Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

DEL ACEITE DE PALMA AL HIDRÓGENO RENOVABLE: ANÁLISIS CRÍTICO Y OPORTUNIDADES DESDE LA INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PROCESOS (PSE)

Kenya Monserrat Lopez Perez [a], Antíoco López Molina [a,*], Fernando I. Gómez Castro [b], Luis Miguel Valenzuela Gómez [a], Carolina Conde Mejía [a]

[a] División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carr. Libre Villahermosa – Comalcalco km.27, Ribera Alta, Jalpa de Méndez, Tabasco, México 86205.
antioco.lopez@ujat.mx

[b] Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta S/N, Guanajuato, Guanajuato, México 36050.

Resumen

La transición hacia fuentes de energía sostenibles constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI. En el sureste mexicano, la producción de aceite de palma representa una oportunidad para el desarrollo de biocombustibles como el biodiésel y, a partir de sus subproductos, hidrógeno renovable.

Este trabajo presenta un análisis crítico basado en literatura científica sobre el aprovechamiento integral del aceite de palma y del glicerol, subproducto del biodiésel, con énfasis en su potencial dentro de esquemas de bioeconomía circular. A partir de la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), se discuten estrategias de integración de procesos, valorización de subproductos y mejora de eficiencia energética.

El análisis sugiere que la articulación de estas tecnologías podría contribuir a la sostenibilidad energética regional; sin embargo, su implementación depende de retos tecnológicos, económicos y ambientales que requieren atención. Este enfoque permite identificar oportunidades para el diseño de cadenas de valor más eficientes, integradas y sostenibles en el contexto mexicano.

Palabras clave: Bioenergía; Hidrógeno verde; Biodiésel; Glicerol; Ingeniería de Sistemas de Procesos; México

FROM PALM OIL TO RENEWABLE HYDROGEN: A CRITICAL ANALYSIS AND OPPORTUNITIES FROM A PROCESS SYSTEMS ENGINEERING (PSE) PERSPECTIVE

Abstract

The transition toward sustainable energy sources represents one of the major challenges of the 21st century. In southeastern Mexico, palm oil production offers an opportunity for the development of biofuels such as biodiesel and, from its byproducts, renewable hydrogen.

This work presents a critical analysis based on scientific literature on the integrated utilization of palm oil and glycerol, a byproduct of biodiesel production, with emphasis on its potential within circular bioeconomy schemes. From the perspective of Process Systems Engineering (PSE), strategies for process integration, byproduct valorization, and energy efficiency improvement are discussed.

The analysis suggests that the integration of these technologies could contribute to regional energy sustainability; however, their implementation depends on technological, economic, and environmental challenges that must be addressed. This approach allows the identification of opportunities for designing more efficient, integrated, and sustainable value chains in the Mexican context.

Keywords: Bioenergy; Green hydrogen; Biodiesel; Glycerol; Process Systems Engineering; Mexico

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

1. Energía verde: un reto global y una oportunidad local

El mundo busca con urgencia alternativas a los combustibles fósiles (Foro Económico Mundial, 2024). Entre las fuentes renovables de energía, el biodiésel se ha convertido en una opción viable y cada vez más popular. Dentro de las materias primas empleadas, la palma de aceite destaca por su alta productividad y su potencial para generar energía renovable de manera eficiente. Actualmente, casi el 84 % de la producción mundial de aceite de palma proviene de Indonesia y Malasia: 46 millones de toneladas y 19.4 millones respectivamente (USDA, 2024).

En el caso de México, un análisis del USDA-IPAD revela que la superficie cultivada con palma de aceite (*Elaeis guineensis jacq.*) en México creció de 55,000 ha en 2015 a 106,000 ha en 2024, mientras la producción ascendió de 120,000 t a 320,000 t, con rendimientos mejorando de 2.18 a 3.02 t/ha (USDA, 2024). En el periodo 2003-2016, la superficie sembrada creció un 208.98%, lo que se tradujo en un aumento del 247.93% en la producción (SAGARPA, 2017).

Chiapas se mantiene como el principal estado productor de palma de aceite en México. Aunque es difícil encontrar una serie histórica completa y consistente por estado que abarque muchos años y se mantenga actualizada con precisión debido a la dinámica de los datos del sector agrícola, se pueden observar tendencias y datos recientes.

Tabasco participa con más de 29,000 ha, generando más de 75,000 t de semilla y aceite (FEMEXPALMA, 2024). Esto posiciona al sureste como eje central en la transición hacia biocombustibles.

La Tabla 1 muestra la superficie sembrada por estado en años representativos, se observa la predominancia de Chiapas en la producción de palma de aceite, y el crecimiento significativo de Campeche en los últimos años. Tabasco y Veracruz también son estados importantes, aunque con una menor superficie.

Tabla 1. Superficie Sembrada de Palma de Aceite por Estado en México (hectáreas)

Estado	2016	2017	2019	2023
Chiapas	63,670	74,000	74,000	76,026.23
Campeche	18,056	21,046	29,000	37,069.90
Tabasco	13,862	28,061	-	29,010.34
Veracruz	5,000	7,219	-	7,732.28
Total Nacional	100,588	96,659	100,000	129,838.85

Nota: Las variaciones en los valores reportados, como la disminución observada en el total nacional entre 2016 y 2017, pueden deberse a diferencias en metodologías de reporte o actualizaciones en las fuentes oficiales. Los valores no reportados (–) corresponden a información no disponible para los años indicados. Fuente: FEMEXPALMA (2024).

La Figura 1 muestra la producción de fruto de aceite de palma en el periodo 2017 – 2019 (toneladas métricas) y las regiones productoras en México.



Figura 1. Áreas cultivadas con palma de aceite en México (promedio 2017–2019). Fuente: elaboración propia con base en datos de USDA (2024).

El aceite de palma es uno de los aceites vegetales más versátiles y económicos, lo que ha impulsado su uso tanto en la industria alimentaria como en la no alimentaria. En México, su consumo refleja la tendencia global, donde aproximadamente el 70 al 75 % se destina a la elaboración de aceites comestibles líquidos, margarinas, mantecas vegetales, productos de panadería y repostería, entre otros alimentos procesados (USDA, 2024). Le sigue el sector cosmético, que representa entre 10 y 15 % del uso total, aplicándose en la fabricación de jabones, champús, cremas hidratantes, labiales y otros productos de cuidado personal. Adicionalmente, entre el 5 y 10 % se emplea en industrias como la de lubricantes, pinturas, tintas, alcoholes grasos y emulsificantes.

Aunque el uso del aceite de palma para la producción de biodiésel en México aún es limitado (5–10 %), este sector representa una gran oportunidad estratégica. Las tendencias internacionales y regulaciones ambientales apuntan hacia una transición energética basada en combustibles verdes, y en este contexto, el sureste mexicano, por su capacidad productiva, se perfila como una región clave para contribuir al cumplimiento de los compromisos ambientales globales.

En este contexto, la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE) proporciona un marco conceptual que permite analizar de manera integral las rutas de producción de biocombustibles y sus interacciones. A

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

diferencia de un enfoque puramente descriptivo, el PSE facilita la evaluación de alternativas tecnológicas mediante criterios de integración de procesos, eficiencia energética, intensificación de procesos y optimización de recursos. En este trabajo, estos principios se emplean como eje analítico para interpretar la información disponible en la literatura y discutir el potencial de sistemas integrados de biodiésel e hidrógeno renovable.

2. Biodiésel y glicerol: aprovechamiento total

La conversión de aceite crudo al biodiésel genera aproximadamente 0.1 kg de glicerol por kg de biodiésel. El biodiésel solía costar USD 1870/t en 2022, mientras que en la actualidad alcanza valores cercanos a USD 1300/t (IMARC, 2025). Por el contrario, el glicerol crudo se ha devaluado globalmente: su precio cayó de USD 1200/t refinado (2003) a menos de USD 240/t (2014), y crudo a un máximo de USD 70/t (Almeida y col., 2023). Esta disminución se atribuye a la correlación negativa entre el precio del glicerol y el aumento en la producción de biodiésel, ya que cada vez se genera más glicerol como subproducto en este proceso. En este contexto, el bajo valor del glicerol representa un desafío significativo para las pequeñas y medianas empresas dedicadas a la producción de oleoquímicos y biodiésel. (Elsayed y col., 2024).

En consecuencia, el glicerol se considera un subproducto de bajo valor económico y difícil manejo dentro de la industria. Aun así, el glicerol no es un desecho: posee propiedades químicas únicas que permiten transformarlo en compuestos útiles para la industria farmacéutica, cosmética y química, como se muestra en la Figura 2, donde se resumen sus principales usos y rutas de valorización.

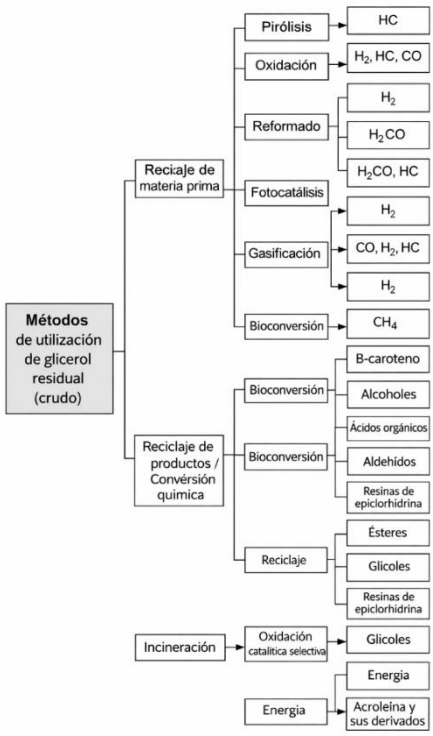


Figura 2. Usos primarios del glicerol crudo.

Con estas alternativas, el glicerol podría convertirse en un recurso clave para la bioeconomía circular, en lugar de un residuo sin valor.

Existen múltiples rutas tecnológicas para aprovecharlo:

- Hidrogenólisis catalítica, que produce dioles como el 1,2-propanodiol y el 1,3-propanodiol, usados en polímeros y solventes (Vanapalli y col., 2024).
- Deshidratación a acroleína, base para fabricar plásticos y resinas (Huang y col., 2023).
- Conversión a carbonato de glicerol, un solvente verde y biodegradable (Fundación Universidad de América, 2024).
- Fermentación anaerobia, que permite obtener biogás o hidrógeno verde (Kazimierowicz y col., 2024).

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), las distintas rutas de valorización del glicerol pueden compararse mediante criterios clave como la eficiencia de conversión, la complejidad del proceso y su potencial de escalabilidad industrial.

En términos de eficiencia, procesos como la hidrogenólisis catalítica presentan altos rendimientos hacia productos de valor agregado como propanodioles, aunque requieren condiciones controladas de presión y temperatura, así como catalizadores específicos (Vanapalli y col., 2024). Por su parte, la fermentación anaerobia ofrece una alternativa con menores requerimientos energéticos, pero con tasas de conversión más bajas y mayor sensibilidad a condiciones operativas (Kazimierowicz y col., 2024).

Desde el punto de vista de la complejidad del proceso, rutas termoquímicas como la deshidratación a acroleína o el reformado implican múltiples etapas de reacción y separación, lo que incrementa los costos de capital y operación (Huang y col., 2023). En contraste, procesos biotecnológicos pueden operar en condiciones más suaves, aunque presentan desafíos en términos de control y estabilidad del sistema.

En cuanto a la escalabilidad, las rutas catalíticas han demostrado mayor madurez tecnológica y viabilidad para implementación industrial, mientras que las rutas biológicas aún requieren avances en intensificación de procesos y control de productividad. En este sentido, el enfoque PSE permite identificar

configuraciones óptimas que integren eficiencia, simplicidad operativa y viabilidad económica, orientando la selección de rutas hacia esquemas más competitivos dentro de una bioeconomía circular.

Como se observa en la Figura 3, se estima que para 2025, la producción anual de glicerol crudo proveniente de la industria del biodiésel podría alcanzar los 6.3 millones de toneladas, con niveles de pureza que oscilan entre el 60% y el 80%. En cuanto al mercado global del glicerol (incluyendo el glicerol puro), se proyecta un aumento significativo, pasando de 2.8 millones de toneladas (MT) en 2020 a 4 MT para 2027. Esta tendencia está impulsada por una tasa de crecimiento anual del 10% esperada entre 2022 y 2030 (Attarbachi y col., 2023).

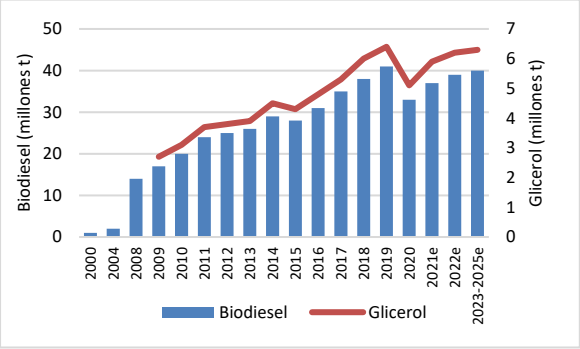


Figura 3. Producción global de biodiésel y glicerol (2000–2025, valores estimados).

Los valores de biodiésel para 2020-2025 se calculan con base en una densidad de 880 kg/m³ (densidad a 25 °C). Los valores de glicerol se basan en el 10 % en peso de la producción de biodiésel. La producción total se deduce del supuesto/simplificación de que, entre 2009 y 2025, el biodiésel abastece el 64 % de todo el mercado de glicerol.

3. Glicerol que impulsa el futuro: el camino hacia el hidrógeno renovable

En los últimos años, la transformación del glicerol en hidrógeno renovable ha despertado gran interés. Este proceso puede realizarse mediante pirólisis o reformado catalítico, técnicas que permiten descomponer el glicerol para generar gas de síntesis ($CO + H_2$) y producir hidrógeno con alta pureza, indispensable para aplicaciones industriales y energéticas (Usme Contreras, 2020).

De acuerdo con diversos estudios, los costos de producción podrían reducirse hasta USD 3.85–4.47 por kilogramo, con purezas cercanas al 99.95 % de H_2, lo que hace competitivo este enfoque frente a otros métodos (Attarbachi y col., 2023; García Bernal, 2021; Foro Económico Mundial, 2024).

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Desde el enfoque de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), las rutas de conversión de glicerol a hidrógeno pueden analizarse comparativamente considerando su desempeño energético, complejidad operativa y grado de madurez tecnológica.

El reformado catalítico, incluyendo el reformado en fase acuosa (APR), destaca por su alta eficiencia en la producción de hidrógeno y su capacidad para operar a temperaturas moderadas, lo que reduce los requerimientos energéticos en comparación con procesos termoquímicos convencionales (Khalil, 2021). Sin embargo, estos sistemas requieren catalizadores activos y estables, así como etapas de purificación posteriores para alcanzar las especificaciones de pureza del hidrógeno.

Por otro lado, procesos como la pirólisis o la gasificación presentan una mayor flexibilidad en cuanto a alimentación y condiciones operativas, pero implican una mayor complejidad en la integración térmica y en el manejo de subproductos, como alquitranes y gases no condensables (Usme Contreras, 2020). Esto puede impactar negativamente la eficiencia global del proceso si no se implementan estrategias adecuadas de recuperación de energía.

En términos de escalabilidad, el reformado catalítico ha mostrado mayor potencial para su integración en esquemas industriales, especialmente cuando se combina con tecnologías intensificadas como reactores con membranas, que permiten la producción y separación simultánea de hidrógeno. Desde la perspectiva del PSE, estas configuraciones representan oportunidades para reducir el número de unidades de operación, mejorar la eficiencia energética y disminuir costos operativos mediante integración de procesos.

Asimismo, el análisis comparativo de estas rutas pone de manifiesto la importancia de considerar no solo la eficiencia de conversión, sino también la complejidad del sistema y su integración dentro de cadenas de valor existentes, lo cual es fundamental para su implementación en contextos reales.

En lo que respecta a la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), esta transformación hace posible optimizar la cadena de producción mediante esquemas de integración energética, recuperación de calor y análisis de desempeño en estado estacionario, fortaleciendo su viabilidad económica y ambiental en comparación con los métodos tradicionales para producir hidrógeno.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

4. Hacia una bioeconomía circular mexicana

La integración de la producción de biodiésel a partir de aceite de palma con la valorización del glicerol hacia hidrógeno renovable constituye un ejemplo representativo de bioeconomía circular (Elsayed y col., 2024), en la cual los subproductos de un proceso se convierten en materias primas de otro, generando valor adicional y reduciendo la generación de residuos.

Más allá de una descripción conceptual, este tipo de sistemas puede analizarse rigurosamente desde la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), la cual permite abordar el problema como una red integrada de procesos interconectados. En este enfoque, el objetivo no se limita a maximizar la producción de un solo producto, sino a optimizar simultáneamente el uso de materia, energía y recursos económicos a lo largo de toda la cadena de valor.

Desde el PSE, la articulación entre la producción de biodiésel y la conversión de glicerol a hidrógeno puede entenderse como un problema de síntesis de procesos, donde se deben definir las configuraciones óptimas de operación, así como los puntos de integración entre unidades. Por ejemplo, la recuperación de calor entre etapas, el aprovechamiento de corrientes residuales y la reducción de etapas de separación mediante tecnologías intensificadas son estrategias que pueden mejorar significativamente la eficiencia global del sistema.

Asimismo, el análisis de estas configuraciones requiere considerar múltiples criterios de desempeño. En términos energéticos, la integración de procesos permite reducir consumos mediante esquemas de intercambio térmico y reutilización de corrientes. Desde el punto de vista económico, la valorización del glicerol contribuye a diversificar ingresos y mitigar la baja rentabilidad asociada a este subproducto dentro de la industria del biodiésel. En el ámbito ambiental, la reducción de residuos y la incorporación de rutas de aprovechamiento favorecen la disminución del impacto global del sistema.

Sin embargo, la implementación de estos esquemas también implica retos importantes. La integración de múltiples procesos incrementa la complejidad operativa, requiere mayores niveles de control y puede demandar inversiones iniciales más elevadas. Además, la viabilidad de estas configuraciones depende de factores como la disponibilidad

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

de materia prima, la escala de producción y las condiciones del mercado energético.

En este contexto, herramientas propias del PSE, como la optimización multiobjetivo, el análisis de sensibilidad y la evaluación tecnoeconómica, permiten explorar distintos escenarios y determinar configuraciones que equilibren los compromisos entre eficiencia, costo e impacto ambiental (Khalil, 2021). Este tipo de análisis resulta especialmente relevante en el contexto mexicano, donde las condiciones regionales, la infraestructura disponible y las políticas energéticas influyen de manera directa en la factibilidad de implementación.

En conjunto, la integración de la producción de biodiésel y la valorización del glicerol hacia hidrógeno no solo representa una oportunidad tecnológica, sino un problema de diseño de sistemas que requiere enfoques integrales. La perspectiva del PSE permite estructurar este análisis, identificar oportunidades de mejora y orientar el desarrollo de cadenas de valor más eficientes, resilientes y sostenibles.

5. El desempeño ambiental desde una perspectiva de sistemas

El uso de biodiésel y la producción de hidrógeno a partir de biomasa han sido ampliamente promovidos como alternativas con menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles. En particular, diversos estudios han reportado que el biodiésel puede contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, debido a que el dióxido de carbono liberado durante su combustión forma parte de un ciclo biogénico previamente capturado por los cultivos de origen. Bajo ciertas condiciones, se han estimado reducciones de emisiones de hasta un 74 % en comparación con el diésel convencional (H. Huo y col., 2008).

Asimismo, el uso de biodiésel puede contribuir a disminuir la emisión de contaminantes atmosféricos, como material particulado, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados (U.S. Department of Energy, 2025), además de presentar ventajas en términos de biodegradabilidad y menor toxicidad en caso de derrames. Estas características lo posicionan como una alternativa atractiva dentro de estrategias de transición energética.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

En este contexto, el glicerol, subproducto de la producción de biodiésel, representa una materia prima con alto contenido de hidrógeno que puede ser transformada en vectores energéticos como el hidrógeno renovable mediante procesos termoquímicos o catalíticos (Usme Contreras, 2020; Khalil, 2021). Estas rutas ofrecen la posibilidad de valorizar residuos y reducir la dependencia de fuentes fósiles para la producción de hidrógeno.

No obstante, desde la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), la evaluación del desempeño ambiental de estos sistemas requiere un análisis integral que considere todas las etapas del proceso. En lugar de centrarse únicamente en las emisiones durante la fase de uso, el enfoque PSE promueve el uso de herramientas como el análisis de ciclo de vida (LCA), que permite evaluar impactos asociados a la producción de materia prima, transporte, transformación y uso final.

En este sentido, los beneficios ambientales del biodiésel y del hidrógeno derivado del glicerol dependen en gran medida de factores contextuales, como las prácticas agrícolas, el origen de la energía utilizada en los procesos y la eficiencia de las tecnologías implementadas. Por ejemplo, aunque la palma de aceite es altamente productiva, su expansión puede estar asociada a cambios de uso de suelo, deforestación y pérdida de biodiversidad si no se gestiona bajo criterios de sostenibilidad.

De manera similar, los procesos de conversión de glicerol a hidrógeno, aunque prometedores, pueden implicar consumos energéticos significativos y la generación de subproductos que requieren tratamiento. Desde el enfoque PSE, estos aspectos pueden abordarse mediante estrategias de integración energética, recuperación de calor y optimización de procesos, con el objetivo de minimizar la huella ambiental global del sistema.

Adicionalmente, la comparación entre rutas de producción de hidrógeno pone en evidencia que, si bien alternativas basadas en glicerol pueden presentar menores emisiones que procesos fósiles como el reformado de metano, estos beneficios dependen de la eficiencia del proceso y de su integración dentro de sistemas energéticos más amplios (Khalil, 2021). Por ello, resulta fundamental evitar generalizaciones y analizar cada configuración tecnológica en su contexto específico.

En conjunto, el enfoque de la Ingeniería de Sistemas de Procesos permite una evaluación más robusta y realista del desempeño ambiental, al integrar múltiples variables y considerar las interacciones entre los distintos subsistemas. Esto no solo facilita la identificación de oportunidades de mejora, sino que también contribuye a la toma de decisiones informadas para el diseño de sistemas energéticos más sostenibles y adaptados a las condiciones del contexto mexicano.

6. Perspectivas y desafíos

El aprovechamiento del aceite de palma y del glicerol para la producción de biodiésel e hidrógeno renovable representa una oportunidad relevante para avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles en el sureste mexicano. No obstante, su implementación efectiva depende de la capacidad para abordar de manera integral diversos desafíos tecnológicos, económicos y ambientales previamente discutidos.

Desde el punto de vista tecnológico, uno de los principales retos radica en la selección e integración de rutas de conversión de glicerol que equilibren eficiencia, complejidad operativa y escalabilidad. Como se discutió en secciones anteriores, procesos como el reformado catalítico ofrecen ventajas en términos de rendimiento, pero implican desafíos asociados a la estabilidad de catalizadores, la purificación del hidrógeno y la integración térmica del sistema. En este sentido, el enfoque de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE) resulta fundamental para diseñar configuraciones que optimicen el desempeño global mediante estrategias de integración energética, intensificación de procesos y reducción de unidades de operación.

En el ámbito económico, la viabilidad de estos sistemas está estrechamente ligada a la valorización efectiva del glicerol y a las condiciones del mercado energético. La fluctuación de precios del biodiésel y el bajo valor del glicerol (Almeida y col., 2023), discutidos previamente, hacen necesario desarrollar esquemas que diversifiquen los ingresos y reduzcan la dependencia de un solo producto. Herramientas de evaluación tecnoeconómica, propias del PSE, permiten analizar distintos escenarios y determinar condiciones bajo las cuales estas tecnologías pueden ser competitivas frente a alternativas convencionales.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Desde la perspectiva ambiental, uno de los principales desafíos consiste en asegurar que los beneficios potenciales de estos sistemas no se vean contrarrestados por impactos asociados a la producción de materia prima. Como se analizó en la sección anterior, factores como el cambio de uso de suelo, las prácticas agrícolas y el consumo energético del proceso pueden influir significativamente en la huella ambiental global. En este contexto, el uso de herramientas como el análisis de ciclo de vida permite identificar puntos críticos y orientar estrategias de mejora.

Adicionalmente, existen retos relacionados con la implementación a escala real, incluyendo la disponibilidad de infraestructura, la logística de suministro de biomasa y la necesidad de marcos regulatorios que incentiven la adopción de tecnologías limpias. En regiones como el sureste mexicano, donde la producción de palma de aceite ya está establecida, estas condiciones representan tanto una oportunidad como un desafío para el desarrollo de cadenas de valor integradas.

En este escenario, la Ingeniería de Sistemas de Procesos ofrece un marco metodológico para abordar estos retos de manera sistemática, permitiendo evaluar alternativas, identificar compromisos entre variables clave y diseñar soluciones adaptadas al contexto local. De esta manera, el desarrollo de sistemas integrados de biodiésel e hidrógeno renovable no debe entenderse únicamente como un avance tecnológico, sino como un problema de diseño y optimización de sistemas complejos.

7. Conclusiones

Este trabajo presentó un análisis basado en literatura sobre el aprovechamiento del aceite de palma y del glicerol para la producción de biodiésel e hidrógeno renovable, destacando su potencial dentro de esquemas de bioeconomía circular en el contexto del sureste mexicano.

A partir de la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), se identificó que la integración de estas rutas no solo depende de la viabilidad individual de cada tecnología, sino de su articulación dentro de sistemas que optimicen el uso de materia y energía. En este sentido, el PSE permite analizar comparativamente distintas rutas de valorización del glicerol, así como identificar

oportunidades de integración energética y mejora del desempeño global del sistema.

El análisis sugiere que la valorización del glicerol hacia hidrógeno puede contribuir a incrementar el valor agregado de la cadena de producción de biodiésel, aunque su implementación está condicionada por factores como la eficiencia de los procesos, la complejidad operativa y las condiciones del mercado. Asimismo, se reconoce que los beneficios ambientales dependen del contexto específico, incluyendo prácticas agrícolas, uso de suelo y fuentes de energía utilizadas.

Entre las principales limitaciones identificadas se encuentran la falta de infraestructura a escala industrial, los desafíos asociados a la purificación del glicerol y del hidrógeno, así como la necesidad de políticas públicas que fomenten la inversión en tecnologías sostenibles.

Finalmente, este trabajo pone de manifiesto que el desarrollo de sistemas integrados de bioenergía requiere un enfoque de análisis de sistemas que permita evaluar de manera conjunta aspectos tecnológicos, económicos y ambientales. En este contexto, la Ingeniería de Sistemas de Procesos se posiciona como una herramienta clave para orientar el diseño de cadenas de valor más eficientes, sostenibles y adaptadas a las condiciones del contexto mexicano.

Referencias bibliográficas

Almeida, E. L., Olivo, J. E., Marcos, C., & Andrade, G. (2023). Production of Biofuels from Glycerol from the Biodiesel Production Process—A Brief Review. *Fermentation 2023, Vol. 9, Page 869*, *9*(10), 869. https://doi.org/10.3390/FERMENTATION9100869

Attarbachi, T., Kingsley, M. D., & Spallina, V. (2023). New trends on crude glycerol purification: A review. *Fuel*, *340*, 127485. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127485

Elsayed, M., Eraky, M., Osman, A. I., Wang, J., Farghali, M., Rashwan, A. K., Yacoub, I. H., Hanelt, D., & Abomohra, A. (2024). Sustainable valorization of waste glycerol into bioethanol and biodiesel through biocircular approaches: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *22*(2), 609–634. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01671-6

FEMEXPALMA. (2024). *Anuario estadístico 2024*. https://femexpalma.com.mx/wp-content/uploads/2025/01/ANUARIO-ESTADISTICO-FEMEXPALMA-2024-EDICION-ALTA-CALIDAD-.pdf

Foro Económico Mundial. (2024, May 10). *Cómo reducir los costos "ocultos" del hidrógeno*. https://es.weforum.org/stories/2024/05/el-85-oculto-como-hacer-que-el-hidrogeno-sea-rentable/

García Bernal, N. (2021). *Industria del hidrógeno verde: costos de producción*.

H. Huo, M. Wang, C. Bloyd, & V. Putsche. (2008). *Life-Cycle Assessment of Energy and Greenhouse Gas Effects of Soybean-Derived Biodiesel and Renewable Fuels Energy Systems Division*. www.anl.gov

IMARC. (2025). *Biodiesel Prices, Trend, Chart, Demand, Market Analysis, News, Historical and Forecast Data Report 2025 Edition*. https://www.imarcgroup.com/biodiesel-pricing-report

Kazimierowicz, J., Dębowski, M., Zieliński, M., Kasiński, S., & Cruz Sanchez, J. (2024). Biotechnological Valorization of Waste Glycerol into Gaseous Biofuels—A Review. *Energies 2024*, Vol. 17, Page 338, 17(2), 338. https://doi.org/10.3390/EN17020338

Khalil, Y. F. (2021). Simulation-based environmental-impact assessment of glycerol-to-hydrogen conversion technologies. *Clean Energy*, *5*(3), 387–402. https://doi.org/10.1093/ce/zkab018

SAGARPA. (2017). *Palma de aceite mexicana. Planeación Agrícola Nacional 2017–2030*.

U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy., & Alternative Fuels Data Center. (n.d.). *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (s. f.). Biodiesel Benefits and Considerations. Alternative Fuels Data Center*. Retrieved October 15, 2025, from https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel-benefits

USDA. (2024). *Aceite de palma | Servicio Agrícola Exterior del USDA*. https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/4243000

Usme Contreras, J. D. (2020). *Alternativas de Aprovechamiento del Glicerol*. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78946