Naturaleza y TECNOLOGÍA

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

HIDRÓGENO RENOVABLE: TRES CAMINOS HACIA LA ENERGÍA DEL FUTURO

Virginia Zapata Gómez [a], Antíoco López Molina [a*], Luis Miguel Valenzuela Gómez [a], Fernando Israel Gómez Castro [b], 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

El hidrógeno renovable se perfila como un vector energético clave para la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, aunque su impacto ambiental depende en gran medida de la tecnología empleada para su producción. Este artículo presenta un análisis comparativo, de carácter bibliográfico, de tres rutas tecnológicas para la producción de hidrógeno con menor huella ambiental: la fermentación oscura a partir de residuos orgánicos, la electrólisis del agua alimentada con electricidad renovable y la pirólisis de glicerol como vía de valorización de subproductos del biodiésel. Desde el enfoque de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE), se discuten sus principales ventajas, limitaciones técnicas, ambientales y económicas, así como su potencial de integración dentro de sistemas energéticos más amplios. El estudio concluye que no existe una tecnología única óptima, sino que la combinación estratégica de distintas rutas de producción, evaluada mediante herramientas de PSE, puede contribuir de manera significativa a un sistema energético más limpio, resiliente y equilibrado.

Palabras clave: Hidrógeno verde; Energías limpias; Innovación; Sostenibilidad; Ingeniería de Procesos

Naturaleza y TECNOLOGÍA

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

RENEWABLE HYDROGEN: THREE PATHS TOWARDS THE ENERGY OF THE FUTURE

Abstract

Renewable hydrogen is emerging as a key energy vector for the transition toward more sustainable energy systems, although its environmental impact depends largely on the technology used for its production. This article presents a comparative analysis, based on a literature review, of three technological pathways for hydrogen production with a lower environmental footprint: dark fermentation from organic waste, water electrolysis powered by renewable electricity, and glycerol pyrolysis as a method for valorizing biodiesel by-products. From a Process Systems Engineering (PSE) perspective, the study discusses their main advantages, technical, environmental, and economic limitations, as well as their potential for integration within broader energy systems. The study concludes that there is no single optimal technology; instead, the strategic combination of different production routes, evaluated through PSE tools, can significantly contribute to a cleaner, more resilient, and balanced energy system.

Keywords: Green hydrogen; Clean energy; Innovation; Sustainability; Process Engineering.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

1. Contexto y motivación: hacia una energía más limpia

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestra época. Cada año, el aumento de las temperaturas, las sequías y los fenómenos meteorológicos extremos nos recuerdan la urgente necesidad de transformar la forma en que producimos y consumimos energía. En este contexto, el hidrógeno verde se presenta como una de las alternativas más prometedoras para construir un futuro energético sostenible.

A diferencia de los combustibles fósiles, el hidrógeno no genera dióxido de carbono al usarse como fuente de energía: solo produce agua. Por eso se le conoce como un combustible limpio. Sin embargo, su verdadero potencial depende de cómo se obtiene. Si el hidrógeno se produce a partir de procesos que también emiten gases de efecto invernadero, su impacto ambiental deja de ser positivo.

Este artículo explora, a través de un análisis bibliográfico, tres tecnologías que buscan producir hidrógeno de manera sostenible: la fermentación oscura, que aprovecha residuos agrícolas y aguas residuales; la electrólisis del agua, que usa electricidad para separar hidrógeno y oxígeno; y la pirólisis de glicerol, que transforma un subproducto de la producción de biodiésel en gas de hidrógeno. A través del enfoque de la Ingeniería de Sistemas de Procesos, se analizan sus ventajas, limitaciones y posibilidades de integración, con el objetivo de encontrar la combinación más eficiente y respetuosa con el ambiente.

Más que una simple comparación tecnológica, este trabajo invita a reflexionar sobre cómo la ciencia y la ingeniería pueden unirse para impulsar una transición energética que combine innovación, sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

2. Introducción

Las actividades relacionadas con el petróleo y el gas son responsables de aproximadamente el 15% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero vinculadas a la energía, equivalentes a 5,1 mil millones de toneladas anuales (IEA, 2023). Ante la urgencia de combatir el cambio climático, la producción de hidrógeno sostenible emerge como una alternativa clave para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y minimizar sus impactos ambientales. El hidrógeno es el elemento químico más ligero y la sustancia química más abundante en el universo (Gencer, 2024). A diferencia de la mayoría de los combustibles, el hidrógeno no produce el

gas de efecto invernadero dióxido de carbono (CO_2) cuando se quema: en cambio, produce agua. Esto significa que, en el punto de uso, la combustión de hidrógeno no contribuye directamente al cambio climático (Abdelsalam, 2024).

La demanda global de hidrógeno alcanzó casi 100 millones de toneladas en 2024 y se espera que supere ese hito en 2025 (IEA, 2025). La Figura 1 muestra la demanda global de hidrógeno en el sector industrial, de refinación y otros (incluye transporte, generación de energía, producción de combustibles a base de hidrógeno, edificios y mejora de biocombustibles).

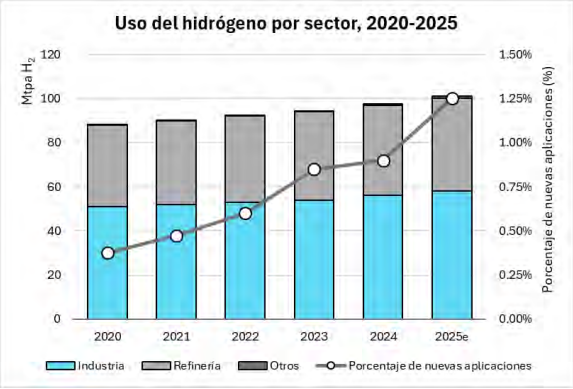


Figura 1. Uso del hidrógeno por sector, 2020-2025(IEA, 2025).
Notas: «Otros» incluye transporte, generación de energía, producción de combustibles a base de hidrógeno, edificios y mejora de biocombustibles.

El valor estimado para 2025 (2025e) es una proyección basada en las tendencias observadas hasta julio de 2025.

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (Process Systems Engineering, PSE), la producción de hidrógeno debe analizarse no solo a nivel de reacción o proceso individual, sino como parte de sistemas energéticos complejos en los que interactúan variables técnicas, económicas y ambientales. El enfoque PSE proporciona herramientas para estructurar y comparar distintas rutas tecnológicas bajo criterios múltiples, facilitando la evaluación de sus ventajas, limitaciones y posibles sinergias dentro de cadenas energéticas más amplias. En este trabajo, dicho enfoque se emplea como marco conceptual para analizar comparativamente diversas tecnologías de producción de hidrógeno renovable y discutir su potencial de integración en sistemas energéticos sostenibles.

3. ¿Por qué hidrógeno? El combustible del futuro

El hidrógeno es un gas con alto potencial como vector energético en escenarios de descarbonización. En el punto de uso, su combustión no genera dióxido de carbono, produciendo principalmente agua; sin embargo, dependiendo de la tecnología empleada, pueden generarse óxidos de nitrógeno (NO_x), y su impacto ambiental total

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

está estrechamente ligado al método de producción del hidrógeno. Por ello, el concepto de "hidrógeno limpio" o "hidrógeno verde" debe evaluarse considerando todo su ciclo de vida.

Desde el punto de vista energético, el hidrógeno presenta una alta densidad energética gravimétrica, aproximadamente tres veces superior a la de los combustibles fósiles convencionales. No obstante, su baja densidad energética volumétrica constituye uno de los principales retos para su almacenamiento y transporte, especialmente en aplicaciones como el transporte pesado, donde se requieren sistemas de compresión, licuefacción o portadores químicos que incrementan la complejidad y los costos (Selvam y col., 2024).

3.1 Aplicaciones industriales

El hidrógeno renovable presenta un abanico de usos dentro del sector industrial, gracias a su versatilidad como combustible, agente reductor y medio de almacenamiento de energía. A continuación, señalaremos algunas de las áreas esenciales que se beneficiarán del hidrógeno renovable en los próximos quince años.

3.1.1. Industria pesada (acero, cemento, productos químicos)

El sector de la industria pesada, en particular la producción de acero y cemento se encuentra entre los mayores emisores de CO_2. El hidrógeno renovable presenta una solución prometedora para descarbonizar estas industrias (Behrendt, 2025).

Producción de acero: El hidrógeno se puede utilizar como agente reductor para la reducción de óxidos de hierro, se utiliza principalmente en el proceso de alto horno y en el proceso de reducción directa de hierro (DRI) a base de gas (Miškovičová et al., 2024). Un ejemplo concreto de esta aplicación es el proyecto HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) en Suecia, desarrollado por SSAB, LKAB y Vattenfall, donde el hidrógeno renovable se emplea como agente reductor en procesos de reducción directa del hierro, logrando una disminución significativa de las emisiones de CO_2 en comparación con los altos hornos convencionales.

Producción de cemento: Aunque menos establecido que el acero, el hidrógeno podría servir potencialmente como combustible en los hornos de cemento, que actualmente

dependen en gran medida del carbón y otros combustibles fósiles (Behrendt, 2025).

Industria química: El hidrógeno desempeña un papel fundamental como insumo en la fabricación de amoníaco y metanol. Aproximadamente el 80 % de la producción de NH_3 es utilizada por la industria de fertilizantes para generar fertilizantes a base de nitrógeno. La urea, un fertilizante nitrogenado, se utiliza principalmente para satisfacer la demanda de nitrógeno del cultivo agrícola, que se fabrica con NH_3 y CO_2 como materia prima. El CO_2 necesario para generar urea se obtiene reciclado del proceso de producción de hidrógeno (Vigneswaran y col., 2025).

3.1.2. Transporte

En el ámbito del transporte pesado y ferroviario, el hidrógeno ya se utiliza en aplicaciones comerciales. Un ejemplo es la operación de trenes impulsados por pilas de combustible de hidrógeno en Alemania, donde unidades como el Coradia iLint han sustituido trenes diésel en rutas regionales, reduciendo emisiones locales y ruido. Asimismo, diversos fabricantes han desarrollado camiones de carga pesada con pilas de combustible, orientados a recorridos de larga distancia donde las baterías eléctricas presentan limitaciones.

Transporte marítimo: El potencial del hidrógeno para propulsar barcos con cero emisiones directas lo hace destacar. Ya sea que se utilice en pilas de combustible o motores de combustión interna, su combustión genera únicamente agua como subproducto, lo que la convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente En el sector marítimo, el hidrógeno y sus derivados comienzan a emplearse en proyectos piloto para embarcaciones de corta y media distancia, así como en sistemas auxiliares de generación eléctrica a bordo (Alavi-Borazjani y col., 2025).

Aviación: Para la implementación tecnológica del hidrógeno en la aviación existen varias opciones. La primera opción tecnológica se refiere al tipo de sistema de propulsión. Actualmente se están considerando dos opciones diferentes: arquitecturas de pilas de combustible de hidrógeno, donde el hidrógeno se convierte en electricidad, impulsando posteriormente hélices mediante motores eléctricos o la combustión directa de hidrógeno en turbinas de gas con propulsión turbohélice o turbofán (Oesingmann y col., 2024).

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

Vehículos pesados: Una forma de descarbonizar el sector del transporte por carretera es mediante el uso de vehículos eléctricos de batería (BEV) y vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV). Estos vehículos incluyen diferentes tipos y tamaños, que van desde vehículos ligeros de pasajeros hasta camiones pesados, trenes, barcos y aviones (Camacho y col., 2022).

3.1.3. Generación de energía y estabilidad de la red

El hidrógeno también podría ser fundamental en la producción de energía, sobre todo para dar estabilidad a esas redes eléctricas que se alimentan, principalmente, de energías renovables no constantes, tales como la eólica y la solar. En la práctica, los sistemas Power-to-Gas ya se emplean en diversos países europeos como mecanismos para gestionar excedentes de energía eólica y solar, convirtiendo electricidad renovable en hidrógeno que puede almacenarse o inyectarse en redes de gas. Estas experiencias muestran el papel del hidrógeno como vector de almacenamiento estacional, contribuyendo a la estabilidad de redes eléctricas con alta penetración de energías renovables

Energía de reserva y almacenamiento estacional: El hidrógeno se puede almacenar y utilizar para producir electricidad durante períodos de baja generación renovable, proporcionando energía de respaldo y mejorando la confiabilidad de la red (Behrendt, 2025).

Sistemas de conversión de energía en gas: Estos sistemas convierten el exceso de electricidad renovable en hidrógeno, que luego puede almacenarse o inyectarse en las redes de gas natural. Los sistemas Power-to-Gas ofrecen una solución para gestionar el excedente de energía renovable y reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Tanaka y Managi, 2021).

4. Tres caminos para producir hidrógeno

Actualmente existen distintos métodos para la producción de hidrógeno verde, en este análisis nos centraremos en tres: fermentación oscura, electrólisis del agua y pirólisis de glicerol, los cuales se analizan desde un enfoque de Ingeniería de Sistemas de Procesos considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos.

4.1. Fermentación oscura

Este proceso utiliza bacterias anaeróbicas (por ejemplo, las del género *Clostridium*) para descomponer carbohidratos presentes en aguas residuales o desechos agrícolas. La producción de hidrógeno a partir de residuos orgánicos ofrece una forma económica y

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

respetuosa con el medio ambiente de obtener combustibles renovables (Li y col., 2012).

La fermentación oscura es un proceso biotecnológico anaerobio en el que microorganismos convierten materia orgánica, como residuos agrícolas, agroindustriales o aguas residuales, en hidrógeno y otros subproductos, tales como ácidos orgánicos y CO_2. Generalmente opera a temperaturas moderadas (30 – 60°C) y presiones cercanas a la atmosférica, lo que representa una ventaja desde el punto de vista energético.

Entre sus principales beneficios destacan el aprovechamiento de residuos, la reducción de emisiones asociadas al tratamiento de desechos y su bajo impacto ambiental. Sin embargo, el proceso presenta limitaciones importantes, como bajos rendimientos de hidrógeno, sensibilidad a las condiciones operativas y la necesidad de etapas posteriores de tratamiento o valorización de subproductos. Desde el enfoque PSE, estos aspectos son clave para evaluar su viabilidad a escala industrial.

La fermentación oscura es un proceso anaeróbico de degradación de compuestos orgánicos llevado a cabo por microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos en ausencia de luz, lo que da como resultado la producción de bioH_2 a través de la reducción de protones para disipar el exceso de electrones de la oxidación de la materia orgánica en el medio de cultivo. Como subproductos primarios de la fermentación, se obtienen compuestos como alcoholes, CO_2, y también ácidos orgánicos (Albuquerque y col., 2024).

A pesar de que diversas sustancias orgánicas, abarcando carbohidratos, azúcares, proteínas y lípidos, teóricamente podrían ser útiles como materiales base para la producción biológica de H_2, la ruta metabólica suele ilustrarse empleando glucosa como un sustrato modelo.

4.2. Electrólisis del agua

La importancia de la electrólisis del agua es clara en la actualidad: este método electroquímico abarca diversas opciones y factores, como el tipo de medio que conduce iones, los electrodos y catalizadores utilizados, las condiciones de temperatura y presión, la densidad de corriente y voltaje, y las dimensiones del electrolizador.

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico en el que una corriente eléctrica separa el agua en hidrógeno y oxígeno. Existen diferentes tecnologías, como la electrólisis alcalina, de membrana de intercambio protónico (PEM) y de óxido

sólido, cada una con características particulares en términos de eficiencia, costos y condiciones de operación.

Cuando la electricidad proviene de fuentes renovables, la electrólisis permite producir hidrógeno con muy bajas emisiones indirectas de carbono, además de ofrecer una alta seguridad operativa y flexibilidad. No obstante, su principal desventaja es el elevado consumo energético y su dependencia del costo y disponibilidad de electricidad renovable, factores que impactan directamente en su competitividad económica (Franco y Giovannini, 2023).

4.3. Pirólisis de glicerol

El glicerol tiene el potencial de ser una materia prima para la generación de H_2, ya que 1 mol de glicerol puede generar teóricamente hasta 4 moles de hidrógeno.

La pirólisis de glicerol consiste en la descomposición térmica de este subproducto de la industria del biodiésel, generalmente a temperaturas entre 500 y 900 °C en ausencia de oxígeno. Este proceso permite obtener una mezcla gaseosa rica en hidrógeno, además de CO, CH_4 y otros compuestos ligeros.

La principal ventaja de esta ruta es la valorización de un residuo industrial, contribuyendo a esquemas de economía circular. Sin embargo, los altos requerimientos energéticos, el costo del glicerol y la posible formación de subproductos indeseables representan desafíos técnicos y económicos que deben evaluarse cuidadosamente mediante herramientas de PSE. (Valliyappan y col., 2008).

5. Comparación entre los procesos

Desde un enfoque de Ingeniería de Sistemas de Procesos, la comparación entre las tecnologías de producción de hidrógeno debe considerar simultáneamente criterios ambientales, económicos y de seguridad. Estudios basados en simulación de procesos reportados en la literatura indican que la pirólisis de glicerol presenta costos de producción más elevados, asociados principalmente al precio de la materia prima y a los requerimientos energéticos del proceso, aunque exhibe niveles moderados de emisiones y riesgos operativos relativamente bajos.

Por otro lado, la fermentación oscura destaca como la alternativa más favorable desde el punto de vista ambiental, debido a su bajo nivel de emisiones de carbono y al aprovechamiento de residuos orgánicos. Sin embargo, enfrenta limitaciones relacionadas con menores rendimientos y mayores

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

incertidumbres operativas. En cuanto a la electrólisis del agua, si bien ofrece un riesgo operativo mínimo y una alta pureza del hidrógeno producido, su elevado consumo energético reduce su competitividad ambiental y económica cuando no se dispone de electricidad renovable a bajo costo (Zapata-Gómez y col., 2025). La Figura 2 presenta una comparación normalizada de los procesos bajo distintos criterios, donde valores más altos indican un mayor impacto relativo en cada categoría evaluada.

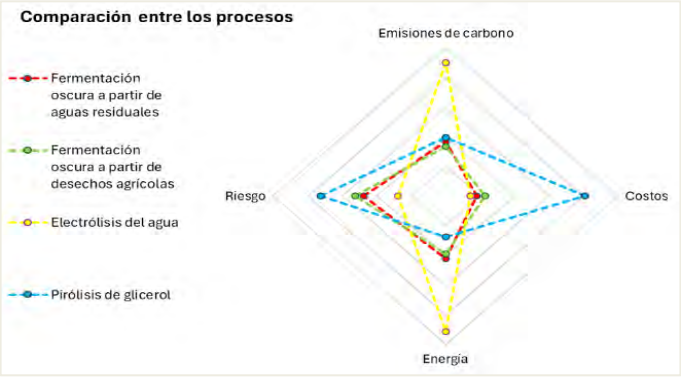


Figura 2. Gráfica comparativa de los procesos

6. El futuro del hidrógeno sostenible

El desarrollo del hidrógeno sostenible representa una oportunidad estratégica para avanzar hacia sistemas energéticos más limpios y resilientes; sin embargo, su adopción a gran escala enfrenta aún desafíos tecnológicos, económicos y regulatorios. Si bien las tecnologías analizadas en este trabajo muestran un alto potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, su viabilidad depende de factores como los costos de producción, la disponibilidad de recursos energéticos renovables y la infraestructura necesaria para el almacenamiento y transporte del hidrógeno.

Uno de los principales retos es el costo asociado a la producción de hidrógeno verde, particularmente en procesos como la electrólisis del agua, donde el precio de la electricidad renovable juega un papel determinante. De igual manera, tecnologías como la fermentación oscura y la pirólisis de glicerol requieren optimización adicional para mejorar rendimientos, reducir incertidumbres operativas y aumentar su competitividad frente a los combustibles fósiles.

En este contexto, las políticas públicas resultan fundamentales para acelerar la transición hacia el hidrógeno sostenible. Países como Alemania han implementado estrategias nacionales de hidrógeno que incluyen incentivos económicos, financiamiento a proyectos piloto y el desarrollo de infraestructura para producción, almacenamiento y distribución. Japón, por su parte, ha promovido el uso del hidrógeno en sectores como el transporte y la generación eléctrica mediante subsidios y programas de demostración tecnológica. En Chile, el

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

aprovechamiento de recursos solares y eólicos ha impulsado una estrategia orientada a posicionar al país como un exportador de hidrógeno verde, combinando inversión pública y privada.

Estas experiencias internacionales demuestran que la articulación entre políticas públicas, inversión en investigación y desarrollo, y colaboración entre academia e industria es un factor clave para el avance del hidrógeno como vector energético. Desde la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos, el diseño de estas estrategias puede beneficiarse de herramientas de modelado, simulación y análisis multicriterio que permitan evaluar distintos escenarios de producción, integración y uso del hidrógeno bajo criterios técnicos, económicos y ambientales.

Así, el futuro del hidrógeno sostenible no depende únicamente del desarrollo de una tecnología específica, sino de la capacidad de integrar distintas rutas de producción dentro de sistemas energéticos complementarios, apoyados por marcos regulatorios adecuados y decisiones informadas basadas en enfoques sistémicos como el PSE. Esta visión integral permitirá maximizar los beneficios del hidrógeno y contribuir de manera efectiva a la transición hacia un modelo energético más limpio y sostenible.

7. Perspectivas y desafíos

El camino hacia la adopción del hidrógeno verde presenta múltiples oportunidades, pero también desafíos significativos. Uno de los principales retos es el costo de producción, aún elevado frente a los combustibles fósiles. Esto se debe principalmente al precio de la energía eléctrica utilizada en los procesos de electrólisis y a la limitada infraestructura para su almacenamiento y transporte. Superar estas barreras requerirá políticas públicas que incentiven la inversión en energías renovables, así como el desarrollo de cadenas de suministro locales.

Otro desafío es la aceptación social y la capacitación técnica. La transición energética demanda profesionales especializados, inversión en educación y una comunicación efectiva para que la sociedad comprenda los beneficios del hidrógeno como alternativa sostenible. En América Latina, existe un gran potencial para el aprovechamiento de fuentes renovables como la solar y la eólica, que pueden convertir a la región en un productor clave de hidrógeno verde.

La Ingeniería de Sistemas de Procesos jugará un papel clave en este proceso, al integrar

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

herramientas de modelado, optimización y análisis multicriterio que permitan diseñar cadenas de suministro de hidrógeno más resilientes y sostenibles. A través del PSE, es posible evaluar de manera simultánea aspectos técnicos, económicos y ambientales, impulsando decisiones basadas en datos que favorezcan la eficiencia y la sostenibilidad de las tecnologías emergentes.

En este contexto, las perspectivas futuras del hidrógeno verde no solo dependen del desarrollo tecnológico, sino también de la capacidad del PSE para ofrecer soluciones sistemáticas y escalables que articulen innovación, sostenibilidad y competitividad.

8. Conclusiones

Los resultados de este análisis confirman que no existe una tecnología única óptima para la producción sostenible de hidrógeno. Cada una de las rutas estudiadas presenta ventajas y limitaciones específicas que deben evaluarse en función del contexto regional, la disponibilidad de recursos y los objetivos ambientales y económicos. La fermentación oscura destaca por su bajo impacto ambiental y su contribución al aprovechamiento de residuos; la electrólisis del agua es fundamental para el almacenamiento de energía renovable y la seguridad operativa; mientras que la pirólisis de glicerol ofrece una vía prometedora para la valorización de subproductos industriales, aunque con mayores costos asociados.

En este sentido, la integración estratégica de estas tecnologías no implica necesariamente su acoplamiento físico, sino su coexistencia dentro de sistemas energéticos complementarios, optimizados mediante herramientas de Ingeniería de Sistemas de Procesos. El uso del PSE permite identificar configuraciones que minimicen impactos ambientales, mejoren la eficiencia económica y faciliten la toma de decisiones informadas. La implementación de políticas públicas adecuadas y la cooperación entre sectores serán clave para escalar estas soluciones y avanzar hacia una transición energética sostenible.

Referencias bibliográficas

Alavi-Borazjani, S. A., Adeel, S., y Chkoniya, V. (2025). Hydrogen as a Sustainable Fuel: Transforming Maritime Logistics. *Energies*, *18*(5), 1231. https://doi.org/10.3390/EN18051231

Albuquerque, M. M., De Bona Sartor, G., Jose Martinez-Burgos, W., Scapini, T., Edwiges, T., Soccol, C. R., Bianchi, A., y Medeiros, P.

(2024). Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review. *Methane 3*(3), 500–532. https://doi.org/10.3390/METHANE3030029

Behrendt, F. (2025). The future of industrial hydrogen: renewable sources and applications for the next 15 years. *Clean Energy*, *9*(1), 3–8. https://doi.org/10.1093/CE/ZKAE103

Camacho, M. de las N., Jurburg, D., y Tanco, M. (2022). Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(68), 29505–29525. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.06.271

Franco, A., y Giovannini, C. (2023). Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives. *Sustainability 2023*, *15*(24), 16917. https://doi.org/10.3390/SU152416917

Gencer, E. (2024, May 23). *Hidrógeno | Portal Climático del MIT*. https://climate.mit.edu/explainers/hydrogen

IEA. (2023). *Emissions from Oil and Gas Operations in Net Zero Transitions – Analysis - IEA*. https://www.iea.org/reports/emissions-from-oil-and-gas-operations-in-net-zero-transitions

IEA. (2025). Global Hydrogen Review 2025. *IEA*. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025

Li, Y. C., Liu, Y. F., Chu, C. Y., Chang, P. L., Hsu, C. W., Lin, P. J., y Wu, S. Y. (2012). Techno-economic evaluation of biohydrogen production from wastewater and agricultural waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, *37*(20), 15704–15710. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.05.043

Miškovičová, Z., Legemza, J., Demeter, P., Buľko, B., Hubatka, S., Hrubovčáková, M., Futáš, P., y Findorák, R. (2024). An Overview Analysis of Current Research Status in Iron Oxides Reduction by Hydrogen. *Metals*, *14*(5), 589. https://doi.org/10.3390/MET14050589

Oesingmann, K., Grimme, W., y Scheelhaase, J. (2024). Hydrogen in aviation: A simulation of demand, price dynamics, and CO2 emission reduction potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, *64*, 633–642.

https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.03.241

Selvam, R., Hiremath, P., Cs, S. K., Ramakrishna Bhat, R., Taneja, S., Jain, A., y Bhadoriya, Y. (2024). Green Hydrogen as a Clean Energy Resource and Its Applications as an Engine Fuel. *Engineering Proceedings*, *59*(1), 159. https://doi.org/10.3390/ENGPROC2023059159

Tanaka, K., y Managi, S. (2021). Industrial agglomeration effect for energy efficiency in Japanese production plants. *Energy Policy*, *156*, 112442. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112442

Valliyappan, T., Bakhshi, N. N., y Dalai, A. K. (2008). Pyrolysis of glycerol for the production of hydrogen or syn gas. *Bioresource Technology*, *99*(10), 4476–4483. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.08.069

Vigneswaran, V. S., Gowd, S. C., Ravichandran, V., Karthikeyan, M., Ganeshan, P., Kandasamy, S., Lee, J., Barathi, S., y Rajendran, K. (2025). Green ammonia as hydrogen carrier: current status, barriers, and strategies to achieve sustainable development goals. *Science of The Total Environment*, *982*, 179646. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2025.179646

Zapata-Gómez V., López Molina A., Conde-Mejía C., Valenzuela-Gómez L.M. (2025). Evaluación comparativa de tecnologías sostenibles para la producción de hidrógeno. *Avances en Ingeniería Química, 4(1), 2381-2386*. https://amidiq.com/avances-en-ingenieria-quimica/