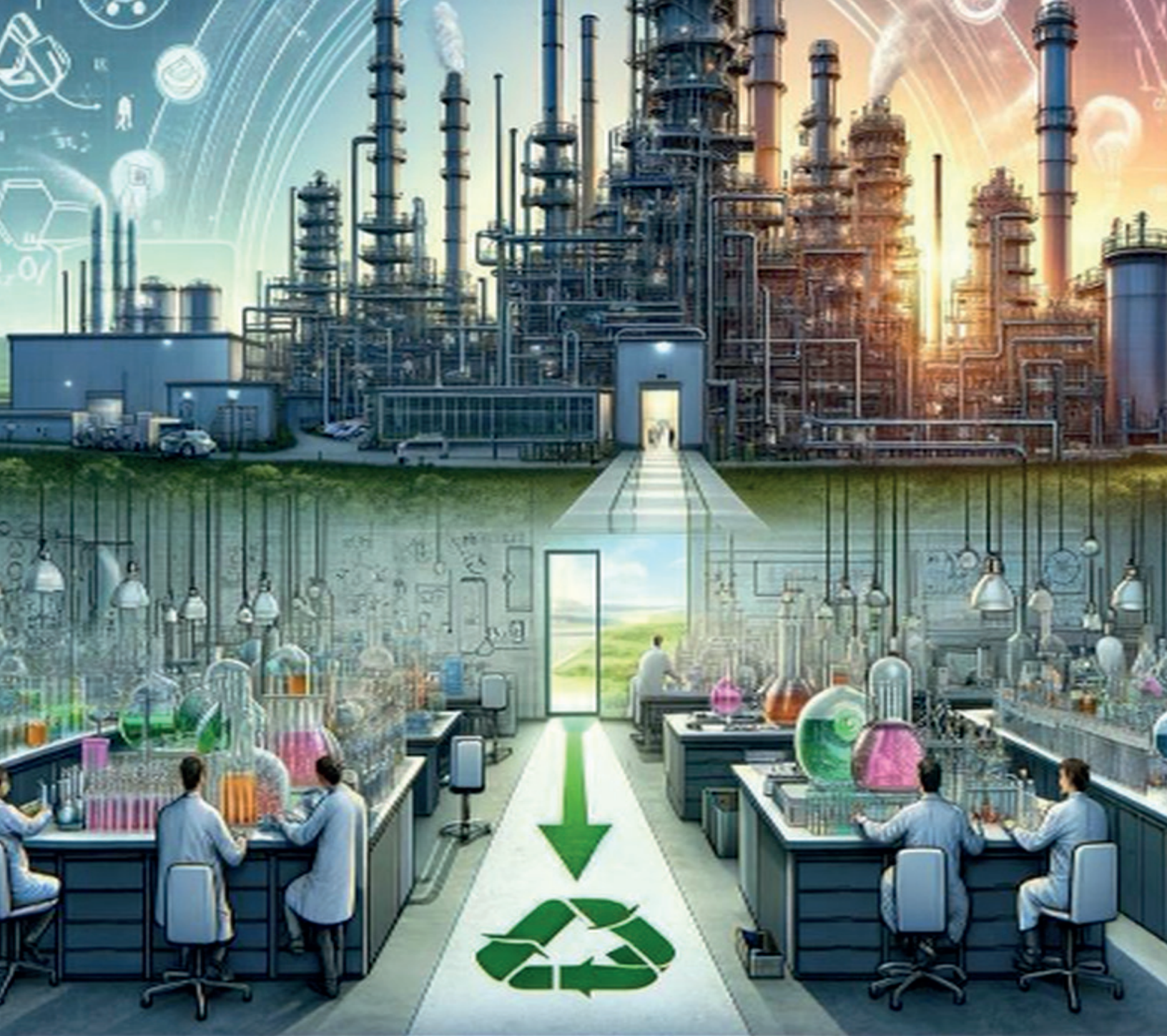


La Ingeniería Química y su papel en el Desarrollo Sostenible y la Economía Circular



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



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: @trollbackgroup.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-



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 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.