

Logística aplicada a la producción de hidrógeno como fuente de energía no convencional para países emergentes: caso México-Colombia

Luis Rosendo Meléndez Paez¹

Vanesa Sanchez Bautista¹

Andrés Polo²



Artículo de revisión

Fecha de recepción: 20 de agosto 2024 ▪ **Fecha de aceptación:** 16 de septiembre 2024 ▪ **Fecha de publicación:** 14 de marzo 2025

✉ Luis Rosendo Meléndez Paez, carretera Atlautla-Ozumba, #12, Ingeniería en Logística y Transporte, Universidad Politécnica de Atlautla, barrio San Jacinto, Atlautla, México. luis_melendez@upatlautla.edu.mx

Meléndez Paez, L. R., Sanchez Bautista, V. y Polo, A. (2024). Logística aplicada a la producción de hidrógeno como fuente de energía no convencional para países emergentes: caso México-Colombia. *Revista de Investigaciones Uniagraria*, 12(1), 59-72.

Resumen

Para los próximos 25 años, la demanda global de energía aumentará significativamente debido al crecimiento poblacional, haciendo crucial la diversificación de fuentes energéticas para mitigar el impacto ambiental. Las energías renovables no convencionales (NCRE, según sus siglas en inglés) y el hidrógeno, en particular, están emergiendo como alternativas clave. El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis con energía renovable, es la opción más limpia, mientras que el hidrógeno azul, derivado del gas natural con captura de carbono, y el hidrógeno gris, el más contaminante, presentan diferentes impactos ambientales.

México y Colombia están avanzando en la producción y uso de hidrógeno, beneficiándose de sus ubicaciones geográficas estratégicas. México ha lanzado un proyecto piloto de hidrógeno verde y Colombia ha establecido metas en su “Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno” para 2030. Ambos países enfrentan retos similares, como la mejora en infraestructura para almacenamiento y distribución, pero en su compromiso con la sostenibilidad y el potencial para colaboración internacional destacan su papel en la transición energética. Este análisis busca identificar características comunes en sus enfoques para optimizar la producción y el impacto del hidrógeno en la sostenibilidad energética global.

Palabras clave: producción de hidrógeno, logística, energías renovables no convencionales, revisión de literatura, Colombia, México.

¹ Ingeniería en Logística y Transporte, Universidad Politécnica de Atlautla, Atlautla, México.

² Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Uniagraria), Bogotá, Colombia.

Logistics applied to hydrogen production as a non-conventional energy source for emerging countries: the Mexico-Colombia case

Abstract

Over the next 25 years, global energy demand is expected to rise significantly due to population growth, making diversifying energy sources crucial for mitigating environmental impact. Non-Conventional Renewable Energies (NCRE) and hydrogen, in particular, are emerging as key alternatives. Green hydrogen, produced through electrolysis using renewable energy, is the cleanest option, while blue hydrogen, derived from natural gas with carbon capture, and gray hydrogen, the most polluting, have varying environmental impacts. Mexico and Colombia are making strides in hydrogen production and utilization, leveraging their strategic geographic locations. Mexico has launched a green hydrogen pilot project, and Colombia has set targets in its National Hydrogen Roadmap for 2030. Both countries face similar challenges, such as improving infrastructure for storage and distribution, but their commitment to sustainability and potential for international collaboration underscores their role in the energy transition. This analysis aims to identify common features in their approaches to optimize hydrogen production and its impact on global energy sustainability.

Keywords: hydrogen production, logistics, non-conventional renewable energy, literature review, Colombia, Mexico.

Introducción

Se prevé que para el año 2050, la población mundial llegará a diez mil millones de personas, lo cual provocará un aumento significativo en la demanda y el consumo de energía a nivel global (Uzair Ayub *et al.*, 2024). Para mitigar el deterioro ambiental, es crucial diversificar nuestras fuentes de energía, incluyendo energías eólica e hidroeléctrica, así como opciones para calefacción, refrigeración y combustibles gaseosos (Kim *et al.*, 2024). Por esta razón, las energías renovables no convencionales (NCRE, según sus siglas en inglés) están ganando cada vez más importancia como fuentes de generación de energía, especialmente debido a las preocupaciones ambientales y al calentamiento global (Perez y García-Rendon, 2021). Las energías no convencionales pueden ser aprovechadas, ya que aseguran la máxima utilización en términos de carbono y energía. En contraste con las fuentes de energía convencionales que predominan actualmente, como los combustibles fósiles que tienen un amplio impacto en el cambio climático y la sostenibilidad, el hidrógeno (H₂) emerge como una alternativa prometedora y limpia (Nnabuife *et al.*, 2024), además, se vislumbra como una fuente alternativa de energía para los próximos años (Caliskan y Percin, 2024). Esta fuente tiene el potencial de reemplazar a los combustibles fósiles debido a su alta eficiencia, su naturaleza no carbonosa, su baja contaminación y su simbolismo positivo para el medio ambiente (Kumar *et al.*, 2020). Como portador de energía limpia, el hidrógeno tiene la capacidad de almacenar y transportar energía renovable, lo que lo convierte en un actor crucial en la transición energética global (Perez y García-Rendon, 2021).

El hidrógeno puede servir como una fuente de energía alternativa que cumple con el requisito de emitir cero o casi cero contaminantes, siendo seguro tanto para el medio ambiente como para los seres humanos (Saha *et al.*, 2024). De igual manera, sirve como un medio para almacenar energía renovable, contribuyendo a la estabilización global del sistema energético y

facilitando la reducción de emisiones de carbono, especialmente en los sectores industrial y de transporte (Ratner *et al.*, 2024; Saha *et al.*, 2024).

Existen tres diferentes tipos de hidrógeno: azul, verde y gris. El gris es considerado el más contaminante, a comparación del hidrógeno verde que es el más limpio y no deja residuos en el aire. Por otro lado, el hidrógeno azul es una mezcla de los dos anteriores y genera un impacto ambiental menor que el gris (Uzair Ayub *et al.*, 2024). El hidrógeno gris es el tipo más prevalente en la actualidad y se produce mediante la reforma de gas natural o la gasificación del carbón, sin emplear tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (Saha *et al.*, 2024); además, es actualmente el tipo más común de hidrógeno y se caracteriza por ser generado mediante reformado de metano con vapor o gasificación del carbón, sin necesidad de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS, según sus siglas en inglés) (Gibson *et al.*, 2024).

El carbón, con una de las mayores reservas del mundo, se utiliza extensamente para la producción de hidrógeno. La reforma del metano con CCUS a partir de gas natural o biomasa produce hidrógeno azul (Saha *et al.*, 2024). La biomasa también proporciona energía renovable y sostenible en otras formas, como gas de síntesis, biogás y gas de productor (Obiora *et al.*, 2024).

Por otra parte, el hidrógeno verde se produce mediante la electrólisis del agua, utilizando electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables, lo cual presenta un potencial significativo como fuente de energía limpia y versátil (Nnabuife *et al.*, 2024). Es un combustible renovable y limpio con gran potencial para su uso en motores de combustión y vehículos eléctricos equipados con pilas de combustible, lo cual ha generado un considerable interés en mejorar su producción comercial eficiente (Gibson *et al.*, 2024). Las aplicaciones abarcan desde la alimentación de vehículos y negocios hasta su uso como medio de almacenamiento para las

nuevas fuentes de energía renovable emergentes (Nnabuife *et al.*, 2024).

El hidrógeno, siendo el elemento más simple y abundante en la Tierra, puede ser reciclado múltiples veces (Gibson *et al.*, 2024). Presenta una eficiente combustión, es ambientalmente amigable y de bajo contenido de carbono. Además, es almacenable, renovable y altamente aprovechable (Peng *et al.*, 2023). La cadena de suministro del hidrógeno (HSC, según sus siglas en inglés) abarca múltiples etapas, desde la producción hasta la distribución, integrando diversas fuentes y destinos finales. Para asegurar eficiencia y fiabilidad, se necesita un enfoque sistemático y bien estructurado (Khaligh *et al.*, 2024). Los productores de hidrógeno y las estaciones de servicio deben equilibrar su producción de hidrógeno con los requisitos de reducción de emisiones de carbono bajo políticas de límites máximos y comercio (Peng *et al.*, 2023). El amplio espectro de recursos disponibles para la producción de hidrógeno, que incluye diversos combustibles fósiles, biomasa y agua, junto con una variedad de métodos para su extracción, distribución y almacenamiento, representa un desafío considerable en la creación de una cadena de suministro eficiente (Ratner *et al.*, 2024). La forma más convencional de producir hidrógeno es a través del reformado con vapor de gas natural y este proceso implica la extracción del gas natural, su tratamiento mediante compresión y purificación, seguido de la conversión en hidrógeno y dióxido de carbono (Afanasev *et al.*, 2024). El almacenamiento de energía en forma de hidrógeno es ideal para integrarse eficientemente con la generación de energía renovable, además, es altamente valorado por su extensa capacidad de almacenamiento, ciclos prolongados y capacidad de respuesta rápida (Zhang *et al.*, 2024). Cuando se necesitan transportar grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias, el método más rentable y ambientalmente amigable es el transporte mediante tuberías (Ratner *et al.*, 2024).

La producción de hidrógeno ha recibido atención en todo el mundo y México no es la excepción. Una amplia revisión realizada por Ahn *et al.* (2023) presentó la producción de hidrógeno en México, destacando los avances y las investigaciones durante el periodo 2006-2016, donde el principal tema relacionado fue la generación de energía de procesos y residuos biológicos, y de combustibles convencionales y no convencionales, información confirmada por Afanasev *et al.*, (2024). México juega un papel crucial en la producción y exportación de hidrógeno, debido a su ubicación geográfica estratégica (Palacios *et al.*, 2024). Además, el país ha demostrado un compromiso firme en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, conforme a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, según sus siglas en inglés), con el objetivo de disminuir a la mitad estas emisiones para el año 2050 (de la Cruz-Soto *et al.*, 2024).

El uso de hidrógeno en las refinerías mexicanas representa más del 90 % del consumo nacional, siendo crucial para los procesos petroquímicos (Elvira *et al.*, 2022). El hidrógeno producido en México se comercializa, mientras que una parte significativa se utiliza para autoconsumo en plantas industriales (Palacios *et al.*, 2022). La Comisión Federal de Electricidad (CFE) genera el 38 % de su energía a partir de fuentes limpias y ha implementado un proyecto piloto de hidrógeno verde impulsado por energía solar en Sonora (México), considerando también a Baja California, como otro sitio potencial para esta iniciativa (Silva *et al.*, 2023).

De la misma manera, Colombia se beneficia de su ubicación geográfica estratégica como un punto crucial para el transporte de hidrógeno, actuando como un enlace entre Centroamérica y Sudamérica (Luna-del Risco *et al.*, 2024).

El potencial energético en Colombia tiene la capacidad de disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero originadas por los vertederos, con reducciones

estimadas entre el 46 % y el 92 % (Silva *et al.*, 2023). En el año 2019, Colombia registró una demanda total de energía de 374 teravatios/hora (TWh), de los cuales 153 TWh correspondieron al sector del transporte, en conjunto con el sector industrial, donde estos dos sectores económicos abarcaron casi el 65 % de la demanda total de energía (Rodríguez-Fontalvo *et al.*, 2024). En el año 2021, el gobierno colombiano presentó la “Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno” (HRNH), un documento que definió una serie de metas para la producción y uso de hidrógeno con bajas emisiones para el año 2030 (Plazas-Niño *et al.*, 2024). Además, Colombia formuló la “Política Nacional de Cambio Climático”, la cual detalló una estrategia completa para enfrentar los desafíos del cambio climático en áreas clave como la energía, el transporte, la agricultura y la silvicultura (Luna-del Risco *et al.*, 2024).

Ambos países están dedicados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como parte de sus estrategias nacionales para combatir el cambio climático. México y Colombia se han beneficiado de sus ubicaciones estratégicas para la producción y el transporte de hidrógeno; mientras que México juega un papel crucial en la producción y exportación de hidrógeno y Colombia actúa como un punto de conexión esencial entre Centroamérica y Sudamérica. En cuanto a la producción de hidrógeno verde, ambas naciones están haciendo avances significativos: México ha comenzado un proyecto piloto de hidrógeno verde utilizando energía solar y Colombia ha establecido objetivos en su HRNH para desarrollar hidrógeno con bajas emisiones.

Los sectores del transporte y la industria son vitales en ambos países en términos de demanda energética, es por ello que en México, estos sectores constituyen una gran parte del consumo de hidrógeno, mientras que en Colombia representan una porción importante de la demanda total de energía.

Dado que México y Colombia están progresando en la adopción y desarrollo de

tecnologías para producir hidrógeno verde, ambos enfrentan retos y oportunidades similares en sus regiones, por lo que es fundamental examinar las características compartidas en sus métodos y enfoques. Este análisis ayudará a descubrir patrones y estrategias que podrían mejorar la producción de hidrógeno en ambos países, consolidando así su contribución a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta: ¿qué características son similares en la producción de hidrógeno tanto en México como en Colombia?

Materiales y métodos

Para realizar la revisión de la literatura que responda a las diferencias y similitudes en la producción de hidrógeno, tanto en Colombia como en México se utilizaron bases de datos como ScienceDirect, Sage Journals, Taylor & Francis y Springer Link para la búsqueda de información. Estas bases de datos fueron elegidas debido a que contienen una vasta colección de revistas y artículos de alta calidad, también se definió un rango temporal para la investigación, que abarcó desde el año 2016 hasta el 2024. En la figura 1 se representa la metodología implementada para llevar a cabo la revisión de literatura.

La primera revisión fue de 83 artículos y consistió en analizar los títulos y los resúmenes, revisando brevemente el *abstract*, la introducción y la conclusión. Esta revisión necesitaba estar centrada completamente en el título y la pregunta de investigación. La revisión inicial tuvo como objetivo identificar todos los posibles artículos relacionados a esta investigación, por lo tanto, se excluyeron los que no hablaran de México ni de Colombia. Los artículos de investigación restantes se analizaron en la segunda ronda de la revisión. Para los 56 artículos restantes, se excluyeron aquellos que no hablaran sobre temas relacionados al hidrógeno como fuente de energía no convencional. Así, los artículos seleccionados, después de la segunda ronda, fueron 24.

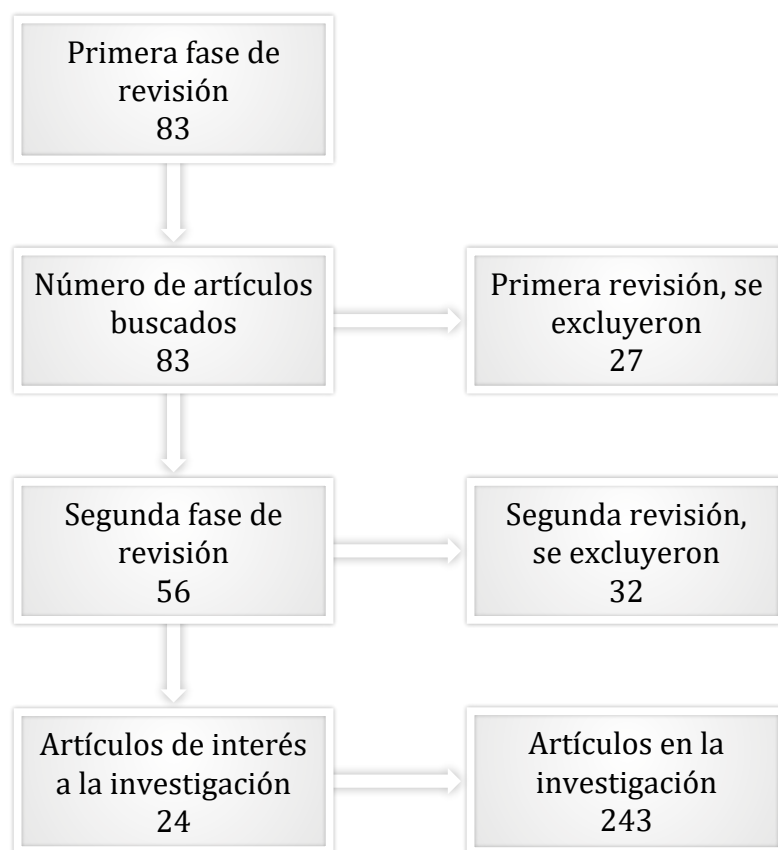


Figura 1. Metodología implementada para la revisión

Fuente: elaboración propia.

En primera instancia, se determinaron los parámetros para la creación del título, el cual abarcó los distintos temas que se abordaron en el trayecto del presente artículo: producción, hidrógeno, logística, transporte, almacenamiento y usos. En segunda instancia, se realizó la búsqueda de artículos que contuvieran la presencia de palabras clave de los temas anteriores. Quedando de la siguiente manera:

- “Hydrogen as a non-conventional source”
- “Hydrogen Supply Chain in Colombia and Mexico”
- “Production, transportation and distribution of non-conventional energy”

- “Non-conventional energy sources”

En tercera estancia se realizaron criterios de exclusión para proporcionar artículos de investigación que fueran más relevantes y específicos sobre los temas planteados. El proceso de revisión fue más exhaustivo, dado que los artículos tenían que estar ligados con el título y la pregunta de investigación.

Resultados

Como se muestra en la tabla 1, en el campo de la producción de hidrógeno, México y Colombia han estado realizando progresos notables, reflejando sus estrategias y ventajas geográficas (Nnabuike *et al.*, 2024). México ha

llevado a cabo una revisión exhaustiva de su producción de hidrógeno desde el año 2006, con una actualización en el 2016 que resaltó los avances y la investigación en este ámbito (Saha *et al.*, 2024). Dicho país ha jugado un papel fundamental en la producción y exportación de hidrógeno, aprovechando su ubicación geográfica estratégica, por lo que el hidrógeno producido en México se comercializa de manera extensa, con una parte importante destinada al autoconsumo en plantas industriales. Este recurso es esencial para los procesos petroquímicos en las refinerías mexicanas, donde representa más del 90 % del consumo nacional (Elvira *et al.*, 2022). Además, la CFE ha lanzado un proyecto piloto de hidrógeno verde en Sonora, impulsado por energía solar, marcando un avance importante hacia una producción de hidrógeno más sostenible y diversificada en el país (Gibson *et al.*, 2024).

En cuanto a Colombia, el desarrollo del sector de hidrógeno también está en progreso (Plazas-Niño *et al.*, 2024.; Luna-del Risco *et al.*, 2024). En el año 2021, el Gobierno colombiano presentó la HRNH, estableciendo metas para la producción y el uso de hidrógeno con bajas emisiones para el año 2030. Este plan se enmarcó en la Política Nacional de Cambio Climático, que abordó una estrategia integral para enfrentar desafíos en áreas clave como la energía, el transporte, la agricultura y la silvicultura (Afanasev *et al.*, 2024). La ubicación geográfica estratégica de Colombia le proporciona una ventaja significativa, sirviendo como un punto clave para el transporte de hidrógeno entre Centroamérica y Sudamérica, lo que refuerza su posición en el mercado regional y en la producción y distribución de hidrógeno (Khaligh *et al.*, 2024).

Tabla 1. Producción de hidrógeno

Autor	Año	Método principal	Hidrógeno verde	Hidrógeno azul	Hidrógeno gris	Comentarios
Nnabuife <i>et al.</i>	2024	Electrólisis	✓	✗	✗	Se enfoca en la electrólisis con energías renovables.
Saha <i>et al.</i>	2024	Reformado de metano y electrólisis	✓	✓	✓	Discute varios métodos de producción, incluyendo ccus para hidrógeno azul.
Gibson <i>et al.</i>	2024	Reformado de metano	✓	✗	✓	Menciona la producción actual, predominante de hidrógeno gris.
Afanasev <i>et al.</i>	2024	Reformado con vapor	✓	✓	✓	Presenta una visión general de los métodos de producción del hidrógeno.
Khaligh <i>et al.</i>	2024	Reformado con electrólisis	✓	✓	✓	Planeación de la cadena de suministro

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla 2, en el ámbito del transporte, tanto México como Colombia están comenzando a explorar el potencial del hidrógeno, aunque con enfoques y etapas de desarrollo diferentes (Peng *et al.*, 2023). México ha utilizado el hidrógeno principalmente en el sector petroquímico, pero está empezando a considerar su uso en el transporte. Un ejemplo de este cambio es el proyecto piloto de hidrógeno verde en Sonora, que busca introducir el hidrógeno como una alternativa viable para vehículos eléctricos y otros sistemas de transporte (Saha *et al.*, 2024). Este enfoque emergente refleja el interés creciente del país en diversificar las aplicaciones del hidrógeno más allá de su uso tradicional

en la industria petroquímica (Hermesmann *et al.*, 2023).

En contraste, Colombia está centrada en desarrollar estrategias y políticas para incorporar el hidrógeno en el transporte como parte de su HRNH (Ratner *et al.*, 2024). La demanda de energía en el sector del transporte es significativa y la posición estratégica de Colombia en la región le brinda la oportunidad de desempeñar un papel clave en la expansión del hidrógeno (Raj *et al.*, 2024), por lo que el país está estableciendo un marco estratégico que busca posicionarlo como una alternativa limpia y eficiente para el transporte en el futuro (Toribio, 2024).

Tabla 2. Transporte de hidrógeno

Autor	Año	Transporte por tuberías	Transporte por camiones	Métodos alternativos	Comentarios
Ratner <i>et al.</i>	2024	✓	✗	Barcos, ferrocarril	Recomiendan las tuberías como el método más eficiente para larga distancia.
Saha <i>et al.</i>	2024	✓	✓	Líquido criogénico	Destacan la flexibilidad de transporte en camiones y tuberías.
Peng <i>et al.</i>	2023	✓	✗	Líquido criogénico	Se enfocan en métodos de transporte eficiente y seguro.
Raj <i>et al.</i>	2024	✓	✗	Ammonia, cilindros de gas comprimido	Exploran las propiedades del flujo de hidrógeno en las tuberías.
Pereira <i>et al.</i>	2024	✓	✓	Barcos, camiones	Los costos de producción de hidrógeno varían según la ubicación.
Toribio	2024	✓	✓	Barcos, camiones	Disolución del hidrógeno.

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 3, en el campo del almacenamiento de energía, tanto México como Colombia están empezando a aprovechar el hidrógeno, aunque se encuentran en diferentes fases de desarrollo y con distintos métodos (J. Zhu *et al.*, 2024; Ahn *et al.*, 2023)..

México ha estado explorando el hidrógeno, principalmente como una solución para el almacenamiento de energía, destacando su extensa capacidad en esta área y su integración con la generación de energía renovable. El proyecto piloto de hidrógeno verde en Sonora

(México) es un ejemplo concreto de los esfuerzos del país para demostrar la viabilidad y eficacia de estas capacidades en la práctica (Chi *et al.*, 2024). Por su parte, Colombia, aunque aún se encuentra en una etapa de desarrollo, está centrada en la reducción de emisiones y en el almacenamiento de energía mediante el hidrógeno, como parte de su estrategia nacional. La HRNH y la ubicación geográfica del país juegan un papel crucial en la formulación de sus estrategias para el almacenamiento de energía (Zhang *et al.*, 2024; Zhu, Du *et al.*, 2024).

Tabla 3. Almacenamiento de hidrógeno

Autor	Año	Almacenamiento en tubos	Almacenamiento criogénico	Otros métodos	Comentarios
Peng <i>et al.</i>	2023	✓	✓	Salinas, cavernas	Consideran la versatilidad del hidrógeno para el almacenamiento.
Zhang <i>et al.</i>	2024	✓	✓	Procesos termoquímicos basados en hierro	Discuten sobre nuevas tecnologías de almacenamiento.
Gibson <i>et al.</i>	2024	✓	✓	Cilindros, tanques	Hablan sobre la seguridad y eficiencia del almacenamiento.
Zhu, Du <i>et al.</i>	2024	✓	✓	Sistema de almacenamiento en cascada (CHSS, según sus siglas en inglés)	Proponen mejorar la eficiencia de suministro de hidrógeno.
Chi <i>et al.</i>	2024	✓	✓	SHM para tanques de almacenamiento de hidrógeno	La tecnología de monitoreo de salud estructural (SHM, según sus siglas en inglés) es clave para garantizar la seguridad y eficiencia de los tanques.

Zhu, Liu <i>et al.</i>	2024	✓	✓	Seguridad en almacenamiento de hidrógeno	Se utiliza la tecnología de transductores flexibles debido a sus propiedades y perfil.
---------------------------	------	---	---	--	---

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4 se menciona que, en el ámbito de la cadena de suministro de hidrógeno, tanto México como Colombia están avanzando, aunque se encuentran en diferentes etapas de desarrollo y con enfoques variados (Khaligh *et al.*, 2024).

México dispone de una cadena de suministro de hidrógeno más consolidada, centrada en la producción a través del reformado de gas natural. Este país está en proceso de desarrollar infraestructura para el almacenamiento y la distribución del hidrógeno, con un enfoque particular en proyectos de hidrógeno verde (Silva

et al., 2023); sin embargo, enfrenta desafíos relacionados con la integración de métodos de producción y la expansión de su infraestructura (Ratner *et al.*, 2024). En contraste, Colombia está trabajando en el desarrollo de su cadena de suministro de hidrógeno, enfocándose en la producción, el almacenamiento y el transporte del recurso (Lam *et al.*, 2019; Saha *et al.*, 2024). Su ubicación estratégica le ofrece ventajas para la distribución regional de hidrógeno, no obstante, también enfrenta desafíos similares en la integración de recursos y en el desarrollo de la infraestructura necesaria (El-Sayed *et al.*, 2024).

Tabla 4. Cadena de suministro de hidrógeno

Autor	Año	Producción	Transporte	Almacenamiento	Comentarios
Ratner <i>et al.</i>	2024	✓	✓	✓	Abordan los desafíos de la cadena de suministro
Khaligh <i>et al.</i>	2024	✓	✓	✓	Proponen un enfoque sistemático para mejorar la eficiencia
Saha <i>et al.</i>	2024	✓	✓	✓	Analizan la infraestructura existente y futura necesaria.
Lam <i>et al.</i>	2019	✓	✓	✓	Utilizan un enfoque de modelado de redes para analizar los factores de riesgo y efectos en incidentes logísticos.
El-Sayed <i>et al.</i>	2024	✓	✓	✓	Enfocan la planificación conjunta de la cadena de suministro de hidrógeno y el refuerzo de la red de distribución eléctrica

Fuente: elaboración propia.

Conclusión

México y Colombia, en su esfuerzo por transitar hacia una economía energética más sostenible, están adoptando el hidrógeno como una solución clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar sus fuentes de energía. Ambos países muestran un compromiso significativo con la sostenibilidad ambiental, reflejado en el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y la implementación de tecnologías de captura de carbono para producir hidrógeno azul. A pesar de enfrentar desafíos similares, como la necesidad de mejorar la infraestructura para el almacenamiento y la distribución del hidrógeno, así como la integración eficiente de fuentes renovables, ambos países están avanzando en la diversificación de sus métodos de producción y en la identificación de aplicaciones clave en los sectores industrial y de transporte. Este enfoque compartido y la voluntad de explorar colaboraciones internacionales destacan la importancia de las estrategias de hidrógeno en sus planes de desarrollo energético.

Para avanzar en el desarrollo de la industria del hidrógeno en México y Colombia, es esencial implementar políticas públicas y subsidios que promuevan la inversión en tecnologías limpias y en la infraestructura necesaria. También es importante establecer programas de capacitación técnica para formar una fuerza laboral calificada en la producción y manejo del hidrógeno. Adicionalmente, apoyar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías mejorará la eficiencia y reducirá los costos de producción. Asimismo, se deben implementar sistemas de monitoreo y evaluación para garantizar la transparencia y efectividad de los proyectos. Finalmente, fortalecer las colaboraciones internacionales facilitará el intercambio de conocimientos y recursos, acelerando así el desarrollo de proyectos de hidrógeno y contribuyendo a una transición energética más sostenible.

Referencias

- Afanasev, P., Askarova, A., Alekhina, T., Popov, E., Markovic, S., Mukhametdinova, A., Cheremisin, A. y Mukhina, E. (2024). An overview of hydrogen production methods: Focus on hydrocarbon feedstock. *International Journal of Hydrogen Energy*, 78, 805-828. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.369>
- Ahn, S. Y., Kim, K. J., Kim, B. J., Hong, G. R., Jang, W. J., Bae, J. W., Park, Y. K., Jeon, B. H. y Roh, H. S. (2023). From gray to blue hydrogen: trends and forecasts of catalysts and sorbents for unit process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186, 113635. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113635>
- Caliskan, A. y Percin, H. B. (2024). Techno-economic analysis of a campus-based hydrogen-producing hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 75, 428-437. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.140>
- Chi, G., Xu, S., Yu, D., Wang, Z., He, Z., Wang, K. y Zhou, Q. (2024). A brief review of structural health monitoring based on flexible sensing technology for hydrogen storage tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 80, 980-998. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.215>
- de la Cruz-Soto, J., Azkona-Bedia, I., Cornejo-Jimenez, C. y Romero-Castanon, T. (2024). Assessment of levelized costs for green hydrogen production for the national refineries system in Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, 108, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.316>
- El-Sayed, W. T., Awad, A. S. A., Al-Abri, R., Alawasa, K., Onen, A. y Ahshan, R. (2024). Integrated planning of hydrogen supply chain and reinforcement of power distribution

network for accommodating fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 81, 865-877. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.316>

- Elvira, K., Marisol, R., Susanne, H., Leif-Magnus, J., Sandoval-Pineda, J. M. y Gonzalez-Huerta, R. de G. (2022). Hydrogen technology for supply chain sustainability: The Mexican transportation impacts on society. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 29999-30011. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.081>
- Gibson, J. J., Eby, P. y Jaggi, A. (2024). Natural isotope fingerprinting of produced hydrogen and its potential applications to the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 66, 468-478. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.077>
- Hermesmann, M., Tsiklios, C. y Müller, T. E. (2023). The environmental impact of renewable hydrogen supply chains: local vs. remote production and long-distance hydrogen transport. *Applied Energy*, 351, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121920>
- Khaligh, V., Ghezelbash, A., Liu, J., Won, W., Koo, J. y Na, J. (2024). Multi-period hydrogen supply chain planning for advancing hydrogen transition roadmaps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200, 114536. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114536>
- Kim, T., Jang, J. S. y Kwon, H. Y. (2024). Correlation-driven multi-level learning for anomaly detection on multiple energy sources. *Applied Soft Computing*, 159, 111636. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111636>
- Kumar, R., Kumar, A. y Pal, A. (2020). An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5353-5359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.793>
- Lam, C. Y., Fuse, M. y Shimizu, T. (2019). Assessment of risk factors and effects in hydrogen logistics incidents from a network modeling perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 20572-20586. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.187>
- Luna-del Risco, M., Mendoza-Hernández, S., Da Rocha Meneses, L., González-Palacio, M., Arrieta González, C. y Sierra-Del Rio, J. (2024). Geospatial analysis of hydrogen production from biogas derived from residual biomass in the dairy cattle and porcine subsectors in Antioquia, Colombia. *Renewable Energy Focus*, 50, 100591. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100591>
- Nnabuife, S. G., Hamzat, A. K., Whidborne, J., Kuang, B. y Jenkins, K. W. (2024). Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: a technology review for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.342>
- Obiora, N. K., Ujah, C. O., Asadu, C. O., Kolawole, F. O. y Ekwueme, B. N. (2024). Production of hydrogen energy from biomass: Prospects and challenges. *Green Technologies and Sustainability*, 2(3), 100100. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100100>
- Palacios, A., Cordova-Lizama, A., Castro-Olivera, P. M., & Palacios-Rosas, E. (2022). Hydrogen production in Mexico: state of the art, future perspectives, challenges, and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30196-30212. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.009>
- Palacios, A., Martins, R., Palacios-Rosas, E., Castro-Olivera, P. M., Oros, A., Lizcano, F., Poblano,

- D., Enciso, A. y Bonilla, H. (2024). Hydrogen in Mexico: A technical and economic feasibility perspective for the transition to a hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 108, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.116>
- Peng, W., Xin, B. y Xie, L. (2023). Optimal strategies for production plan and carbon emission reduction in a hydrogen supply chain under cap-and-trade policy. *Renewable Energy*, 215, 118960. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118960>
- Pereira, J., Souza, R., Oliveira, J. y Moita, A. (2024). Hydrogen production, transporting and storage processes - a brief review. *Clean Technologies*, 6(3), 1260-1313. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6030061>
- Perez, A. y García-Rendon, J. J. (2021). Integration of non-conventional renewable energy and spot price of electricity: a counterfactual analysis for Colombia. *Renewable Energy*, 167, 146-161. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.067>
- Plazas-Niño, F. A., Yeganyan, R., Cannone, C., Howells, M., Borba, B. y Quirós-Tortós, J. (2024). Open energy system modelling for low-emission hydrogen roadmap planning: the case of Colombia. *Energy Strategy Reviews*, 53, 101401. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101401>
- Raj, A., Larsson, I. A. S., Ljung, A. L., Forslund, T., Andersson, R., Sundström, J. y Lundström, T. S. (2024). Evaluating hydrogen gas transport in pipelines: current state of numerical and experimental methodologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 136-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.140>
- Ratner, S., Sergi, B. S. y Gomonov, K. (2024). Eco-efficiency of hydrogen supply chains: NDEA-based approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 73, 598-608. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.053>
- Rodríguez-Fontalvo, D., Quiroga, E., Cantillo, N. M., Sánchez, N., Figueredo, M. y Cobo, M. (2024). Green hydrogen potential in tropical countries: the Colombian case. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 344-360. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.320>
- Saha, P., Akash, F. A., Shovon, S. M., Monir, M. U., Ahmed, M. T., Khan, M. F. H., Sarkar, S. M., Islam, K., Hasan, M., Vo, D. V. N., Aziz, A. A., Hossain, M. J. y Akter, R. (2024). Grey, blue, and green hydrogen: a comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy. *International Journal of Green Energy*, 21(6), 1383-1397. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2244583>
- Silva, J. A., Saló-Salgado, L., Patterson, J., Dasari, G. R. y Juanes, R. (2023). Assessing the viability of CO2 storage in offshore formations of the Gulf of Mexico at a scale relevant for climate-change mitigation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 126, 103884. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103884>
- Toribio, J. (2024). Role of diffusion in the hydrogen transport in pearlitic steel: interactions between crack-tip plasticity and hydrogen. A tribute to T.S. Eliot's "And All is Always Now". *Procedia Structural Integrity*, 59, 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.016>
- Uzair Ayub, H. M., Alnouri, S. Y., Stijepovic, M., Stijepovic, V. y Hussein, I. A. (2024). A cost comparison study for hydrogen production between conventional and renewable methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 921-932. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.080>

- Zhang, Z., Turap, Y., Wang, Y., Wang, Y., Wang, Z. y Wang, W. (2024). Study on the impact of hydrogen storage temperature on iron-based thermochemical hydrogen storage technology. *Chemical Engineering Journal*, 490, 151536. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151536>
- Zhu, J., Liu, H., Kong, J., Wang, J., Ji, W., Wei, Z., Yao, X. y Wang, X. (2024). Exploring hydrogen storage safety research by bibliometric analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 81, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.285>
- Zhu, S., Du, B., Lu, X., Xie, C., Li, Y., Huang, Y., Zhang, L. y Zhao, B. (2024). Design and optimization of a cascade hydrogen storage system for integrated energy utilization. *Journal of Energy Storage*, 96, 112732. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112732>