difunden fármacos en el organismo. Dichos modelos se han contrastado y comparado con datos experimentales (Dokoumetzidis y Macheras, 2009) consolidándose a lo largo de la última década. En este contexto el término “difusión” se entiende como el comportamiento de ciertas sustancias, moléculas o partículas, las cuales se desplazan de regiones de mayor concentración a regiones donde esta última es menor. Muchos fármacos que se administran en el cuerpo humano suelen seguir tal comportamiento, moviéndose o transportándose de un órgano con una mayor concentración, a otro con una menor (véase Figura 4), pero también hay otros que se comportan de una forma distinta, a la que suele

llamársele difusión anómala. Es justamente en estos últimos casos, los anómalos, que los modelos fraccionales suelen dar mejores resultados al describir con mayor precisión el movimiento de los fármacos, en comparación con los modelos clásicos, es decir, comparados con los modelos que usan las definiciones clásicas de derivadas e integrales. Lo que resulta extraordinario es que este comportamiento difusivo también describe, con ciertas limitaciones, el movimiento de los neutrones en un reactor nuclear de potencia, donde también se presentan fenómenos subdifusivos. De este modo, una de las aplicaciones actuales y modernas del cálculo fraccional consiste en la construcción de modelos que describen con mayor precisión el movimiento de neutrones en un reactor nuclear, al incluir los fenómenos subdifusivos mencionados anteriormente. En este punto vale la pena mencionar que dicha línea de investigación fue fundada por investigadores mexicanos (Espinosa-Paredes et al., 2011), quienes propusieron la primera ecuación constitutiva fraccional para el transporte de neutrones, y que ha tenido una relativa repercusión en el área de ingeniería nuclear, donde grupos de investigación

de distintos países han retomado y extendido muchas de estas ideas (Espinosa-Paredes y Cruz López, 2024).

5.- Aplicación en reactores nucleares

La parte matemática detrás de los modelos fraccionales en reactores nucleares es bastante técnica y compleja para abordarla detalladamente, sobre todo en un artículo divulgativo, pero podemos explicarla de manera elemental desde el punto de vista de los balances de masa. ¿En qué consisten dichos balances? La idea detrás de ellos se remonta a aquel conocimiento básico que tenemos de las propiedades de la materia, según la cual ésta no se crea ni se destruye. En dicho sentido podemos cuantificar el aumento o disminución de una sustancia (o de un número de partículas o moléculas) en un determinado tiempo, en términos de las ganancias y las pérdidas que se estén produciendo en dicha sustancia o población. Por ejemplo, la velocidad con la que la cantidad de agua de un recipiente varía, estará dada en función de cuánta agua esté entrando a dicho recipiente (ganancias), menos la cantidad de agua que esté saliendo de él (pérdidas). Este mismo principio puede aplicarse para determinar la velocidad, o “tasa de cambio”, de la población de neutrones en una región dada de un reactor nuclear y puede plantearse del modo siguiente:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Tasa de cambio de la} \\ \text{población de neutrones} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Tasa de ganancias} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tasa de pérdidas} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right]. \quad (12)$$

Observemos que las ganancias y las pérdidas no tienen por qué ser constantes, es decir, pueden variar con el tiempo y por ello se definen al tiempo t . Para ilustrar esto último, pensemos nuevamente en nuestro ejemplo del depósito de agua.

Consideremos que las pérdidas están representadas por el agua que sale a través de un orificio en la parte inferior de él. Claramente la cantidad de agua que salga del depósito dependerá de la cantidad de agua presente en él, en cuanto a que saldrá más rápido cuando el tanque esté más lleno, y más lentamente conforme éste se vaya vaciando. Esto muestra que la cantidad de pérdida varía con el tiempo, mostrando justamente que no tiene por qué ser constante. La relación (12) puede escribirse usando un lenguaje puramente matemático, al recordar que la derivada es justamente la que mide la tasa de cambio de una determinada función. De esta manera reescribimos dicha ecuación como:

$$\frac{d}{dt} \left[\begin{array}{c} \text{Población de neutrones} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Tasa de ganancias} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tasa de pérdidas} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right]. \quad (13)$$

Imaginemos ahora que deseamos encontrar el cambio que experimentó la población de neutrones entre el tiempo $t = 0$ y el tiempo t . En ese caso, tenemos que aplicar una integral, que en cierta manera puede considerarse como una operación que remueve la derivada, aunque no necesariamente es la operación inversa de ella. De este modo tendríamos que:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Cambio en la población} \\ \text{de neutrones entre } t \text{ y } 0 \end{array} \right] = \int_0^t \left(\left[\begin{array}{c} \text{Tasa de ganancias} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tasa de pérdidas} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] \right) dt. \quad (14)$$

Es decir, integrando el lado derecho, estaremos “sumando” todas las contribuciones y las pérdidas que ocurrieron en el intervalo de tiempo dado, que sería equivalente a hacer un “balance global” para cada momento

transcurrido entre el tiempo $t=0$ y el tiempo t . En este punto, sin embargo, podemos utilizar la integral fraccional, en lugar de la integral normal que hemos usado en la ecuación (14), resultando:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Cambio en la población} \\ \text{de neutrones entre } t \text{ y } 0 \end{array} \right] = I^{(\alpha)} \left(\left[\begin{array}{l} \text{Tasa de ganancias} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Tasa de pérdidas} \\ \text{al tiempo } t \end{array} \right] \right). \quad (15)$$

que en este caso vendría a representar una forma distinta de tomar en cuenta todas las pérdidas y ganancias en un intervalo de tiempo determinado. Esta es, en esencia, la forma en cómo se incluye el cálculo fraccional en las relaciones de balance de masa de los neutrones en un reactor nuclear y la forma en que se mejora la simulación de su comportamiento.

6.- Conclusiones

En el presente artículo de divulgación se discutieron los antecedentes históricos del cálculo fraccional, haciendo énfasis en la curiosidad matemática que busca, de forma constante, generalizar relaciones o resultados. Así mismo, se explicó de forma pedagógica cómo es que se construye una integral fraccional a partir de llevar a cabo, de forma repetida, el proceso de integración. También se incluyó una discusión acerca de las aplicaciones que existen en el campo de la ingeniería nuclear y particularmente en cómo las integrales fraccionales permiten tomar en cuenta contribuciones a través de balances de masa modificados. De estos elementos es posible concluir que las ideas fundamentales del cálculo fraccional surgieron a través de un proceso que involucró el asombro, la curiosidad y la generalización, y que hoy día son relevantes gracias a sus importantes aplicaciones en la descripción de complejos

fenómenos físicos, como son aquellos que ocurren en un reactor nuclear de potencia.

Agradecimientos: el autor agradece el financiamiento recibido por parte del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), a través del programa de Estancias Posdoctorales por México, 2022, gracias a cuyo financiamiento fue posible la realización de este artículo.

Referencias

- Belhoste, B., Augustin-Louis Cauchy. A Biography. Springer-Verlag. 1991.
- Blanco, M., La correspondencia entre Leibniz y El Marqués de l'Hopital: sobre la envolvente de una familia de curvas, *Quaderns d'Història de L'Enginyeria*, XVI, pp. 143-165, 2018.
- Dokoumetzidis, A., Macheras, P., Fractional kinetics in drug absorption and disposition processes, *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*, 36, pp. 165-178, 2009.
- Espinosa-Paredes, G., Polo-Labarrios, M. A., Espinosa-Paredes, E. G., Del Valle Gallegos, E., Fractional neutron point kinetics equations for nuclear reactor dynamics, *Annals of Nuclear Energy* [2-3], 38, pp. 307-330, 2011.
- Ferguson, N., Desastre. Historia y Política de las Catástrofes, Debate, España, 2021.
- Muñoz Santoja, J., El Cálculo Infinitesimal. Leibniz. La Física Aprende un Nuevo Idioma. RBA, España, 2013.
- Ross, B., A Brief History and Exposition of The Fundamental Theory of Fractional Calculus, Springer, 2006.

Gestión y Manejo del Agua en Grandes Ciudades

Eugenio Gómez Reyes
Marco Antonio Jacobo Villa
Felipe de Jesús Armas Vargas
Erick Raúl Olvera Prado
Ingeniería hidrológica
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa



Abstract

An overview of water administrative structure and water management and their challenges in big cities is presented. Research contributions by the Hydrological Engineering Group (GIH) of the Department of Processes Engineering and Hydraulics of the UAM-Iztapalapa are described, regarding the management and handling of water resources. Likewise, future challenges and actual water research projects under development by GIH, regarding water administrative structure and management, are emphasized.

Keywords: Water administrative structure, water management, supply and demand, Hydrological Engineering, water research projects.

Resumen

Se presenta una revisión general de los conceptos de gestión y manejo del agua, así como los retos por contender en las grandes ciudades. Se describen las contribuciones de investigación por el Grupo de Ingeniería Hidrológica (GIH) del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica de la UAM-Iztapalapa, en cuanto a la gestión y manejo del recurso hídrico. Asimismo, se

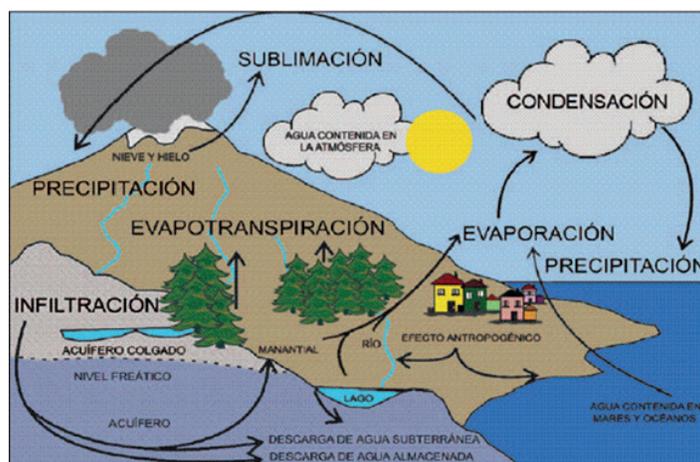
enfatan las perspectivas de las temáticas de investigación y lo que está desarrollando el GIH en relación con la gestión y manejo del agua.

Palabras claves: Gestión del agua, manejo del agua, oferta y demanda, Ingeniería Hidrológica, proyectos de investigación del agua.

1. ¿Quién nos da el agua?

La naturaleza, a través de la lluvia, proporciona el agua que tenemos en nuestra región. La lluvia es una parte fundamental del ciclo del agua (Fig. 1), ya que constituye el agua que se renueva. Sin embargo, no llueve lo mismo en cada lugar ni en cada instante de tiempo. De ahí que cuando las lluvias son menos frecuentes o escasas, pueden ocurrir graves desequilibrios en donde el agua es necesaria. Por ejemplo, en la agricultura, la temperatura aumenta e impide el crecimiento de la vegetación, el suelo se degrada y agrieta.

El ciclo del agua es un conjunto de procesos simultáneos de transferencia de masas de agua interrelacionados, como se muestran en la Figura 1 (De Miguel *et al.*, 2009), en



Fuente: De Miguel *et al.* (2009).

Figura 1. Ciclo del Agua.

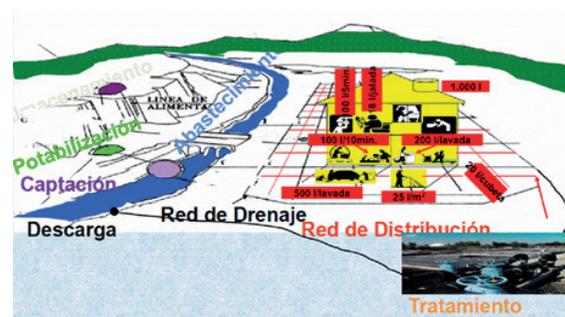
donde el sol aporta la energía necesaria para romper los enlaces que mantienen unidas las moléculas de agua. Este proceso de cambio de estado de fase líquida a gas (vapor de agua) se denomina evaporación. Cuando la humedad relativa del aire llega a su punto de saturación, comienza la condensación, proceso por el cual el vapor de agua del aire se transforma en agua líquida dando lugar a la formación de nubes. Estas nubes, en determinadas condiciones de presión y temperatura originan precipitaciones (en forma de lluvia); aunque también puede ocurrir en forma de nieve y acumularse en los glaciares. Su fusión, junto con el resto de precipitaciones da lugar al agua superficial y subterránea. Donde una parte del agua superficial fluye hasta el mar; otra se infiltra en el suelo y el resto, se evapora. Una vez el agua infiltrada, atraviesa la zona no saturada, donde puede evapotranspirarse por acción de las plantas o fluir hasta el acuífero (zona saturada) (De Miguel *et al.*, 2009).

El hombre ha intervenido y es un agente activo del ciclo del agua, logrando adaptarlo a sus necesidades mediante la construcción de presas y acueductos (entubamiento del agua), la explotación de los acuíferos (pozos de extracción de agua subterránea), la promoción de la condensación (bombardeo de nubes con yoduro de plata) y posterior precipitación pluvial. Los efectos de las alteraciones al ciclo del agua necesitan ser comprendidos para enfrentar los desafíos de estos cambios.

2. ¿Quién entrega el agua?

El servicio de entrega del agua (gestión del agua) a las grandes ciudades es un tema muy importante que recientemente ha sido investigado de manera intensa, sobre todo para la problemática de la se-

guía. En nuestro país, la entrega de agua a los Estados (agua en bloque; el total de volumen de agua requerido en esos Estados) que nos da la naturaleza (lluvia, ríos, lagos, lagunas, presas, manantiales, acuíferos), la realiza la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) quien tiene la responsabilidad de gestionar y administrar los recursos hídricos a nivel federal, mediante la adecuada utilización de la infraestructura hidráulica. El agua en bloque la reciben los organismos operadores del agua. En el caso de la Ciudad de México es el SACMEX (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), como lo es la CAEM (Comisión del Agua del Estado de México) en el Estado de México o la CAASIM (Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales) en Hidalgo, quienes tienen la responsabilidad de hacer llegar el agua potable y dar servicio de drenaje a los habitantes de las ciudades, con la cantidad y calidad necesaria, mediante la adecuada utilización de las redes de distribución de agua y drenaje, así como la operación de las plantas de potabilización y las de tratamiento del agua residual (saneamiento). La Figura 2 muestra esquemáticamente la infraestructura hidráulica para hacer llegar el agua a las ciudades.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Aprovechamiento del agua.

El agua es uno de los principales factores que influye en el crecimiento pobla-

cional, desarrollo económico y seguridad alimentaria de las ciudades. Sin embargo, satisfacer la sed de las grandes ciudades siempre ha sido un problema para los que entregan el agua (gestores). Actualmente, 55% de la población mundial vive en áreas urbanas, y se espera que aumente en un 68% para el 2050, lo que significa un aumento de 2.5 billones de personas que necesitarán más agua; el promedio de requerimiento de agua por habitante (per cápita) mundial es de 6,000 m³/habitante/año (FAO, 2016). En la región de América Latina y el Caribe, abunda el agua que puede satisfacer un requerimiento per cápita de 28,000 m³ (4 veces más del promedio mundial). Sin embargo, el agua no está disponible para los ciudadanos de manera fácil y equitativa. Esto es un indicativo de una mala gestión del agua.

Por otro lado, Sudáfrica es un buen ejemplo de un país carente de agua (*water scarce country*) que se sobrepuso a una mala gestión del agua. Durante 2017-2018, Ciudad del Cabo sufrió una fuerte crisis de agua en la que los niveles de sus presas bajaron a 11% de su capacidad, poniendo a la ciudad en riesgo de ser la primera en el mundo de quedarse completamente sin agua. La ciudad respondió implementando una serie de restricciones de agua agresivas, y logró reducir el consumo diario de agua en un 50%. El agua que pudo ser reservada como resultado, junto con la buena temporada de lluvias del verano de 2018, provocaron que las reservas de agua en las presas subieran al 70% para septiembre de ese año.

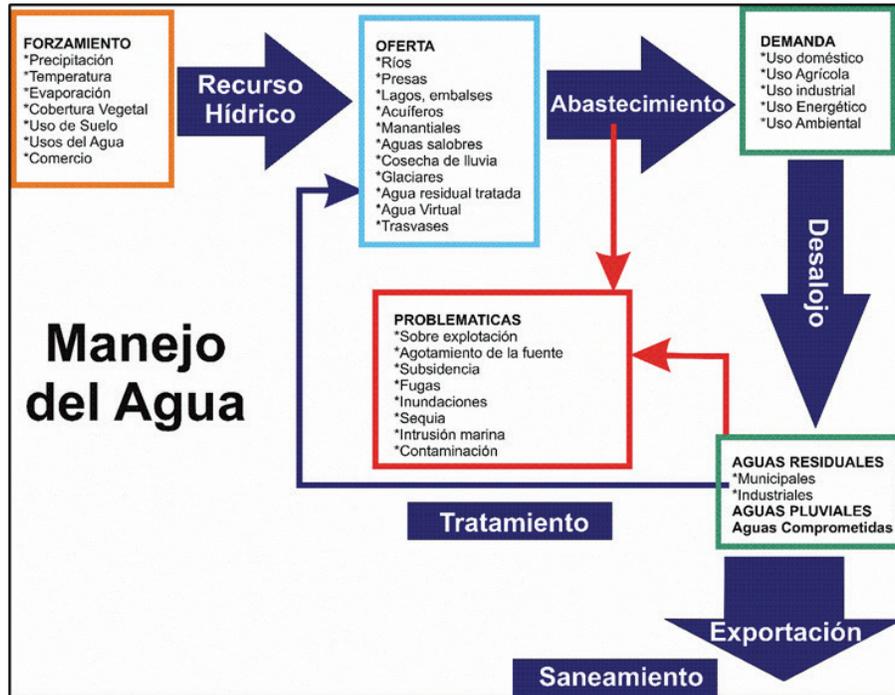
En México, se ha adoptado la “Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)”, definida en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) de 2012, como el pro-

ceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con estos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales, esto es, una gestión íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable.

3. ¿Qué involucra la entrega de agua?

La entrega de agua (manejo del agua) involucra el conocimiento de la disponibilidad, funcionamiento y variabilidad de las fuentes de agua que nos da la naturaleza (lluvia, ríos, lagos, lagunas, presas, manantiales, acuíferos), así como de los eventos ambientales, económicos y sociales que tienen influencia en ellas (Fig. 3). Asimismo, involucra las prácticas operativas de los aprovechamientos de las fuentes de agua para satisfacer la demanda en cantidad y calidad de las ciudades, generada por sus diversos usos del agua (hidroeléctricas, doméstico, agrícola, conservación ecológica, industrial, agroindustrial, acuicultura, servicios, termoeeléctricas, pecuario, múltiples, comercio, público urbano y otros).

El manejo de los recursos hídricos no solo contempla el abastecimiento de agua para satisfacer la demanda de sus diversos usos, sino que también considera el desalojo, tratamiento y reúso de las aguas usadas a las que se han incorporado productos de desecho (aguas residuales). También involucra el análisis y alternativas de solución de las problemáticas del agua generada por un deficiente manejo (sobreexplotación y agotamiento de las fuentes, hundimiento del suelo, fugas de agua, inundaciones, sequías, intrusión salina, contaminación).



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Representación esquemática del manejo del agua.

4. ¿Cuáles son los retos de la gestión y manejo del agua?

Hacer más sustentable la gestión del agua. Las acciones actualmente implementadas de gestión del agua en México están concentradas en atender las demandas crecientes de agua, resultado de las actividades económicas predominantes en las ciudades. Por consiguiente, alcanzar una GIRH en el país enfrenta grandes desafíos, dado que difícilmente las instituciones responsables del manejo del agua, en particular las que se encuentran en el nivel local, cuentan con los recursos financieros, humanos y tecnológicos suficientes (Sosa-Rodríguez *et al.*, 2020). Es por ello, que resulta necesario aplicar otros enfoques de gestión que mantengan los aspectos primordiales de la GIRH como son participación, gobernanza del agua, descentralización de funciones y sosteni-

bilidad de los recursos; además de considerar aspectos sociales, ambientales, culturales, legales, institucionales, políticos, financieros, equidad, justicia, simpleza de aplicación y, sobre todo, capacidad de medición y seguimiento. Una alternativa corresponde al Prisma de la Gobernanza de Cuencas, enfoque de gestión que reúne las características mencionadas y el cual se ha aplicado en la Cuenca del Río Duero, Mich. (Armas-Vargas *et al.*, 2022; 2023).

La seguridad alimentaria. Los efectos del cambio climático se acentuarán en las zonas con rápidos procesos de urbanización, sin dejar de lado los impactos en el medio rural por la disponibilidad del agua y los cambios de temperatura, que podría derivar en el desplazamiento y rendimiento de las zonas de cultivo (Estadísticas del Agua en México, 2018). En consecuencia, es ne-

cesario evaluar alternativas de adaptación climática para contender con la amenaza de la seguridad alimentaria.

Fuentes de abastecimiento no convencionales. En la medida que el agua se ha vuelto escasa en muchas ciudades del mundo, el manejo del agua ha incorporado nuevas fuentes de abastecimiento no convencionales para reducir la demanda de agua, *v.gr.*, cosecha de lluvia, recuperación de agua perdida por fugas, agua residual tratada, agua virtual. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas técnicas no siempre aseguran el completo abastecimiento de agua, aunque estén bien diseñadas, sobre todo la cosecha de lluvia toda vez que no llueve todos los días del año. Asimismo, es imposible la eliminación total de las fugas, pero si es viable la implementación de planes, basados en tecnologías innovadoras, para la recuperación de la mayor parte de los volúmenes perdidos. En este sentido, el reto consiste en mejorar las técnicas de aprovechamiento de aguas de las fuentes de abastecimiento no convencionales para que se consideren tecnología probada y puedan incorporarse como parte fundamental del abastecimiento de agua a las ciudades.

Cultura del agua. El ahorro del agua para reducir la demanda representa una fuente importante de abastecimiento de agua. En este caso, se hace necesaria la participación ciudadana a través del ahorro y la recirculación de agua, lo que conlleva hacia una nueva cultura del agua. En ella, los ciudadanos se acostumbran a reutilizar el agua del aseo personal (baño y lavadora) para los muebles sanitarios y riego del jardín, con un mínimo tratamiento (filtros de carbón activado) para disminuir el efecto agresivo del jabón. Por

otra parte, es indispensable un nuevo diseño del sistema de tuberías de agua en el hogar, no solo de agua fría y caliente, sino también para el agua residual tratada en casa. De esta forma, se fomentará el ahorro y recirculación del agua en esta nueva cultura del agua (aguacultura).

Huella hídrica. Técnicamente, se puede importar o exportar agua de una ciudad a otra sin el empleo de presas, acueductos o cualquier otra obra hidráulica, mediante el intercambio comercial de productos que han requerido agua para su creación (huella hídrica), *i.e.*, cada producto tiene un contenido de agua virtual. De esta manera, ciudades con gran desarrollo económico, pero con recursos hídricos insuficientes para satisfacer la demanda, utilizan su riqueza económica para obtener productos con alto contenido de agua virtual. El reto consiste en evaluar el intercambio comercial entre ciudades para determinar los volúmenes de agua virtual importados y exportados. Este análisis determinará las políticas que se pueden generar en el comercio y la elaboración de productos para contar con mayores reservas de agua para el abastecimiento a las ciudades.

Aprovechamiento de los escurrimientos de aguas pluviales. En la medida que hay crecimiento demográfico y económico de las ciudades, se incrementa el consumo de agua y, en consecuencia, la generación de un mayor volumen de aguas residuales provenientes de los usos domésticos, industriales, agrícolas y de la lluvia que precipita sobre la ciudad y su cuenca circundante. La mayoría de las grandes ciudades desalojan las aguas pluviales a través de la red de agua residual doméstica (drenaje combinado). Lo que conlleva el riesgo que, en tormentas severas, el agua

puede emerger a la superficie a través de las coladeras y provocar inundaciones de aguas mixtas, muy perjudiciales para la salud humana (contaminantes patógenos, como coliformes fecales, quistes y huevos de parásitos de helminto). El desafío consiste en, además de generar mapas de riesgo de inundaciones urbanas, evitar la incorporación del agua pluvial al drenaje combinado para disminuir el riesgo de inundación. Los conocimientos y análisis en continuar sobre el aumento de recarga natural de acuíferos a través de pozos de absorción, se hacen prioritarios. Paralelamente, la calidad del agua de los escurrimientos de aguas pluviales, resulta imperativo analizarla para evitar contaminación del agua subterránea, a pesar de que los pozos de absorción, a diferencias de los pozos de inyección, el agua de recarga no se pone inmediatamente en contacto directo con agua del acuífero, sino hasta un año después que el agua de recarga haya transitado por la zona no saturada del subsuelo en donde el proceso de filtración natural está activo.

Tratamiento de Agua Residual. Las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), en México, generalmente operan solo a un 50% de su capacidad instalada. El tratamiento consiste en eliminar sustancias nocivas por medio de procesos físico-químicos y biológicos, que le devuelven parcial o totalmente la calidad que tenía antes de ser usada. En todas las PTAR se realiza un tratamiento primario, donde se elimina un gran porcentaje de sólidos en suspensión y materia inorgánica, seguido de la reducción del contenido en materia orgánica, acelerando los procesos biológicos naturales con oxigenación por aireación y, terminando, con desinfección aplicando cloro. En algunas de estas plantas

se efectúa un tratamiento secundario, utilizando el proceso de lodos activados; cuando hay tratamiento terciario, este consiste en coagulación, sedimentación, filtración con arena. El grado de tratamiento del agua residual, *i.e.*, la descontaminación del agua, depende del reúso planeado del agua residual tratada. El principal reto aquí es hacer operar al 100% las PTAR, en donde se confronta la falta de personal técnico, pero, sobre todo, la falta de recursos económicos para la operación. Por lo que se hace necesario realizar estudios económicos para darle mercado al agua residual tratada. De este modo, las PTAR serían autónomas económicamente.

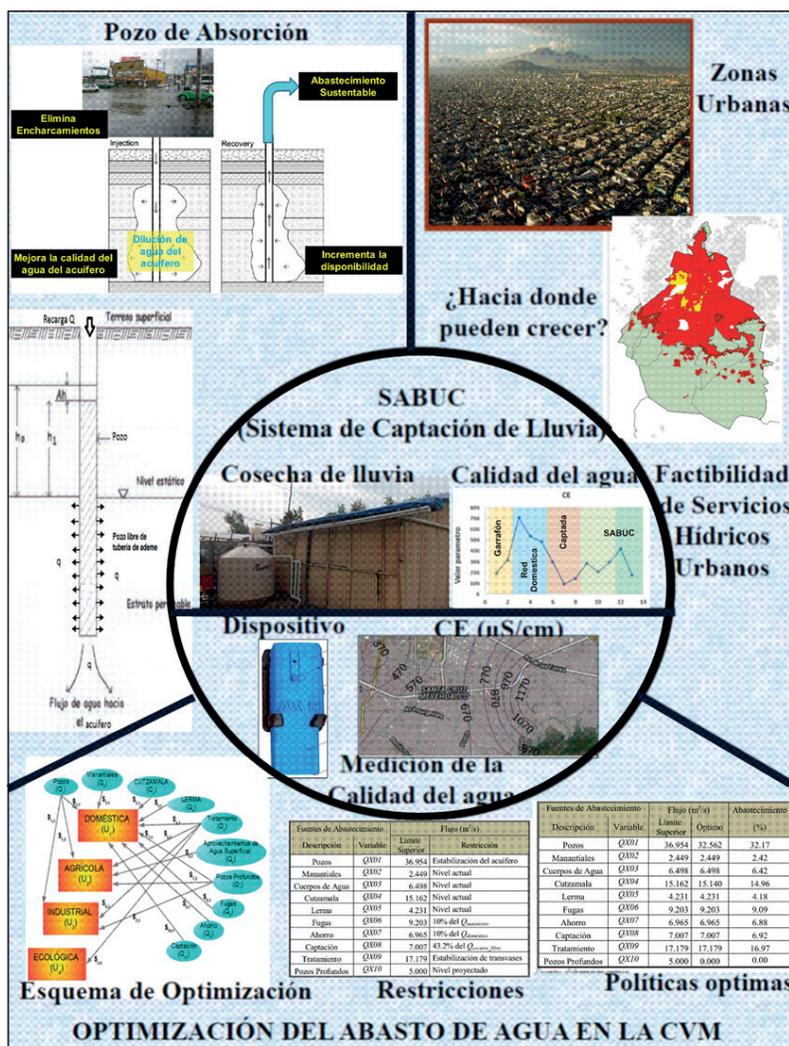
Optimización del abastecimiento de agua en las ciudades. Los problemas de abastecimiento incluyen un complejo sistema de fuentes y conducción que enfrenta fuertes limitaciones. El envejecimiento de la infraestructura, los costos de operación, la falta de inversión en mantenimiento y rehabilitación, así como el deterioro de las fuentes de agua en cantidad y calidad, es en parte lo que ha llevado al sistema de abastecimiento al límite de la operatividad física y económica. Aunado al incremento de la población, la movilidad laboral presente en las zonas metropolitanas, y la migración de las personas del ámbito rural hacia las ciudades, ha generado en gran medida la expansión urbana. El aumento en la demanda de agua impacta de manera negativa y creciente en el balance de las cuencas y los acuíferos locales y vecinos que sirven de fuentes de abastecimiento de agua potable a las ciudades, generando daños económicos y ambientales que ya se muestran dramáticos (Escolero *et al.*, 2016). El desafío consiste en diseñar políticas óptimas del abastecimiento del agua en las ciudades, tomando en cuen-

ta los volúmenes y costos de las fuentes convencionales y no convencionales de abastecimiento y su interrelación con los principales usos del agua, considerando la sustentabilidad del recurso hídrico (por ejemplo, equilibrio de recarga el acuífero vs. extracción de agua subterránea).

5. ¿Cómo ha contribuido la Ingeniería Hidrológica de la UAMI?

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), cuenta con expertos que no solo se preocupan, sino que se ocupan del

tema del agua en sus diferentes ámbitos. En particular, el Departamento de Ingeniería de Procesos de la UAM-Iztapalapa (UAMI), incorpora al GIH que ha aportado conocimiento, a través de proyectos de investigación internos y externos de la institución, del manejo del agua, sobre todo de la Cuenca del Valle de México (CVM). Una descripción breve de los proyectos emblemáticos (Fig. 4) en los que ha participado total y parcialmente el GIH en aportar conocimiento al manejo del agua, se especifica a continuación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Representación esquemática de los proyectos emblemáticos.

Evaluación de la Funcionalidad, Eficacia y Efectividad de la tecnología SABUC (*Solar Air Bubbles, IBC Container, Ultraviolet light and Carbon Filter*) para la cosecha de agua de lluvia y su potencial aprovechamiento en viviendas periurbanas de bajos ingresos. Esta investigación aporta mejoras en gestión de agua sustentable, mediante la implementación de sistemas de cosecha de lluvia, como los instalados en la CDMX para solucionar la falta de agua en algunas zonas de mayor necesidad, con dispositivos que mejoran la calidad del agua captada y dan certeza de su uso habitacional.

Monitoreo del funcionamiento de un pozo de infiltración para incrementar la recarga natural del acuífero en zonas metropolitanas. Los resultados de esta investigación marcan la pauta para perfeccionar la tecnología de recarga artificial de buena calidad en las zonas urbanas; el consenso técnico anterior sobre recarga artificial del acuífero era que solo se podía realizarlo en las laderas de las montañas. Hacer de la recarga artificial del acuífero en la zona urbana de la CDMX una tecnología probada, impacta no solo en la atenuación de los efectos de sobreexplotación, tales como la subsidencia y fracturamiento del terreno, entre otros, sino que también para establecer estrategias más racionales del manejo de los sistemas hídricos subterráneos como para dar tratamiento natural al agua en el subsuelo, y para manejar los acuíferos como vasos de almacenamiento y regulación. Adicionalmente, se aprovecha el agua pluvial y se disminuye la carga al sistema de drenaje.

Factibilidad de Servicios de Agua Potable y Drenaje para el Desarrollo Urbano. Se desarrolló un SIG para la planeación urbana

de la CDMX, que maneja eficientemente la información alfanumérica y geográfica y que permite mantener la vigencia de las áreas de factibilidad hidráulica a través de la actualización de información y adecuaciones a los criterios aplicados. El SIG incorpora una gran cantidad de información urbana, hidráulica y del medio ambiente, para procesarla y determinar la sectorización del territorio con base en la capacidad de la infraestructura hidráulica para el desarrollo urbano, al mismo tiempo asegurará que no se rebasen estas capacidades ni que generen afectaciones en otras áreas del territorio de la CDMX. El aporte de este proyecto de investigación es que ahora la SEDUVI (Secretaría del Desarrollo Urbano y Vivienda) de la CDMX, cuenta con un instrumento de planeación que identifica áreas con factibilidad de los servicios de agua potable y drenaje para el desarrollo de proyectos urbanos en la CDMX, a través de la aplicación de criterios de sustentabilidad hídrica y el aprovechamiento de la infraestructura hidráulica

Sensor Doméstico de Potabilidad del Agua. Se inventó un dispositivo para medir la calidad de agua que se consume en los hogares. Consiste de un sistema central de procesamiento (microcontrolador) que, a partir de una muestra de agua, mide la conductividad eléctrica, la temperatura, la turbidez, el pH y la presencia de coliformes (*Escherichia coli*). Con estos parámetros, el microcontrolador calcula un índice de calidad para avisar al usuario, de manera presencial, si el agua que se está midiendo se puede beber, o de manera remota a todos los usuarios que cuentan con la aplicación *Google Maps*. El impacto esperado con este invento, una vez que esté en el mercado al alcance de todos los ciudadanos, es que se fomentará la nueva aguacultura, creando

un sistema de monitoreo de la calidad del agua en cada ciudad, equivalente al existente de la calidad del aire.

Optimización de operación del sistema hidrológico de la CVM. Se aplicó una herramienta numérica para el diseño de políticas óptimas del abastecimiento del agua en la CVM. Conformada por los volúmenes y costos de las fuentes (pozos, manantiales, trasvases Lerma-Cutzamala, aprovechamientos superficiales, tratamiento, pozos profundos, fugas, ahorro y captación) en conexión con los usos del agua: doméstico, agrícola, industrial y ecológico, considerando la sustentabilidad del recurso hídrico (equilibrio de recarga vs. extracción). Los resultados de esta investigación revelan la capacidad de las fuentes de abastecimiento y la infraestructura hidráulica de la CVM para la gestión y manejo sustentable del agua en la zona metropolitana de la CDMX.

6. ¿Hacia dónde vamos?

El GIH sigue desarrollando investigación que aporta conocimiento al manejo del agua. Se adopta como guía los temas propuestos en el Programa Hidrológico Intergubernamental, antes Programa Hidrológico Internacional, en su Fase IX, sin perder de vista las necesidades nacionales. La gestión del agua y la ingeniería del agua se han centrado en el suministro para la agricultura, industria, navegación y uso doméstico. El uso intensivo del agua, la modificación de las cuencas y el cambio climático han amplificado el carácter estocástico de los procesos hidrológicos, lo que tendrá un impacto negativo en la relación de recursos hídricos per cápita. El reto más importante para la gestión del agua es cómo aumentar la cantidad y calidad de los recursos hídricos y, en paralelo, aumentar la biodiversidad, los

servicios ecosistémicos para la sociedad y la resiliencia a los impactos. Los temas en cuestión se indican a continuación:

- Análisis de los procesos hidrológicos en condiciones de cambio climático no estacionario, para identificar medidas de adaptación y mitigación apropiadas y oportunas en un entorno en constante cambio ambiental.
- Análisis de los procesos hidro-sociales para ampliar el conocimiento de la interacción de los sistemas socio-hídricos en la gestión de los recursos hídricos de las cuencas.
- Enfoques de gobernanza y gestión sostenibles e integrada del agua en cuencas. Involucrando la participación de todos los actores: usuarios del agua, comunidades, instituciones y sector privado; además de considerar aspectos sociales, ambientales, culturales, legales, institucionales, políticos, financieros, equidad, justicia, simpleza de aplicación y, sobre todo, capacidad de evaluación y seguimiento.
- Sensibilización de la nueva aguacultura. Mejorar la capacidad y la sensibilización del público en relación con una cultura y gestión sostenibles del agua, para hacer frente a la escasez de agua.
- Estudios hidrológicos de los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos. Se deben seguir estudiando a nivel local y regional los ríos, lagos, humedales y acuíferos, ya que no solo proporcionan agua potable y mantienen ecosistemas valiosos, también sustentan la agricultura, la energía eléctrica, la mitigación de inundaciones y la prevención de sequías

- Modelación numérica del ciclo hidrológico incluyendo la intervención del hombre. Esto con la finalidad de adquirir una comprensión y un mapeo más completos de la disponibilidad de recursos hídricos y la identificación de las amenazas relacionadas con el agua. La idea es aprovechar el aumento de la potencia computacional, nuevas técnicas de monitoreo espaciales y temporales (telemetría), mejores algoritmos numéricos, nuevas oportunidades para compartir información, fuentes de datos no tradicionales y una mayor cooperación internacional y transdisciplinaria.
- La educación en recursos hídricos sigue siendo la base sobre la que se pueden cambiar los comportamientos y se puede construir un consenso para tomar decisiones sostenibles sobre la gobernanza, gestión y manejo del agua.
- Trascendencias de las redes temáticas del agua. Si bien se han creado redes temáticas del agua, aún no han logrado tener un impacto significativo en las políticas y prácticas educativas del agua.

7. ¿En qué estamos?

El GIH sigue desarrollando investigación sobre la gestión y manejo del agua en grandes ciudades, a saber, atendiendo las temáticas del Programa Hidrológico Inter gubernamental, anteriormente descritas.

- Preparando el estudio de la gobernanza y gestión del agua en la CVM, mediante la aplicación del enfoque del Prisma de la Gobernanza de Cuencas. Se requiere evaluar la gobernanza bajo las políticas hídricas actuales, estipuladas en la LAN, para compararla con las políticas de la

reforma hídrica por implementarse bajo la Ley General del Agua. Se inicia este estudio con la evaluación de índices (sociales, ambientales y económicos) de gestión en los recursos hídricos de la CVM. El uso de índices numéricos en el manejo de los recursos hídricos es indispensable y necesario para convertir grandes volúmenes de datos en información útil, dentro de una escala de medición.

- Realizando la modelación numérica del ciclo hidrológico. En su primera etapa, se busca representar los procesos físicos que suceden en una cuenca, como generación de escurrimiento, precipitación pluvial, evapotranspiración y recarga a los sistemas acuíferos. Algunos modelos numéricos en evaluación son: WEAP21 (<https://www.weap21.org/>) que es un sistema de planificación y evaluación de los recursos hídricos, con amplia gama de conceptos sobre gestión del agua, integración de oferta y demanda, costos financieros, calidad de agua y consideraciones ecológicas, como el requerimiento de caudales ambientales, además de incluir un algoritmo para calcular lluvia-escurrimiento en cuencas; MODFLOW (<https://www.usgs.gov/software/modflow-6-usgs-modular-hydrologic-model>) que simula el flujo de agua subterránea para diferentes condiciones en que se encuentren las capas del acuífero (libre, parcialmente convertible y/o confinado); FREEWAT (<http://www.freewat.eu/>) que es una plataforma dedicada para QGIS (software de SIG) para la planificación y gestión de los recursos de agua superficial y subterránea; PHABSIM (<https://www.usgs.gov/node/279289>) que es un sistema de Simulación de Hábitat Físico, que simula la relación

entre el caudal y el hábitat físico para varios estadios de vida de especies de peces; el modelo Weather Research and Forecasting Model-Hydro (WRF-Hydro) (https://ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro), permite analizar los procesos de flujos de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera.

- Evaluando el manejo de las aguas subterráneas (transvases entre acuíferos) para contar con mayor disponibilidad, durante el estiaje, en áreas de mayor demanda de la zona metropolitana de la CDMX, mediante la implementación de sistemas de recarga-recuperación.
- Realizando análisis de optimización mensual del abastecimiento de agua sustentable en la CVM, aplicando Programación Dinámica.
- Manufacturando industrialmente el dispositivo de medición de calidad del agua para uso público, con la finalidad de promover una cultura de medición y vigilancia de la calidad de agua que se consume en los hogares.
- Continuar la formación de especialistas en agua, tanto a nivel licenciatura, a través del programa académico de Ingeniería Hidrológica, como a nivel posgrado, ya sea la Especialización en Economía y Gestión del Agua (EEGA) o bien el Posgrado en Energía y Medio Ambiente (PEMA).

Referencias

Armas Vargas, F., Nava, L.F., Escolero, O., Gómez Reyes, E., Sandoval Solis, S. *Watershed Sustainability: An Integrated River Basin Perspective*. In: The Palgrave Encyclopedia of Urban and Regional Futures. Palgrave Macmillan, Cham.

Armas Vargas, F., Escolero, O., Sandoval Solis, S., Nava, L.F., Mazari Hiriart, M., Rojas Serna, C., López-Corona, O., A Quantitative Approach to the Watershed Governance Prism: The Duero River Basin, Mexico. *Water*, 15[4], 743, pp 1-26, 2023.

De Miguel A., Lado, J.J., Martínez, V., Leal, M., y García, R., El Ciclo Hidrológico: Experiencias Prácticas para su Comprensión. *Ense. Cien. Tie.*, [17.1], pp. 78-85, 2009.

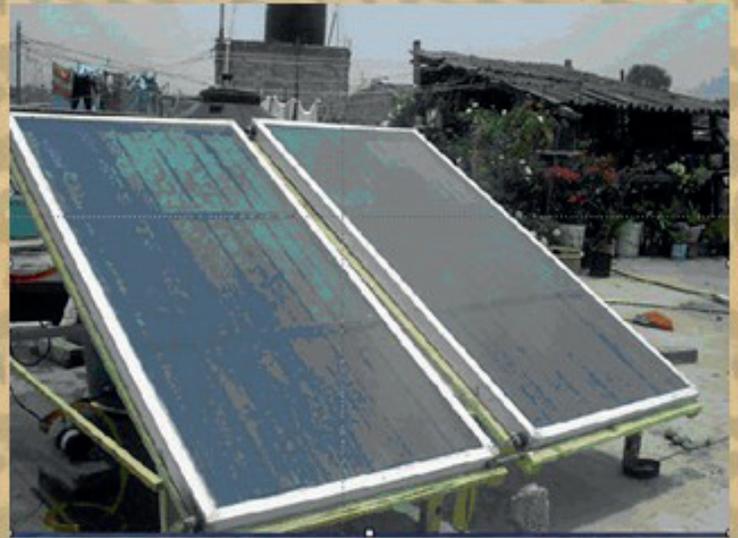
Escolero O., Kralisch, S., Martínez, S.E., y Perevochtchikova, M., Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 68[3], pp. 409-427, 2016.

Estadísticas del Agua en México, Edición 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, CONAGUA, México, 2018.

FAO. *El riego en América del Sur, Centroamérica y Caribe en cifras [Irrigation in South America, Central America and the Caribbean in numbers]*. Encuesta AQUASTAT 2015. Rome, FAO. (In Spanish), 2016.

Sosa-Rodríguez, F.S., Castro-Ruiz, J.L., y Sotelo-Núñez, E.I., *La implementación del modelo de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en las subregiones de estudio y sus retos en materia institucional y legal*. En: Aguilar-Benítez I. (Coordinador), *La Gestión de los Usos del Agua en Tres Subregiones Hidrológicas: Río San Juan, Valle de México y Bajo Grijalva*. Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte, pp. 284-321, 2020.

Estimación del tiempo de duración de reservas probadas de energía fósil y potencial de la energía solar



*Enrique Barrera Calva
Rodolfo Vázquez Rodríguez
Germán López Pacheco
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos,
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa
Víctor Manuel Rentería Tapia
Centro Universitario de los Valles
Universidad de Guadalajara*



Abstract

This analysis shows the proven and probable reserves of conventional energy as well as their probable duration times for a consumption that tends to grow over time. The magnitude of the energy resource is contrasted with what would be obtained if man massively used solar energy sources, and the duration of these resources is inferred in comparison with that of conventional resources. From this scenario, notable differences can be seen, so the development of solar energy technologies is an important incentive, which is why the study and constant promotion of them will allow in the short term a real energy transition that society deserves. An example is the so-called agrivoltaics technology, which is in the process of optimization, which allows, on the one hand, the generation of electricity and on the other, in the same area of land, to carry out agricultural or livestock production. This will make it easier to find a shorter payback period, which will lead to a lower leveled cost of energy for these alternatives.

Keywords: Duration time of conventional and renewable energy, proven reserve, potential of solar energy.

Resumen

En este análisis se muestran las reservas probadas y probables de energía convencional, así como sus tiempos probables de duración para un consumo que tiende a crecer con el tiempo. Se contrasta la magnitud del recurso energético con el que se obtendría si el hombre usara masivamente las fuentes de energía solar, y se infiere el tiempo de duración de esos recursos en comparación con el de los recursos convencionales. De ese escenario, se aprecian notables diferencias, por lo que el desarrollo

de las tecnologías energéticas renovables es un aliciente importante, por ello el estudio e impulso constante de ellas permitirán a corto plazo una real transición energética que la sociedad merece. Un ejemplo es la llamada tecnología agro-voltaica, que está en proceso de optimización, que permite, por un lado, la generación de electricidad y en la misma área de suelo, permite realizar cierta producción agrícola. Ello hará más fácil encontrar, un menor periodo de recuperación de la inversión, que conducirá a un más bajo costo nivelado de la energía de estas alternativas.

Palabras clave: Tiempo de duración de energía convencional y renovable, reserva probada, potencial de la energía solar.

1) Introducción

En las últimas décadas, un alto porcentaje de la población mundial más vulnerable ha incrementado sus estándares de vida emulando el de las naciones desarrolladas. Sin embargo, los cambios profundos que implica este incremento podrían no ser sustentables, sobre todo si tales sociedades continúan con su actual ruta de crecimiento. El desarrollo sustentable y sostenible es tal vez, el reto a escala global de mayor relevancia del siglo XXI. Al mismo tiempo, es una gran oportunidad para que los estudiosos de la ciencia e ingeniería busquen y aporten soluciones a los grandes desafíos que enfrenta la humanidad. Muchos de los desafíos que enfrenta la humanidad, están vinculados, sin embargo, en este artículo nos concentraremos en describir parte de la problemática en el tema energético intentándolo separar del resto de los otros desafíos, para fines de simplificación. En este trabajo, se manejan a propósito diversas unidades energéticas con el fin de que los lectores se familiaricen con esta gran

diversidad de términos utilizadas en este argot específico, que no se apega a las sugerencias del SI (Sistema Internacional) de unidades. Las sociedades modernas están caracterizadas por un consumo substancial de combustibles nucleares y fósiles para mantener en operación la infraestructura de la cual dependen. Hoy también, la demanda global de energía, 2 % (World Economic Forum, 2023), suele crecer aún más rápido que las tasas de crecimiento poblacional, 0.8 % (Grupo Banco Mundial, crecimiento de la población (%) anual. Se prevé, que la demanda creciente de energía de los países en desarrollo exacerbará aún más esta situación, El consumo energético mundial total en 2023 fue de 604.04 EJ (= 6.04 x 10²⁰ J) o (167 789 TWh), considerando las distintas fuentes de energía, entre las que destaca la correspondiente a la combustión de combustibles fósiles. Eso equivale a una potencia media de 16 TW. La actual utilización mundial de energía es de alrededor de una potencia media de 23 TW y se estima que, para finales del siglo XXI, podría alcanzar los 50 TW, (International Energy Agency, 2020). Aun a la fecha, casi el 80% de la energía mundial proviene de los combustibles fósiles (World Economic Forum, 2023); sin embargo, la conocida problemática del incremento de los gases de efecto de invernadero sobre nuestro medio ambiente, ocasionada por la combustión de los combustibles fósiles, está presionando a un alejamiento de estos combustibles a otras fuentes de energía renovable (International Energy Agency, 2020). Se sabe que, la siguiente generación de energía nuclear continuará ofreciendo no solo bajos costos de producción eléctrica, aunado al hecho de que es una fuente energética con una carga base libre de carbono. El inconveniente son la limitada cantidad de recursos y los riesgos de gra-

ves accidentes que podrían afectar el medio ambiente y la salud de los seres humanos, recordar el caso de Fukushima. Por ello, la base energética del futuro debe ser una combinación de tecnologías, basada en renovables (Barrera et. al, 2021).

Algunos de los efectos negativos del uso de la energía son:

- Degradación del medio ambiente.
- Alteración de la calidad del aire, agua y suelo en los ecosistemas a una escala local y regional.
- Efectos adversos en la salud de la población: Enfermedades respiratorias a corto plazo que traen como consecuencia una disminución de la calidad de la vida y de la vida promedio de los individuos.
- La acumulación de las emisiones gaseosas en la atmósfera, principalmente dióxido de carbono, proveniente de la generación y consumo de energía. Un cambio en el clima del planeta es sinónimo de catástrofes a nivel global.

2) Sociedades después de la revolución industrial

Antes de la revolución industrial, el combustible favorito de las sociedades era la madera, después de la revolución industrial grandes cantidades de energía fueron disponibles con el uso del carbón y más tarde los hidrocarburos. Así, se incrementó la productividad en la agricultura y la población en ciudades. El desarrollo de otros procesos de manufactura y comercio se concentraron en las nacientes urbes. La contaminación del aire en ciudades es una consecuencia del quemado de combus-

tibles fósiles. La contaminación del aire “viaja” y se extiende más allá de una ciudad en particular, pudiendo cruzar hasta fronteras entre países. Las demandas de energía se apegan a algunos modelos de crecimiento, conocidos entre los investigadores, no así en el grueso de la sociedad, basado en su sencillez, es por ello, que brevemente lo mencionamos, (International Energy Agency, 2020; Barrera et. al, 2021).

3) Modelo exponencial de crecimiento energético

El modelo exponencial es un modelo utilizado en temas de demografía, ecología y energía entre otros, para modelar el crecimiento de las poblaciones o bien el crecimiento de consumo energético en una población, (Barrera et. al, 2021). Aplicando al caso de consumo energético, tenemos que:

Sea $P(t)$ la cantidad de energía demandada al tiempo t , el modelo exponencial supone que la tasa de aumento de la energía demandada, P , es proporcional a la energía demandada en el instante, t .

$$\frac{dP}{dt} = kP(t) \quad (1)$$

Aquí, k es la tasa de crecimiento (%) en base anual, expresada como fracción, (tiempo⁻¹).

Si la cantidad de energía demandada en un instante t_0 es P_0 , el modelo exponencial predice que en cualquier otro instante futuro ($t > t_0$) la demanda de energía viene dada por la solución de la ecuación diferencial (1), resultando en

$$P(t) = P_0 e^{kt} \quad (2)$$

Con una ecuación del tipo (2) y el conoci-

miento de las tendencias de crecimiento del consumo de energía que supondría conocer el valor de k , es posible estimar el aumento del consumo energético en un año deseado, $P(t)$. Como ejemplo tenemos que los valores típicos de k (%), tasa de crecimiento de consumo energético para carbón anual es, 0.8 %, de gas natural, 2.45 %, petróleo, 1.1 %, nuclear 2.2 %, hidroelectricidad 2.1 % y otras renovables (solar, viento) 13 %, (Grupo Banco Mundial 2023). Hoy en día, y basado en el hecho de que se tiene una buena estimación de las reservas energéticas convencionales y no convencionales, junto con el conocimiento de un modelo de consumo energético, que suele ser de tipo exponencial, y que postulamos, permite la estimación de tiempo de agotamiento de los recursos, donde el factor clave suele ser, el conocimiento de la tasa de consumo anual de los energéticos, k (%).

4) Tiempo de duración, o tiempo de extinción T_e (años), de una reserva energética, R en Exajoules (EJ)

Para conocer el consumo energético total, C (EJ), a lo largo del tiempo, de un recurso hasta su agotamiento, se suele integrar la ecuación (2), desde $t = 0$ hasta un tiempo de extinción, $t = T_e$, según la ecuación (3)

$$C \text{ (EJ)} = \int_0^{T_e} P(t) dt = \int_0^{T_e} P_0 e^{kt} dt \quad (3)$$

Integrando entre límites la ecuación (3) se transforma en

$$C = \frac{P_0}{k} [e^{kT_e} - 1] \quad (4)$$

Cuando se conoce el tamaño de la reserva energética, R (EJ), se puede determinar el tiempo de extinción de esta, T_e , por igualación de C (EJ) con R (EJ), C (EJ) = R (EJ), en la ecuación (4), se puede resolver para el

tiempo de extinción del recurso, T_e , con lo que se encuentra la ecuación (5), con la que se puede determinar la duración de una reserva energética dada, que se consume a una tasa anual, P_0 determinada, y que puede crecer a una tasa de crecimiento, k .

$$T_e = \left(\frac{1}{k}\right) \ln \left[\frac{kR}{P_0} + 1 \right] \quad (5)$$

La ecuación (5), suele ser la ecuación resultante que nos da el tiempo de duración del recurso, T_e , para una reserva energética del combustible dado, R (EJ) y consumido a una tasa anual, P_0 , pero que experimenta una tasa de crecimiento de un porcentaje definido, k . Las reservas probadas de petróleo a finales de 2019 alcanzaron los 1652.6 billones de barriles, suficientes para satisfacer hasta por 54.2 años las demandas actuales, a una tasa fija de consumo, P_0 , (International Energy Agency, 2020). En la Tabla 1, se muestra inicialmente, los valores de las reservas, R (EJ), típicos para tres diferentes energéticos convencionales, así como la estimación de la tasa de consumo anual, P_0 , necesarios para determinar el tiempo de duración de los energéticos, T_e , ecuación (5),

Con los datos de la Tabla 1 y para cada energético considerado, se puede estimar el tiempo de duración de la reserva probada consumida a una tasa fija anual, P_0 . Para ello se deben aplicar factores de

conversión energéticos apropiados, con los que las diversas cantidades energéticas se transforman a una base común en EJ. Una vez convertidos los términos energéticos a una base homogénea, se evalúa el cociente R/P_0 , Tabla 2, con lo que se conoce el tiempo de duración de una reserva de un energético dado. Se observa de esta tabla que, dadas las altas reservas probadas de carbón, hay energético para alrededor de 170 años, siempre que se siga consumiendo este energético a una tasa fija de 140 EJ/año.

Si la tasa de consumo anual de cada energético tiende a crecer con el tiempo, k (%), y de acuerdo con el modelo exponencial, se pueden estimar nuevos tiempos de duración de la reserva, con base a la ecuación (5). Para el caso del gas y aun del petróleo, los años con los que se podría contar con estos recursos son notablemente menores, en el caso de petróleo, hay energía con este recurso solo para alrededor de 44 años, siempre que la tasa de consumo siga en el orden de los 180 EJ/año. Esto sabemos no es posible y se debe considerar una índice o tasa de crecimiento, k , del recurso que puede variar entre el 1 % hasta el 5 %, ($k = 0.01$ hasta $k = 0.05$), dependiendo del recurso considerado. Para los fines del presente trabajo, se dejan fijos los valores de consumo energético anual típico, Tabla 2. Si se proponen diferentes valores de la tasa de crecimiento

Energético	R	P_0 (EJ/año)
Carbón	1055 mil millones de toneladas	140
Petróleo	1663169 millones de Barriles de Petróleo equivalente	180
Gas	193.9 trillones de m ³	120

Tabla 1. Valores de las reservas probadas, R (unidades de energía diferentes), de tres diferentes recursos energéticos convencionales, y la velocidad de uso anual de cada energético considerado, P_0 . Datos al 2019 (International Energy Agency, 2020).

k , entre 1 % y 3 %, es decir un poco arriba y un poco abajo del valor medio, normalmente conocido para cada energético, con base en los que se encuentran escenarios tanto pesimista como optimista de la duración de los recursos energéticos analizados, ver Figura 1 y resumidos en la Tabla 3. (International Energy Agency, 2020).

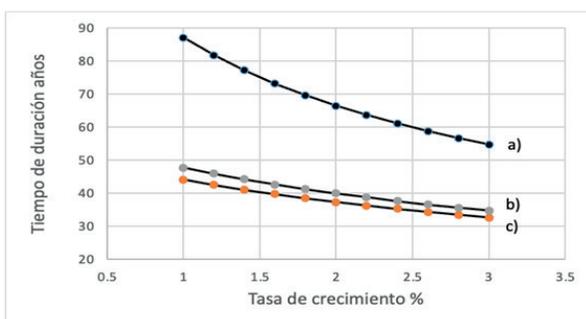


Fig. 1 Tiempo de duración años de reserva de recursos como función de la tasa de crecimiento o demanda en porcentaje, a) carbón, b) petróleo y c) gas.

Observando la Figura 1 y los resultados en Tabla 3, es fácil distinguir que la vida media de los recursos energéticos con tasas de crecimiento exponencial oscila entre; 100 años - 50 años para carbono, 45 años - 30 años para gas y 38 años - 25 años para gas. En el caso pesimista, de una gran tasa de crecimiento de anual de uso de la energía convencional, se observa una relativa vida corta del recurso,

Energético	R (EJ)	P_0 (EJ/año)	k (%)	R/P_0 Años
Carbón	24012	140	0.8	90.8
Petróleo	7895	180	1.1	35.8
Gas	7048	120	2.45	27.5

Tabla 3. Tiempo de duración de reservas probadas actuales de recursos energéticos R (EJ) para tres diferentes recursos convencionales, y la velocidad de uso anual de cada energético considerado, P_0 , que incrementa con el tiempo, con base a la consideración de tomar en cuenta una tasa de crecimiento del consumo, k (%) típico de nuestro actual consumo energético. (International Energy Agency, 2020).

que requiere una extraordinaria atención por parte de usuarios y planificadores energéticos. De concientizar a la sociedad y buscar a toda costa ahorros energéticos sustanciales, la vida media de las reservas energéticas pueden crecer notoriamente y tener más tiempo con energéticos convencionales que más bien sufrirán los embates y presiones de las variables ambientales ya que rápidamente están creciendo los niveles de CO_2 en la atmósfera. Mucho hay por hacer.

Energético	R (EJ)	P_0 (EJ/año)	R/P_0 Años
Carbón	24012	140	171.5
Petróleo	7895	180	43.8
Gas	7048	120	58.7

Tabla 2. Valores de las reservas probadas actuales, R (EJ) Tabla 1, convertida a Exajoul para los tres principales recursos energéticos convencionales, y la velocidad de uso anual de cada energético considerado, P_0 , con base en los que se calcula el tiempo de uso de tales reservas, (International Energy Agency, 2020).

5) Recurso Solar

En general, los sistemas de energía renovable persiguen el aprovechamiento de las energías del medio ambiente en lugar del consumo de los combustibles minerales (carbón, petróleo, nuclear y gas). La

fuentes más grandes de energía renovable, sin duda es la energía solar. El sol es una fuente impresionante de energía radiante que emite energía como un cuerpo negro radiando energía, en toda su superficie según la ecuación de Stefan Boltzmann, ecuación (6), como función de la temperatura media de la superficie del sol que está a una temperatura aproximada absoluta de 5776 K. Así pues, dado el diámetro y la temperatura efectiva de la superficie del sol, se puede estimar la llamada constante solar, C_s , 1367 W/m² que es la energía del sol, por unidad de tiempo, recibida sobre una unidad de área de la superficie terrestre. Estimaremos, la velocidad a la que el sol emite energía radiante E_s , o potencia por unidad de área,

$$E_s = \sigma AT_s^4 \quad (6)$$

Aquí $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴ y es la constante de Stefan-Boltzmann, A es área de la superficie del sol y T_s la temperatura absoluta de la superficie del sol, (K). En la Figura 2 se muestra esquemáticamente la geometría de las relaciones sol-tierra, necesarias para apreciar los niveles de incidencia solar recibida en nuestro planeta. La excentricidad de la órbita terrestre es tal que la distancia entre el sol y la tierra varía alrededor de 1.7 %. A una distancia de 1.495×10^{11} m, la distancia media tierra sol, se le denomina una unidad astronómica, lo cual lleva a apreciar que, visto desde la tierra, el sol subtende un ángulo de 32'. La radiación emitida por el sol y sus relaciones espaciales a la tierra, resultan aproximadamente en una intensidad fija de radiación solar fuera de la atmósfera de la tierra, perpendicular a la dirección de la propagación de la radiación, a una distancia media sol-tierra, denominada la constante solar, C_s .

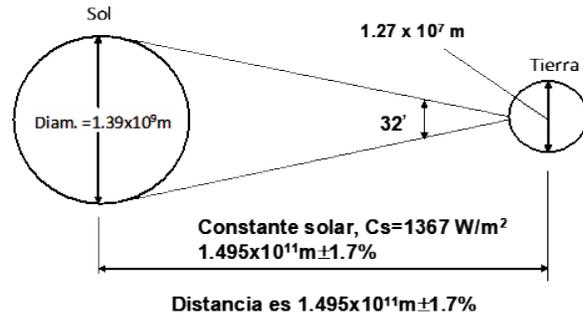


Fig. 2. Geometría de las relaciones sol-tierra, de donde se estima la constante solar y con ello los niveles de irradiación solar incidente en la tierra.

Para calcular la constante solar basta con dividir el flujo energético que emite el sol, E_s , por la relación de áreas entre la superficie del Sol (con radio solar conocido, r_s) y la de una esfera situada a la distancia media tierra sol, r_{ts} del mismo. Para obtener este valor, que en la práctica está medido por satélites, se debe usar como la temperatura efectiva del sol $T_s = 5776$ K.

$$C_s = \sigma T_s^4 (r_s / r_{ts})^2 = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (7)$$

En general esta potencia emisiva por unidad de área es detectable en todo el sistema planetario y en cada caso, su valor es inversamente proporcional según la distancia media entre el sol y cada planeta; Sol - Tierra, 1 ua = 150000000 km, Sol - Mercurio, 0.39 ua, Sol - Venus, 0.72 ua, Sol-marte, 1.5 ua, donde ua es la llamada unidad astronómica. Dado que la mitad del hemisferio terrestre permanentemente esta de cara al sol, y estimando que la radiación solar incidente se atenúa hasta por un orden de magnitud cercano al 35 %, es fácil evaluar el flujo energético solar instantáneo que llega constantemente a la tierra, $E_s = 0.06$ EW, considerando a un círculo como el área proyectada de un semi hemisferio, con un círculo de diámetro equivalente al diámetro de la tierra.

$$E_s = 0.35 \cdot C_s \cdot \pi \cdot \frac{Dt^2}{4} = 0.06 \times 10^{18} \text{ W} = 0.06 \text{ EW} \quad (8)$$

La potencia recibida se puede expresar como energía en base anual, la cual sería del orden de 1890000 EJ/a.

$$E_s = 0.06 \text{ EW} \left(\frac{10^{18} \text{ J}}{\text{EW} \cdot \text{s}} \right) \left(\frac{\text{EJ}}{10^{18}} \right) \left(\frac{86400 \text{ s}}{\text{d}} \right) \left(\frac{365 \text{ d}}{\text{a}} \right) = 1890000 \text{ EJ/a} \quad (9)$$

Este potencial energético de la energía solar que cae sobre nosotros en tan solo un año es enorme. Al compararlo con el total de la reserva energética en combustibles fósiles que suma alrededor del orden de los 40000 EJ. Así el cociente del potencial solar en un año al total de la reserva de fósiles alcanza del orden de 40 veces más, lo cual significa que el recurso solar incidente en un año sobre la Tierra es varias veces más que todo el potencial de energía a base de combustibles fósiles acumulados en la Tierra por millones de años y que según las tendencias se agotarían juntos en un tiempo cercano a un poco más de un siglo, ver Tablas 2 y 3. En las Tablas 4 y 5 se muestra un resumen de los metros cuadrados de instalaciones solares materializados como colectores solares térmicos y también fotovoltaicos de diversas tecnologías. Con base en la población de algunos países, se estima para algunos países representativos, por ejemplo, en la Tabla 4, el área de colectores solares (m^2) utilizado por cada 1000 habitantes. Algunos países aun con poco potencial solar, pero más potencial económico, cuentan con una mayor área que los países más pobres, que a pesar de contar con más potencial solar (más de 5 KWh/día) pero deficiencias económicas, no alcanzan una alta tasa, como se muestra en la Tabla 4. Para un potencial en energía solar sustentable, estimado por especialistas, (Barrera et. al, 2021) es posible estimar el

potencial neto que la sociedad podría disponer en el corto o mediano plazo en el uso de estas tecnologías con esta energía, lo cual aún es muy distante de lo que se cuenta a la fecha. Mucho hay por hacer, ello implica inversiones en estas tecnologías, aunque la transición debe ser suave y tersa para evitar descalabros indeseados en esa materia de proceder de manera abrupta y no mesurada, así que la clave es un estudio serio y multidisciplinar, para impactar de manera favorable en esa transición. La brecha según las estimaciones de la Tabla 5 muestran que, llegado el momento de contar con los recursos materiales, la mano de obra y la infraestructura secundaria y los recursos tecnológicos apropiados, la energía solar y eólica superan a la fecha toda la capacidad de demanda energética de la actualidad en varios órdenes de magnitud. Si la única aportación fuera a base de energía solar y aun la energía eólica sería capaz de cubrir todas nuestras necesidades energéticas si lográramos utilizar el potencial eólico sustentable de la actualidad, que podría verse incrementado en el futuro con el avance tecnológico de la sociedad que es dinámico y creciente en el tiempo.

6) El mercado de calentamiento solar

El mercado de calentamiento solar se suele evaluar bajo diversos indicadores comparativos anuales por diversas dependencias especializadas, como por ejemplo la Agencia internacional de Energía, IEA. (Weiss and Spörk, 2022) son:

- 1 - Área de colectores instalada acumulada en varios países, en metros cuadrados – m^2 ;
- 2 - Área colectora instalada acumulada per cápita, al tomar en cuenta la población del país, determinada en metros cuadrados por mil habitantes – $\text{m}^2/1.000$ habitantes

País	Colec. Solares de agua (m ²)	Colec. Solares de aire (m ²)	Total (m ²)	Población	(m ²)/1000 h
Australia	9216000	382800	9588800	24800000	386
Austria	5032603	4678	5123303	8800000	582
China	482310000	10000	482320000	1409670000	342
Alemania	19823590	20800	19844390	82300000	241
México	4324217	9525	4333742	130800000	33
Turquía	25137636	9970	25147606	81900000	307
España	4310823	4500	4315323	46400000	93
USA	25570816	191382	25812198	326800000	78
Total	688512786	1548144	690060930	7633000000	90

Tabla 4. Total de área en (m²) de colectores solares instalados para algunos países representativos y estimación de los m² por mil habitantes de esos países y del promedio mundial (Weiss and Spörk, 2022).

3 - Potencia instalada acumulada de colectores solares determinada en MW_t, MW_e.

7) Otros indicadores energético-ambientales

Algunos otros indicadores energéticos/ambientales relevantes en temas de energía solar y convencional que ayudan a validar aún más la fortaleza de las energías renovables sobre las convencionales en México son las siguientes (Weiss and Spörk, 2022), (Barrera et al., 2021).

a) Equivalencia diaria en términos de área colector a energía térmica, 1 m² colector solar térmico = 0.7 KW_t.

b) Equivalencia diaria en términos de área colector a energía eléctrica, 1 m² colector solar fotovoltaico = 0.2 KW_e.

c) 1 m² de colector solar térmico evita 1 tonelada de CO₂ por año.

Con base en esos indicadores energéticos y ambientales se pueden calcular y estimar la faceta ambiental del potencial de las tecnologías solares. Por ejemplo, es común la estimación del nivel de gases de efecto invernadero (CO₂) no emitido por cada KWh térmico generado por tecnología energética convencional, así como el nivel de no emisión de los mismos gases

Fuente de energía	Potencial neto con atenuación (EJ/año)	Potencial Sustentable (EJ/año)	Potencial Sust./Consumo Mundial (690 EJ)
Solar	1890000	3780 (0.2% de potencial)	5.3
Viento	53792	1075 (2% de potencial)	1.5

Tabla 5. Estimaciones energéticas a partir del recurso solar y eólico bruto y estimación de un potencial sustentable (con base a una propuesta de porcentaje sustentable del total del potencial de energía). La última columna, es el número de veces que el potencial renovable de un año supera al potencial de energía convencional como reserva probada total.

Indicador estimado	Solar térmica	Solar fotovoltaica
Sistemas instalados en mundo	690 millones de m ²	3570 millones de m ²
Aprovechamiento de Energía por m ²	0.7 KW _t = 1 m ²	0.2 KW _e = 1 m ²
Potencia nominal instalada	481.5 GW _t	713970 MW _e
Ahorro de CO ₂ por KWh generado	1 Ton de CO ₂ /m ² -año	0.5 Kg de CO ₂ por KWh
Ahorro total de CO ₂ Ton/año	690 millones toneladas	1042 millones de toneladas

Tabla 6. Indicadores para estimar algunas cifras energético / ambientales, (Weiss and Spörk, 2022).

por cada KWh eléctrico solar generado. Citamos a continuación algunos resultados con los cuales es posible estimar algunas cifras energético/ambientales que hacen más entendible el acercamiento de la tecnología de energías renovables con la sociedad, Tabla 6.

Se observa de la Tabla 6 que el número de m² de colectores solares fotovoltaicos es superior (más de 5 veces) a los metros cuadrados de colectores solares térmicos para el 2022, sin embargo, esa cifra se moverá dependiendo de los intereses de los países y ello repercutirá en las cifras a nivel mundial con el paso de los años y de los compromisos que cada país emprenda en estos temas de sustentabilidad. Para esa fecha, de las estimaciones calculadas, se ve que la disminución de gases de efecto invernadero por la generación eléctrica a través de energía solar, era casi el doble que la de la generación de energía térmica a nivel mundial. Con el paso de los años, se puede ver modificado con base a los compromisos de cada nación establezca con los criterios ambientales, pero también al avance de las tecnologías en energía renovable.

8) Conclusiones

Es sorprendente y enorme el potencial de

energía solar que incide en el globo terrestre y que supera las reservas probadas y probables de energía no renovable. México con un enorme territorio y gran potencial de recursos de energía solar (5 KWh/m²-día) tiene una enorme posibilidad para desarrollar más proyectos en energía fototérmicos y fotovoltaicos para incrementar sus proyectos en esta materia e incrementar su superficie colectora de 33 m²/1000 habitantes a un orden de magnitud del orden de 10 veces más que son cifras de países más avanzados en esta materia. Lograr mejorar la tecnología solar, harán más viable poder alcanzar su uso más intenso, con base en lo cual se podrá aspirar a pensar en alcanzar un mejor futuro energético del hombre. Este deseo implica que la humanidad mejore su manejo de las leyes de la mecánica cuántica, de la síntesis y caracterización avanzada de materiales y nanomateriales, así como de nuevos y mejores procesos tecnológicos, que harán viable el aprovechamiento de la energía solar de manera masiva y más eficiente.

Referencias.

- E. Barrera Calva, F. González, C. Hernández Pérez, L. Huerta y V. Rentería, Revista Maderas y Bosques, Poder calorífico de maderas de zonas áridas, 27(3), 2021.

- H. Ramírez-Murillo, et al, Estimación del potencial energético fotovoltaico y eólico mediante agrupamiento no supervisado por k-medias, 34 (2), Información tecnológica, 2023.
- Max Roser, Cartogram showing the distribution of the world population by representing it through 15,266 squares, each representing half a million people, (2018). <https://ourworldindata.org/world-population-cartogram>. Recuperado 23 enero 2024.
- Grupo Banco Mundial, Crecimiento de la población (%) anual, (2023). <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.GROW>. Recuperado 23 mayo 2024.
- W. Weiss, M. Spörk-Dür, Solar heat worldwide, Federal Ministry Republic of Austria, International Energy Agency, 2022.
- IEA, International Energy Agency, Data and statistics, (2020). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2020>. Recuperado 22 diciembre 2023.
- World Economic Forum, Asi ganan terreno las energías renovables frente al petróleo en Norteamérica, (2023). <https://es.weforum.org/agenda/2023/11/las-energias-renovables-ganan-terreno-a-los-combustibles-fosiles-en-norteamerica/>. Recuperado 10 mayo 2024.

Termovalorización de desechos municipales en reactores químicos



Fanny Ingrid Marín Trujillo^a

Luis Ángel Santamaría Padilla^b

Lisette Samarti Rios^a

Sebastián Alexander Andrade Becerra^b

Luis Álvarez-Icaza Longoria^b

Jesús Álvarez Calderón^a

^a**División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI),
Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa.**

^b**Instituto de Ingeniería, UNAM**

Resumen

Se reseña el proceso de termovalorización de desechos agrícolas y municipales para la generación de energía útil en reactores químicos de carbonización y gasificación, con perspectiva que incluye: (i) el contexto nacional e internacional, (ii) la recientemente arrancada planta de termovalorización de la Cd. De México y (ii) el conocimiento asimilado y generado en la investigación en ciencias de la ingeniería de un grupo interdisciplinario de estudiantes y profesores de posgrados en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y en Ingeniería Eléctrica-Control de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Palabras claves: reactores químicos, carbonización, gasificación, dinámica no lineal.

Abstract

The thermal valorization process of agricultural and municipal waste for the generation of useful energy in carbonization and gasification chemical reactors is reviewed, with a perspective that includes: (i) the national and international context, (ii) the recently started thermal valorization plant in Mexico City, and (ii) the knowledge assimilated and generated in the research in engineering sciences of an interdisciplinary group of students and professors of graduate programs in Chemical Engineering from the Autonomous Metropolitan University (UAM) and in Electrical Engineering-Control from the National Autonomous University of Mexico (UNAM).

Keywords: chemical reactors, carbonization, gasification, nonlinear dynamics.

Introducción

Los retos ambientales, económicos y sociales que enfrenta la sociedad, han motivado el diseño o rediseño de tecnologías para la termovalorización energética de biomasa (desechos agrícolas y municipales). La termovalorización se lleva a cabo en plantas industriales donde la biomasa se transforma en combustible sólido o gaseoso con contenido energético utilizable.

Las plantas termovalorizadoras son de dos tipos: (i) de **carbonización hidrotermal**, donde mediante una reacción química de pirólisis (rompimiento térmico de moléculas) se produce carbón vegetal sólido, denominado hidrocarbón, como combustible y (ii) **de gasificación**, donde mediante reacciones químicas de pirólisis, combustión y reducción, se produce un combustible gaseoso, denominado gas de síntesis, compuesto mayormente por monóxido de carbón, metano e hidrógeno.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de una planta termovalorizadora, similar a la que recientemente se ha inaugurado en la Ciudad de México (Boletín CDMX, 2023). Esta planta cuenta con: (i) un reactor de carbonización que convierte la basura orgánica en carbón vegetal que se envía a una carboeléctrica y (ii) un reactor de gasificación que convierte los desechos de poda de árboles y jardinería en gas combustible que se utiliza para calentamiento del reactor de carbonización y generación de energía eléctrica.

Según la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Boletín CFE-BP224/21f publicado el 17 de noviembre de 2021): (i) en México, el 6.87% de la energía se generó a partir de combustibles fósiles (carbón y petróleo), mientras que en China esta cifra fue del

obtener la tortilla completamente cocida. En el caso microindustrial, por un extremo se alimentan los discos de harina húmeda a un horno de manera continua y mediante una banda transportadora salen las tortillas completamente cocidas en la banda.

En el reactor de termovalorización tipo **lote**, se cargan los materiales, reaccionan durante un tiempo predeterminado y se descarga la mezcla con el producto de interés. Al procedimiento repetitivo de carga, reacción, descarga y limpieza se le denomina producción intermitente en horizonte lote-a-lote. La operación por lote es un transitorio sostenido (siempre en cambio) no tiene punto de equilibrio sino punto terminal. En el reactor **continuo** los reactivos ingresan en la corriente de alimentación, reaccionan en el tanque y se produce una corriente efluente con el producto de interés. La operación en continuo ocurre en la vecindad de un punto de equilibrio. La conversión del reactor lote la determina la duración del lote y la del reactor continuo la determina el tiempo de residencia (el cociente del volumen a flujo de alimentación). Los reactores lote o continuo de termovalorización requieren intercambio de calor para regular la temperatura.

Modelado

Un modelo es una descripción matemática (mediante ecuaciones) del comportamiento de un fenómeno físico en general y un proceso químico en particular. Los hay de dos tipos: los empíricos y los de primeros principios (también denominados *Ab initio*). Los empíricos se construyen correlacionando directamente causas y efectos en base a observaciones o determinaciones experimentales. Los modelos de primeros principios, debidamente validados con datos experimentales: (i) se construyen

en base a leyes fundamentales de conservación de materia y energía, transporte (masa, calor y cantidad de movimiento) y cinética química, (ii) tienen mayor capacidad de descripción-explicación a diferentes escalas y condiciones de operación y (iii) permiten diseños y rediseños de procesos más sistemáticos y eficientes.

El valor de una tecnología industrial depende en buena medida del tipo de modelo que la soporta. En la industria química hay 4 niveles, del 1 al 4, ordenados según su valor tecnológico. El Nivel 1 tiene como modelo una correlación o receta empírica, el Nivel 4 tiene un modelo de primeros principios y los Niveles 2 y 3 tienen modelos con componentes empíricos y de primeros principios. De ahí la importancia de estudiar y entender con modelado a primeros principios el comportamiento de los reactores (de carbonización y gasificación) empleados en la termovalorización de desechos agrícolas y municipales.

El modelado a primeros principios y su aplicación a la asimilación, dominio y mejora de la tecnología, así como para el desarrollo de sistemas de automatización, ha sido tema de investigación por más de una década del equipo interdisciplinario UAM-UNAM, del cual los coautores son parte, a través de tesis de posgrado y difusión abierta de resultados.

Dinámica

La dinámica es una disciplina de las matemáticas que estudia el devenir en equilibrio y tiempo de fenómenos descritos por ecuaciones diferenciales. En el caso de los reactores químicos, se refiere al estudio y análisis de cómo cambian las variables de operación del reactor (como la temperatura, la concentración de reactivos y pro-

ductos, la presión, etc.) con el tiempo en respuesta a diversas condiciones y perturbaciones. Es importante destacar que los reactores químicos son sistemas dinámicos no lineales, lo cual significa que ante cambios pequeños en alguno de sus parámetros o variables de entrada pueden presentar cambios grandes en su comportamiento. Este campo de estudio es crucial para entender y controlar el comportamiento del reactor en diferentes situaciones.

El estado estacionario (EE) o punto de equilibrio de un proceso continuo, es un régimen de operación que no cambia en el tiempo, puede ser único (unicidad) o múltiple (multiplicidad), estable o inestable. Un EE es estable si al recibir perturbaciones externas su comportamiento transitorio regresa al mismo EE, en caso de que se aleje se dice que es inestable. Un ciclo límite (CL) es un régimen estacionario con variación periódica y sostenida, pudiendo ser estable o inestable. El fenómeno de bifurcación es la creación o destrucción de EEs o CLs mediante cambio natural o inducido de algún parámetro del sistema. La multiplicidad y bifurcación son fenómenos altamente no lineales, que ocurren en “la globalidad” y no en la localidad del EE de interés. Dícese que la dinámica es compleja si hay multiplicidad y/o bifurcación.

Los fenómenos de bifurcación y multiplicidad se presentan en sistemas de diversas naturalezas, por ejemplo, detrás de los interruptores (“switches”) biológicos hay bifurcación de reacciones bioquímicas y detrás de los relojes biológicos (circadianos) hay reacciones bioquímicas con CL como en el funcionamiento periódico de la respiración y el corazón de un ser vivo (Figura 2a). Un marcapasos corrige anomalías del corazón. La bifurcación, como su etimología lo indi-

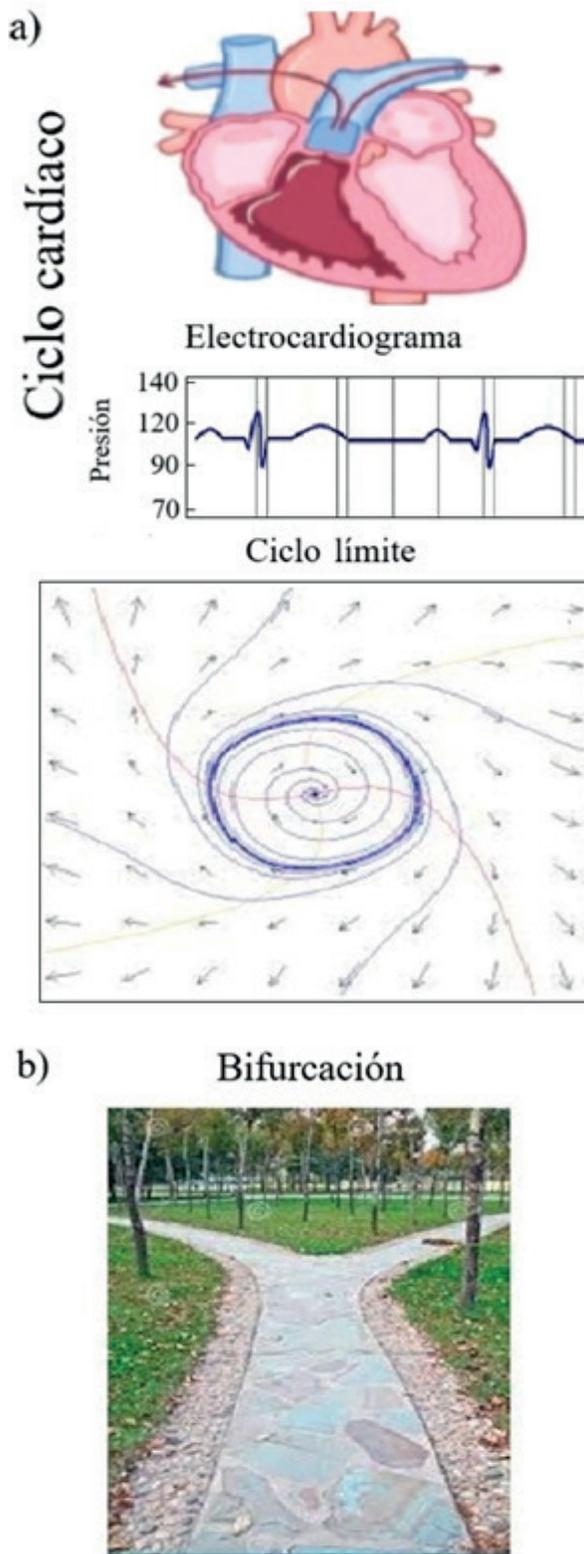


Figura 2. Ciclo límite cardíaco (a) y bifurcación de un camino (b).

ca, significa separación o unión de comportamientos cualitativamente diferentes, por ejemplo, cuando en un camino se llega a un punto y se convierte en dos (Figura 2b), mientras que en ciencia política se le conoce como efecto mariposa (un pequeño cambio en la circunstancia presente produce un gran cambio en el devenir futuro).

De la ingeniería de reactores exotérmicos (así como los de carbonización y gasificación) y la práctica industrial (Morud, J. C., & Skogestad, S. 1998) se sabe que: (i) la operación continua la subyacen fenómenos no lineales perjudiciales y benéficos, para que la operación sea segura, confiable y rentable, como lo son la multiplicidad de EEs y CLs, así como bifurcación y (ii) la operación en lote no tiene EEs y la subyace un estado en devenir sostenido. En las siguientes secciones se darán detalles específicos para los reactores de termovalorización.

Reactor de carbonización

La carbonización hidrotermal (HTC, por sus siglas en inglés) es un proceso termoquímico mediante el cual se producen componentes ricos en carbono (técnicamente denominado hidrocarbón -HC-) a partir de biomasa residual húmeda. Un ejemplo casero es la carbonización de una tortilla fresca (compuesta de biomasa con moléculas orgánicas grandes y agua) en un comal con flama cuidadosamente regulada para lograr deshidratación (secado) y pirólisis. Otro ejemplo familiar de carbonización de biomasa es la producción de carbón vegetal a partir de leña, ver Figura 3. Pirólisis (del griego “isis” romper, “piros” fuego) es la reacción que, en ausencia de aire y a alta temperatura, fragmenta las moléculas “grandes” (de biomasa) en “pequeñas” (de HC).

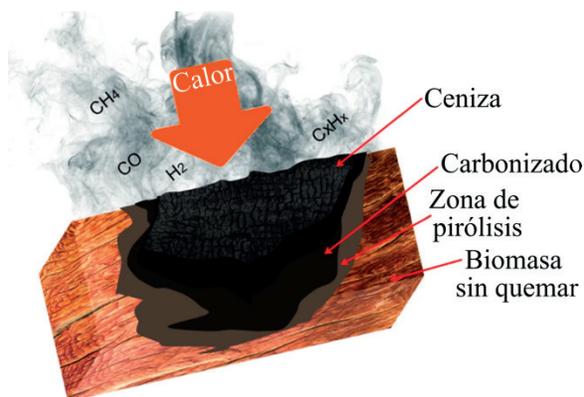


Figura 3. Pirólisis de madera.

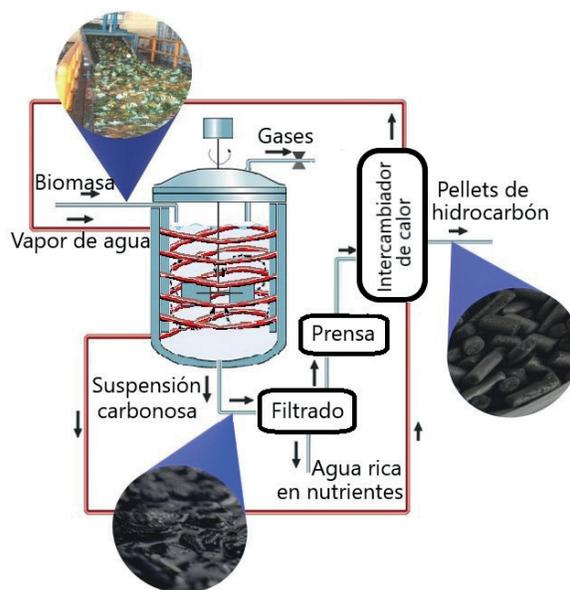


Figura 4. Carbonización en un reactor continuo tipo tanque agitado.

En la Figura 4 se ilustra el proceso de carbonización, en donde la unidad principal es el reactor continuo agitado acoplado a tres unidades de proceso (filtrado, prensado e intercambiador de calor), con la finalidad de obtener pellets de HC a temperatura ambiente. El proceso inicia alimentando la biomasa húmeda por la parte superior del reactor, donde se regula la temperatura de la biomasa dosificando un flujo de vapor que se inyecta con un serpentín, produciendo a lo largo del reactor una suspensión de

partículas de carbón en agua a 200°C. La mezcla efluente se transfiere a una unidad de filtrado para generar una pasta de carbón caliente que se peletiza en una unidad de prensado. Finalmente, los pellets se pasan a un intercambiador de calor para enfriarlos hasta temperatura ambiente.

Como primer paso en el diseño o rediseño de reactores industriales de termovalorización, con tecnología de alto valor agregado (Nivel 4, reseñada anteriormente), mediante un modelo matemático se caracteriza la dinámica no lineal del proceso con la finalidad de identificar una condición de operación automatizada, segura, confiable y productiva.

Muchos se preguntarán: ¿Cómo puede uno caracterizar propiedades de la dinámica no lineales como multiplicidad y bifurcación?

En términos geométricos la respuesta es relativamente simple: utilizando el diagrama de Van Heerden, el diagrama de bifurcación y/o el plano fase.

Por ejemplo, para el reactor que hemos estudiado, en la Figura 5a (denominada diagrama de Van Heerden) se muestra una recta y una curva sigmoide, que representan la extracción y generación de calor del reactor, respectivamente, en régimen estacionario y en función de la temperatura. El número de intersecciones corresponden al número de estados estacionarios (EEs). Un EE es estable sí, en su intersección la pendiente de la tangente a la curva es menor que la pendiente de la recta, es decir, cuando la extracción de calor domina a la generación. Según la Figura 5a el reactor tiene tres EEs: (i) un EE nominal de interés (temperatura intermedia) es inestable y (ii) uno estable e indeseable tipo ignición (alta temperatura) y (iii) uno estable e indeseable tipo extinción (baja

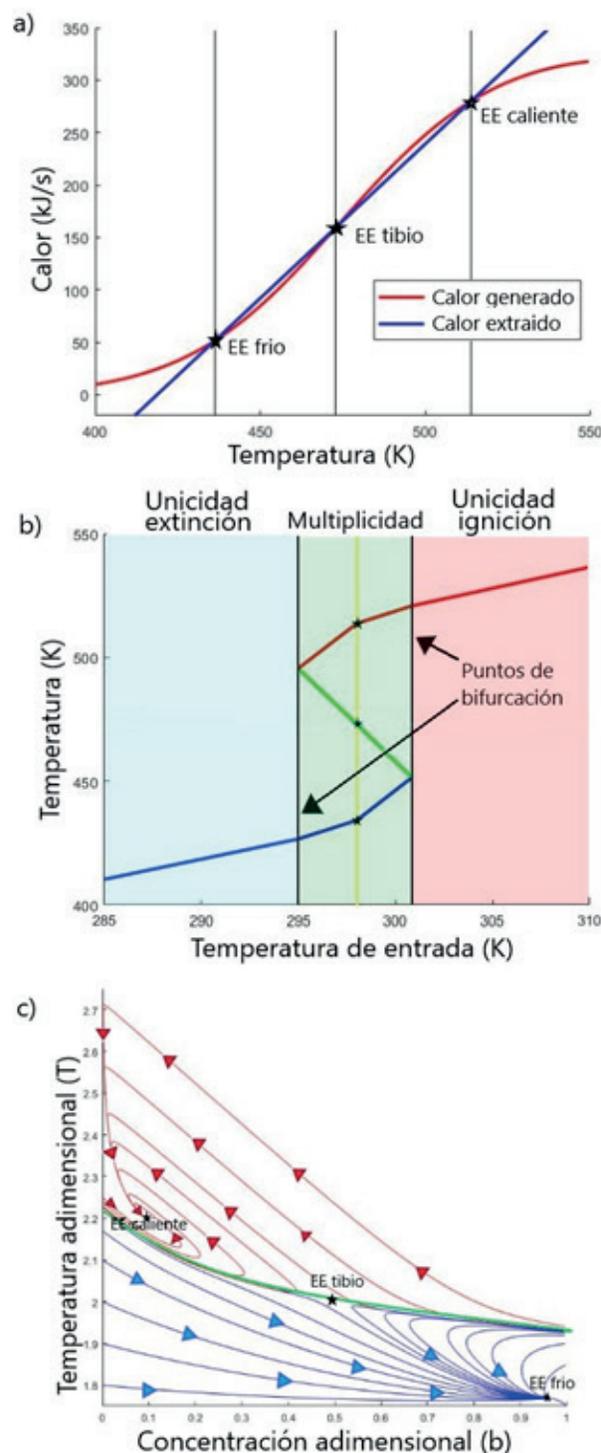


Figura 5. (a) diagrama de Van Heerden, (b) diagrama de bifurcación con respecto a temperatura de entrada y (c) plano fase de un reactor químico.

temperatura). Esto tiene una implicación práctica importante: la operación del reactor en el EE nominal de interés, requiere un control retroalimentado estabilizante.

Para ilustrar el cambio de multiplicidad con el cambio de algún parámetro, es decir el fenómeno de bifurcación, en la Figura 5b se muestra la variación de la temperatura del reactor contra la de la alimentación. De acuerdo con la figura, a cada temperatura de alimentación le pueden corresponder una o varias temperaturas de reactor. Esto determina tres zonas de comportamiento, separadas por dos puntos de bifurcación (creación o destrucción de EEs): (i) zona roja con un EE tipo ignición, (ii) zona verde con tres EEs con la configuración antes descrita (Figura 5a) y (iii) zona azul con un EE tipo extinción. El estado nominal de interés está en la zona verde de multiplicidad.

En la Figura 5c se presenta el plano fase (concentración de biomasa-temperatura) de la operación nominal, mostrando que: (i) el EE de interés es una silla inestable, explicando porque el reactor industrial de la Cd México opera con control retroalimentado estabilizante y (ii) los EEs indeseados de ignición y extinción son atractores tipo foco y nodo, respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, en el reactor lote no hay EEs sino un transitorio sostenido en el tiempo del lote. En vez de hablar de la estabilidad de uno o varios EEs, aquí se habla de la estabilidad de una trayectoria en el plano fase. La operación nominal y su seguimiento con control retroalimentado se diseñan conforme a teoría especializada de sistemas dinámicos no autónomos, de tal suerte que la operación sea segura, confiable y rentable

en el sentido de maximización de beneficio económico. Esto incluye componentes de control para seguir una temperatura nominal cambiante en el tiempo y determinar la duración del lote.

La descripción técnica de los diseños de operación nominal y sistema de control trascienden el alcance del presente trabajo. El lector interesado puede consultarlos en la literatura especializada (Andrade et al., 2021). Aquí nos circunscribimos a presentar en la Figura 6 las evoluciones temporales de temperatura, concentración de hidrocarbón y beneficio económico, así como el tiempo de paro que maximiza la rentabilidad del proceso.

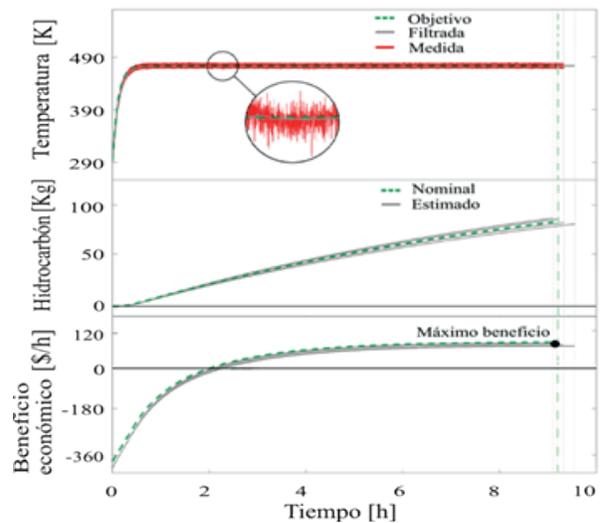


Figura 6. Funcionamiento del reactor lote de carbonización automatizado.

Para finalizar, hemos de mencionar que hay problemas abiertos de investigación en la comunidad científica y tecnológica, entre ellos están los siguientes. Para las operaciones lote y continuo: (i) la extensión al caso multibiomasa con tratamiento cinético basado en teoría de redes de reacción y (ii) el aprovechamiento del modelado en niveles de supervisión y optimi-

zación para actualización de parámetros y puntos o trayectorias de consigna. Para la operación continua: (i) la caracterización de la multiplicidad de la operación en continuo frente a datos experimentales y (ii) el diseño de controladores y estimadores atendiendo a criterios y especificaciones industriales de seguridad, confiabilidad y rentabilidad.

Reactor de gasificación

La gasificación ocurre secuencialmente en cuatro etapas (ver Figura 7): (i) secado de la biomasa, (ii) pirólisis a alta temperatura, (iii) combustión del carbonizado resultante con producción monóxido de carbono (CO) y H₂O y (iv) reducción con producción del gas de síntesis.



Figura 7. Etapas del proceso de gasificación y reactor tubular de gasificación.

Una situación cotidiana para ejemplificar el proceso de gasificación es la siguiente: imaginemos que estamos asando carne a la parrilla. Cuando se coloca la carne sobre el fuego, el calor comienza a quemar la grasa y los jugos de la carne, generando humo y llamas. Este proceso es similar al de la gasificación de biomasa: así como el

calor en la parrilla provoca que la grasa se descomponga en humo y vapor, en la gasificación, el calor aplicado a la biomasa (como madera o restos vegetales) hace que se descomponga y libere gases combustibles. Al final, tanto en la carne asada como en la gasificación, se produce energía: en el primer caso, en forma de calor y en el segundo en forma de gases que pueden ser utilizados como combustible.

Los informes experimentales y de modelado, disponibles en la literatura abierta (aunque gran parte es confidencial) sobre reactores de gasificación revelan lo siguiente: (i) inconsistencias en la cinética de las reacciones superficiales, y (ii) la existencia de múltiples EEs estables, incluyendo uno denominado “de rejilla”, que es estable pero distinto el nominal. Además, se ha establecido formalmente que un reactor piloto comercial es triestable (con tres EEs estables y dos inestables).

El grupo de trabajo UAM-UNAM desarrolló una metodología para caracterizar la multiplicidad y las bifurcaciones en reactores de gasificación (Santamaria-Padilla et al., 2022). Además, se mejoró la escalabilidad al: (i) proponer un nuevo modelo cinético para las reacciones superficiales en reactores de gasificación de carbón (Sarmati, 2020) y de biomasa (Marín et al., 2023) y (ii) corregir la estequiometría de las reacciones de pirólisis primaria y secundaria (Marín et al., 2023).

En la Figura 8 se presenta la dependencia de la temperatura en estado estacionario contra la dosificación de flujo de aire, mostrando que: (i) el punto de operación (●) está en el EE de interés (el de máxima conversión), es robustamente estable (puede resistir perturbaciones grandes en

el flujo de aire) y está acompañado por 2 EEs estables (de intermedia y nula conversión) y 2 EEs inestables (de alta y baja conversión), (ii) para flujo bajo sólo posee 1 EE estable (zona roja), cuando se va elevando el flujo de aire tiene 3 EEs (zona amarilla con 2 estables y 1 inestable) y 5 EEs (zona verde con 3 estables y 2 inestables), mientras que para flujos mayores vuelve a tener 3 EEs (zona azul con 2 estables y 1 inestable) y (iii) posee 3 puntos de bifurcación (*), en los cuales se crean o destruyen EEs al incrementar o disminuir el flujo de aire.

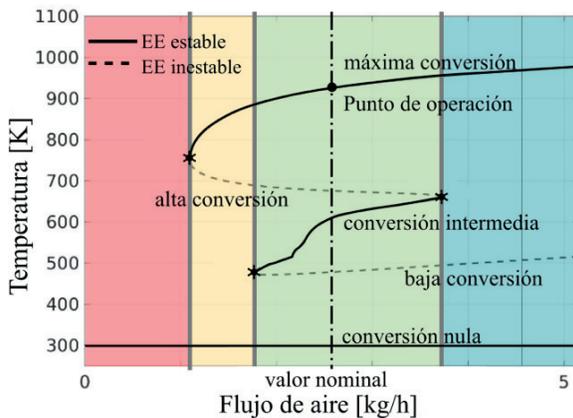


Figura 8. Multiplicidad del reactor tubular de gasificación Imbert en función del flujo de aire.

Conclusiones

En este trabajo se reseñaron el funcionamiento y modelado de reactores químicos de termovalorización de desechos orgánicos municipales mediante carbonización y gasificación. El objetivo de estos reactores es mitigar el daño ambiental asociado a la generación de desechos orgánicos mediante la conversión de los desechos en combustibles útiles y menos contaminantes.

El material combina el estado del arte en la materia con actividad de investigación de un grupo interdisciplinario (Ing. química y eléctrica-control) e interinstitucional

(UAM-UNAM) formado por estudiantes y profesores, en la vertiente en ciencias de la ingeniería y en el marco de una colaboración científico-tecnológica auspiciado por el gobierno de la Ciudad de México y la Secretaría de Energía.

Como características y resultados relevantes podemos mencionar que los reactores de termovalorización: (i) son una alternativa interesante para la sustentabilidad y el cuidado del ambiente y (ii) exhiben comportamientos altamente no lineales, que desde el punto de vista científico y tecnológico son muy interesantes y retadores para el diseño de la operación segura, confiable y eficiente de los reactores en particular y de los procesos químicos en general.

Los casos de estudio abordados muestran que: (i) el reactor continuo de carbonización tiene tres EEs y su operación requiere un sistema de control, (ii) el reactor continuo de gasificación tiene cinco EEs y aunque puede operar sin control, es recomendable usar un controlador y (iii) el reactor lote de carbonización no tienen EEs sino un transitorio cuyo seguimiento y paro requiere un sistema especializado de control.

Los autores intentaron reflejar una característica de la ingeniería moderna: la ciencia se ocupa de entender los fenómenos naturales, la ingeniería se ocupa de resolver problemas del sector productivo y a mayor entendimiento científico mejores soluciones de ingeniería.

Referencias

Andrade S., Álvarez J., Álvarez-Icaza, L., y Samarti L., Robust estimation and control of a batch Hydrothermal Carbonization reactor. Memorias Del Congreso Nacional de Control Automático, 4, pp. 166–171, 2021.

Boletín 167/2023 CDMX. Reconoce EUA planta de carbonización hidrotermal de la CDMX como ejemplo mundial de innovación en favor del medio ambiente. 29 marzo del 2023. (<https://acortar.link/AFLkOs>).

Boletín de prensa de la CFE-BP-224/21f, 17 de noviembre del 2021. (<https://goo.su/w5sDA4d>).

Marín I., Álvarez J., Santamaría-Padilla L. y Álvarez-Icaza L. Modelado de la cinética del reactor de gasificación de biomasa, Memorias del Congreso Internacional de Energía de la Academia Mexicana de Energía. (18-22 septiembre) Vol 6, pp. 258-269, 2023. <https://amexen.org/esp/MEM-CIE-2023.pdf>.

Morud, J. C., & Skogestad, S. Analysis of Instability in an Industrial Ammonia Reactor. *AIChE Journal*, 44(4), 888–895 (1998). <https://doi.org/10.1002/aic.690440414>.

Samarti, L. Modelado de la dinámica no-lineal de reactores tubulares de gasificación de carbón. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma Metropolitana (2020).

Santamaria-Padilla, L., Badillo-Hernández, U., Jesús Álvarez, & Álvarez-Icaza, L. On the nonlinear dynamics of biomass throated tubular gasification reactors. *Computers and Chemical Engineering*, (2022).



