

## Del agua a la energía: Cómo funciona la cadena de valor del hidrógeno

Pablo Eduardo Baltazar-Victoria <sup>1,\*</sup>, María de La Luz Valderrábano-Almegua <sup>2</sup>, René Hernández-Mendoza <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE-IPN), Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, c. p. 07738, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD-IPN), Calle 30 de Junio de 1520, Barrio la Laguna Ticomán, c. p. 07340, Ciudad de México, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3227-9750>. Proyecto SIP: 20240905.

<sup>3</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE-IPN), Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, c. p. 07738, Ciudad de México, México.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7147-7700>.

\* Autor de correspondencia: [pbaltazarv1600@alumno.ipn.mx](mailto:pbaltazarv1600@alumno.ipn.mx), Tel.: (+52) 7224197254

### Artículo de divulgación científica

Recibido: 28 de octubre de 2024

Aceptado: 27 de noviembre de 2024

Publicado: 30 de noviembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.313>

**Resumen:** Este artículo ofrece una descripción completa de la cadena de valor del hidrógeno, desde la producción hasta sus aplicaciones en las industrias más importantes. Se analiza la información más reciente publicada en libros, informes y artículos científicos para exponer las ventajas, retos y oportunidades que tienen las principales alternativas de obtención de hidrógeno; electrólisis y reformado de gas natural con captura, uso y almacenamiento de carbono. El análisis incluye el estudio comparativo de las tecnologías disponibles, materias primas, utilización de energía proveniente de otras fuentes, servicios auxiliares, huella de carbono, costos de producción y la estimación de su correspondiente viabilidad tecnológica en el corto plazo. Tomando como base de referencia los datos actuales disponibles de producción y consumo de hidrógeno, el artículo presenta una prospectiva de los porcentajes a nivel mundial de producción y consumo de hidrógeno como vector energético que corresponderían a cada alternativa analizada. En cuanto a las aplicaciones, el artículo examina el uso del hidrógeno en la industria química, producción de acero y transporte vehicular mediante celdas de combustible. Las políticas gubernamentales de descarbonización y la búsqueda de alternativas sustentables son factores de importancia que impulsan la investigación científica y tecnológica del uso generalizado del hidrógeno como energético. Se concluye que, con el apoyo adecuado en inversiones y tecnología, y políticas públicas correctamente dirigidas a su desarrollo y aplicación, el hidrógeno puede desempeñar un papel esencial en la transición hacia un futuro energético limpio y sostenible.

**Palabras clave:** hidrógeno verde y azul; cadena de valor del hidrógeno; transición energética; descarbonización global; vector energético

### Introducción

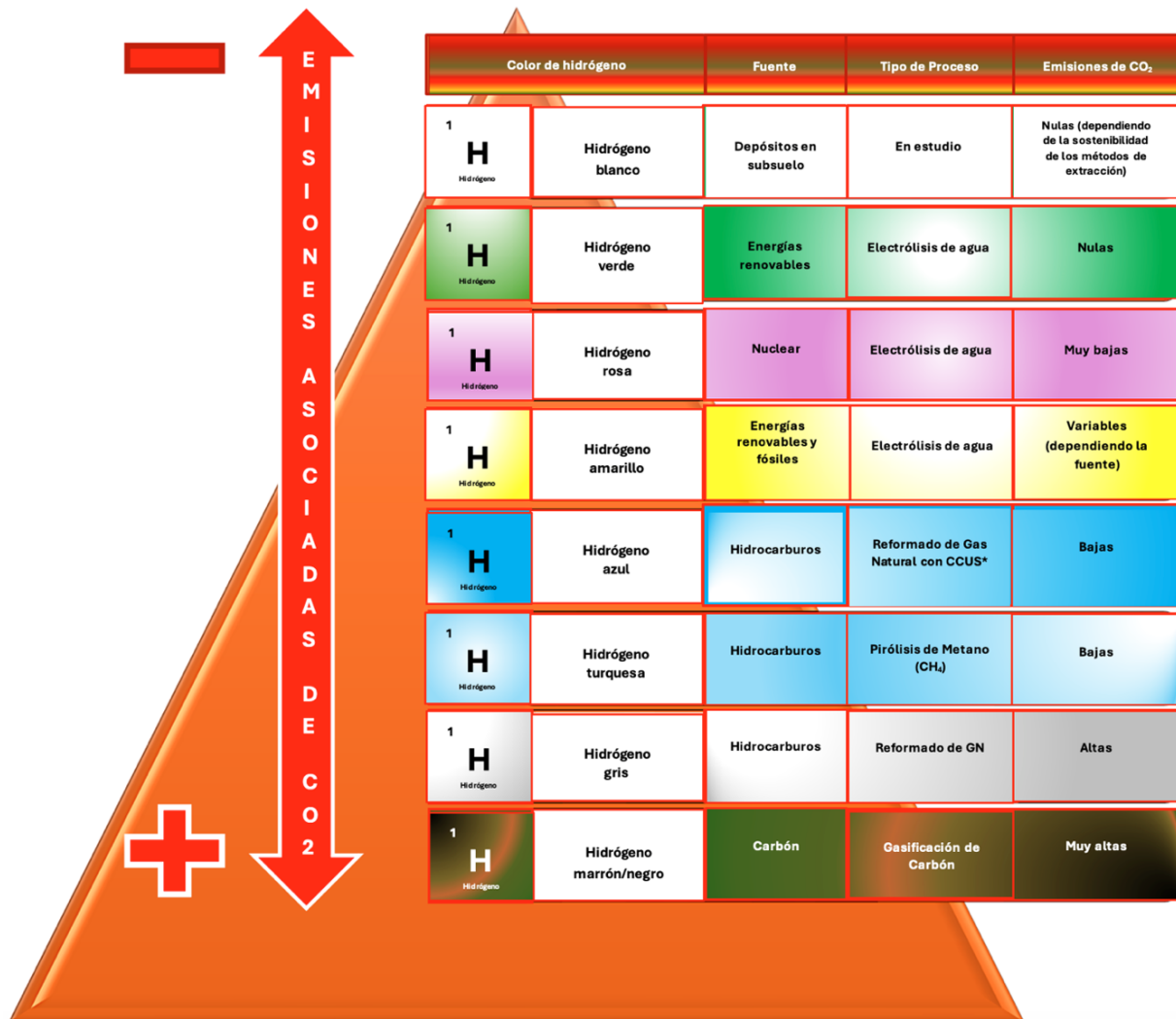
En el combate contra el cambio climático, descarbonizar las emisiones antropogénicas hacia el ecosistema es uno de los retos más relevantes de la actualidad. A medida que el mundo intensifica sus intentos de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y gases fluorados (HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) (United States Environmental Protection Agency, 2022), el hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>) se ha considerado como una de las mejores alternativas hacia el uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles. Es de especial importancia mencionar que, aun cuando es tan común encontrar este elemento en el Universo, aproximadamente el 75% de la masa elemental del Cosmos está compuesto exclusivamente por este elemento (Draine, 2011), no se encuentra presente en cantidad apreciable en la atmósfera terrestre, debido a que, por su peso molecular tan bajo, el elemento tiende a escapar fácilmente de la atmósfera de nuestro planeta (Catling & Kasting, 2017). Es por esta razón que, para producirlo, sea necesario recurrir a procesos químicos que permitan separarlo de las moléculas de diversos compuestos en los que está ligado a otras especies atómicas, por ejemplo, el agua (H<sub>2</sub>O) o hidrocarburos como el gas natural (GN).

El principal atractivo del hidrógeno radica en que puede funcionar como un vector energético (es decir, como una sustancia que es capaz de almacenar, transportar y distribuir energía cuándo y dónde se necesite) (Ball & Wietschel, 2009), y, además, como un combustible con muy bajas, e inclusive nulas, emisiones de gases de efecto invernadero, dependiendo de la tecnología de producción.

Existen distintos métodos y tecnologías para la producción de hidrógeno, caracterizados por utilizar una fuente y un proceso específico. De acuerdo con la fuente, el proceso y el impacto ambiental que genera, un determinado proceso de obtención de hidrógeno puede clasificarse mediante un color. Así, es posible designar distintos colores de

hidrógeno, tales como: hidrógeno verde, hidrógeno azul, hidrógeno gris, hidrógeno marrón o negro e hidrógeno turquesa. Algunos otros colores del hidrógeno menos conocidos, pero no por ello menos importantes, son: el hidrógeno amarillo (que se obtiene por medio de la electrólisis del agua usando corriente eléctrica proveniente tanto de fuentes de energías renovables como de no renovables), hidrógeno rosa (se obtiene por medio de la electrólisis del agua usando corriente eléctrica proveniente de centrales nucleares). Y, finalmente, hidrógeno blanco (este se encuentra naturalmente en el subsuelo terrestre, y su producción aún está siendo objeto de estudio).

En la Figura 1 se muestra la clasificación de los distintos tipos de hidrógeno, su fuente, proceso de producción principal y el impacto ambiental que generan.



	Color de hidrógeno	Fuente	Tipo de Proceso	Emisiones de CO <sub>2</sub>
1	Hidrógeno blanco	Depósitos en subsuelo	En estudio	Nulas (dependiendo de la sostenibilidad de los métodos de extracción)
1	Hidrógeno verde	Energías renovables	Electrólisis de agua	Nulas
1	Hidrógeno rosa	Nuclear	Electrólisis de agua	Muy bajas
1	Hidrógeno amarillo	Energías renovables y fósiles	Electrólisis de agua	Variables (dependiendo la fuente)
1	Hidrógeno azul	Hidrocarburos	Reformado de Gas Natural con CCUS*	Bajas
1	Hidrógeno turquesa	Hidrocarburos	Pirólisis de Metano (CH <sub>4</sub> )	Bajas
1	Hidrógeno gris	Hidrocarburos	Reformado de GN	Altas
1	Hidrógeno marrón/negro	Carbón	Gasificación de Carbón	Muy altas

\*Nota: Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (Carbon, Capture, Use and Storage, CCUS, por sus siglas en inglés) son una serie de tecnologías con el objetivo de capturar las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de Industrias que utilizan energías fósiles, almacenándolo en depósitos o formaciones subterráneas, o bien, para distintas aplicaciones industriales, como la fabricación de polímeros, combustibles sintéticos o en el campo de la construcción.

Figura 1. Clasificación del Hidrógeno Según su Fuente, Proceso de Producción y Emisiones de CO<sub>2</sub>, Asociadas.  
Fuente: Elaboración propia con base en información de investigación documental realizada.

Actualmente hay retos importantes que resolver para convertir al hidrógeno en una alternativa técnica y económicamente viable en la transición energética, uno de los principales consiste en que es más complicado de almacenar y transportar en comparación con otros combustibles fósiles, como los son el diésel y la gasolina.

El propósito principal de este artículo es describir la cadena de valor del hidrógeno, etapa por etapa, explorando paso a paso sus desafíos tecnológicos, logísticos y económicos, destacando las principales oportunidades existentes. Se

tratará de mostrar cómo el átomo más simple puede ser la clave para lograr un futuro energético más limpio y seguro para todos.

## Desarrollo

### *De la Materia Prima a la Energía Limpia: La Producción de Hidrógeno*

Para el año 2023, la producción de hidrógeno alcanzó una cifra de 97 millones de toneladas (Mt), esto representó un aumento del 2.5% en comparación con el año anterior. Sin embargo, solo el 1% de la producción mundial provino de procesos con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente del tratamiento de combustibles fósiles usando tecnologías de Captura, Utilización y Almacenaje de Carbono, o CCUS, por sus siglas en inglés), esto representa poco menos de 1 millón de toneladas de hidrógeno producidas por año (Mtpa-H<sub>2</sub>). No obstante, si hablamos de la producción de hidrógeno sin emisiones de CO<sub>2</sub>, es decir, del que proviene exclusivamente de la electrólisis, la situación empeora mucho más, ya que para el mismo año se produjeron tan solo 100 mil toneladas de hidrógeno (kt-H<sub>2</sub>); una cantidad muy pequeña si la comparamos con procesos sin captura de CO<sub>2</sub>. Además, se espera que, para finales de 2024, la producción total de hidrógeno en el mundo sea de, aproximadamente, 100 millones de toneladas (Mt) (International Energy Agency [IEA], 2024).

En la Figura 2 se detallan las Millones de toneladas de Hidrógeno producidas (Mt-H<sub>2</sub>) y las principales tecnologías utilizadas a nivel mundial, así como los distintos escenarios que se han planteado para evaluar y analizar el Sistema Energético Mundial en las próximas décadas. Se han establecido tres escenarios: 1. Escenario de Políticas Declaradas (Stated Policies Scenario, STEPS, por sus siglas en inglés), este se basa en las políticas que existen actualmente y refleja cómo se desarrollaría el sistema sin que se aprueben nuevas políticas y/o medidas; 2. Escenario de Políticas o Compromisos Anunciados (Announced Pledges Scenario o APS), representa el escenario en donde todos los países cumplen a cabalidad sus promesas energéticas y climáticas anunciadas; 3. Escenario de Emisiones Netas Cero (Net Zero Emissions Scenario, NZE, por sus siglas en inglés), plantea un escenario de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2050, con el objetivo de que el incremento de la temperatura media global no sobrepase los 1.5 °C con respecto a los niveles de la época pre-industrial.

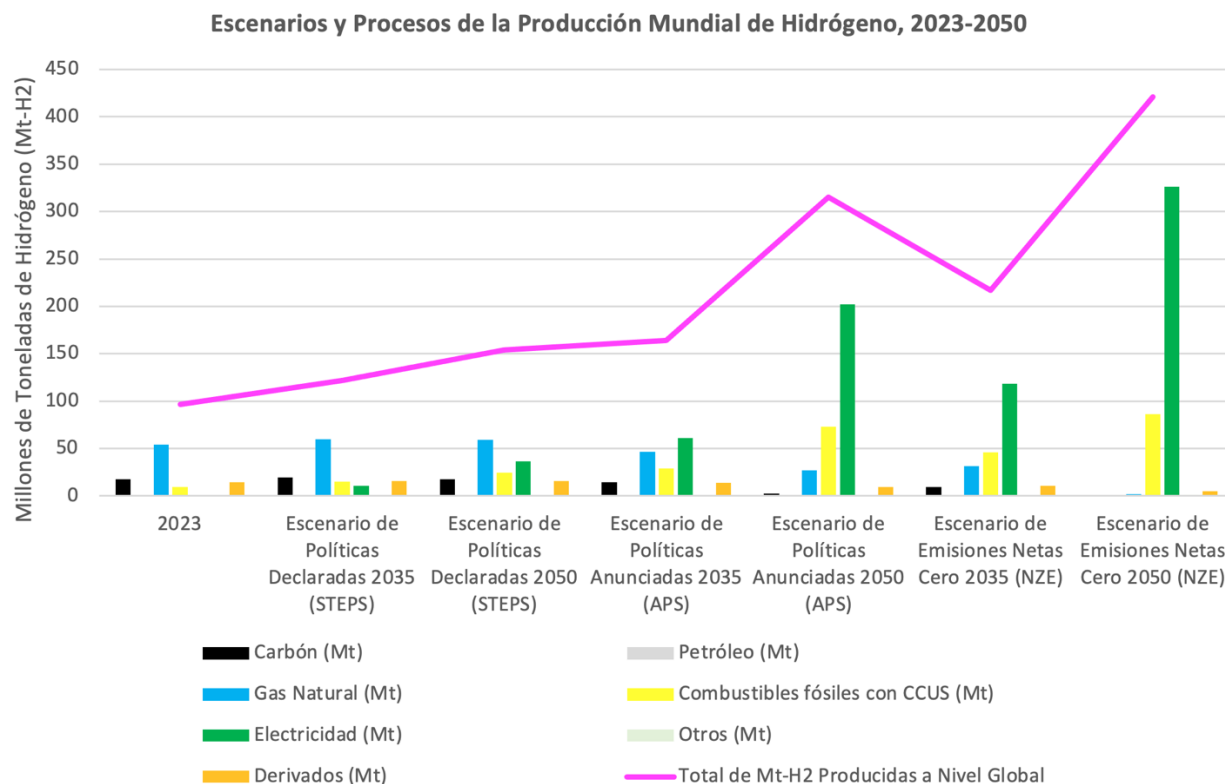


Figura 2. Escenarios y Procesos de la Producción Mundial de Hidrógeno, 2023-2050.  
 Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de International Energy Agency (2024).

Hoy por hoy, como es posible observar, la mayor parte del hidrógeno que se produce en el mundo proviene de procesos que generan bastante contaminación, estos métodos se basan principalmente en el tratamiento de gas natural, carbón, así como de residuos provenientes de refinerías y de la industria petroquímica. Y una parte muy pequeña se produce por medio de tecnologías no contaminantes (como lo es la electrólisis).

A continuación, se presentarán los 2 principales métodos de producción de hidrógeno, sus aspectos técnicos más importantes, así como sus retos y oportunidades.

### *Electrólisis del Agua (H<sub>2</sub>O): El Hidrógeno Verde*

La electrólisis del agua es un método que utiliza electricidad proveniente de fuentes de energía renovables, como los son, principalmente, la eólica y solar, para dividir las moléculas del agua en hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>), generando el llamado hidrógeno verde, este es una tecnología 100% libre de emisiones de carbono. La electrólisis ocurre en un dispositivo llamado electrolizador, que está compuesto por dos electrodos (llamados ánodo y cátodo) sumergidos dentro de un electrolito, donde la corriente eléctrica facilita la separación de los átomos de hidrógeno y oxígeno.

Existen principalmente 3 tipos de tecnologías, la primera es la electrólisis alcalina, esta utiliza un electrolito líquido, compuesto por hidróxido de sodio (NaOH) o potasio (KOH), en donde el agua se descompone a temperaturas de entre 70 y 90 °C, esta tecnología tiene la virtud de que es barata, pero tiene la desventaja de que es menos eficiente que las siguientes dos. La electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM, por sus siglas en inglés) es mucho más eficiente, ya que utiliza una membrana de polímero que permite la transferencia de protones [H<sup>+</sup>], sin embargo, su costo económico para producir hidrógeno es mucho más elevado, esta tecnología opera entre 50 y 80 °C. Y, finalmente, tenemos la electrólisis por óxido sólido (SOEC), esta tecnología opera a temperaturas mucho más elevadas, de entre 500 y 850 °C (Rashid, Al Mesfer, Naseem, & Danish, 2015)., lo que permite producir más hidrógeno, consumiendo una menor cantidad de electricidad, sin embargo, requiere de equipos más especiales para poder operar.

En promedio, se necesitan aproximadamente 9 litros de agua y entre 50 y 55 kilovatios-hora (kWh) de electricidad para producir 1 kg de hidrógeno mediante electrólisis. Esto quiere decir que, para producir 1 kg de hidrógeno, se necesitaría de 5 a 6 días del consumo de electricidad de una casa promedio con 4 personas (el consumo diario promedio de una casa es de 8 a 10 kWh). Estas tecnologías cuentan con mucho potencial, sin embargo, el principal reto que tienen es su excesivo costo de producción, de entre 3 y 7 USD/kg, en comparación con otros procesos. No obstante, en la actualidad, el panorama luce alentador, ya que se espera que la combinación de la reducción en los costos de las energías renovables, así como las mejoras tecnológicas, y el desarrollo de infraestructuras adecuadas y políticas favorables, sean las razones suficientes que provoquen que el precio de producir hidrógeno verde se reduzca hasta aproximadamente los 2 USD/kg para 2030 (International Energy Agency [IEA], 2024). La oportunidad que surge en este panorama es la capacidad para generar hidrógeno sin ningún tipo de emisiones de carbono, o de cualquier tipo de gases contaminantes, lo que representa una opción primordial para descarbonizar sectores industriales claves y de transporte que dependen, en demasía, de los combustibles fósiles convencionales.

### *Reformado con Vapor de Gas Natural: El Hidrógeno Gris y Azul*

El reformado del gas natural es el método más común para la producción de hidrógeno, este representó el 66% de la producción global de hidrógeno en 2023. Este tipo de tecnología consiste en convertir metano (CH<sub>4</sub>) en hidrógeno y dióxido de carbono (como un subproducto), por medio de una reacción con vapor de agua dentro de un reactor a temperaturas de operación de entre 700 a 1000 °C (Manoharan & Majlan, 2019; ) y presiones de 15 a 25 bar (Melaina *et al.*, 2013). La eficiencia de este proceso varía entre 65 y 75%, sin embargo, el reformado autotérmico (también llamado como Autothermal Reforming, ATR, por sus siglas en inglés), puede tener una eficiencia de hasta 80% de gas natural convertido (Rostrup-Nielsen & Christiansen, 2011). En general, a partir de aproximadamente 4.5 kg de gas natural y de 4 a 6 litros de agua, se puede producir 1 kg de hidrógeno (Melaina *et al.*, 2013). Es importante mencionar que, si durante el proceso el CO<sub>2</sub> residual no se captura, se dice entonces que se produce hidrógeno gris, el cuál tiene una enorme huella de carbono. Por ejemplo, según datos de la IEA (International Energy Agency) en 2023, el reformado de gas natural sin la captura de carbono residual generó la emisión a la atmósfera de 830 millones toneladas de CO<sub>2</sub>. En contrapartida, si se incorporan tecnologías de Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS), se dice

que se produce hidrógeno azul, y es posible reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 55 y 90%, dependiendo la eficiencia del proceso. De esta forma, se establece que si bien el hidrógeno azul es una solución de transición viable hacia una economía de bajo carbono, las tecnologías CCUS aun siguen siendo costosas para la industria y dependen de infraestructuras adicionales. No obstante, a pesar de los desafíos, el hidrógeno azul tiene la ventaja de aprovechar la infraestructura de gas natural ya existente, lo cual facilita su adopción a corto plazo. Dado lo anteriormente desarrollado, la tendencia es claramente la de aumentar la producción de hidrógeno verde en los próximos años, esto por el motivo de que es el único tipo de hidrógeno que no genera contaminación. Además, el hidrógeno azul está ganando mucha popularidad, dado que es una alternativa viable hacia una transición económica baja en carbono (International Energy Agency [IEA], 2024).

Adicionalmente, para complementar la información anterior, en la Tabla. 1, se realiza una comparativa de los principales colores de hidrógeno que se producen en el mundo, sus respectivas tecnologías de producción, así como la huella de carbono que generan, su costo actual en dólares estadounidenses por kilogramo (USD/kg), su viabilidad técnica futura, sus pros y contras, y la cantidad y el porcentaje que representa cada uno en la producción mundial de hidrógeno.

Tabla 1. Comparativa de los colores de hidrógeno que se produjeron en el mundo en 2023.

Color de Hidrógeno	Tecnología de Producción	Huella de Carbono	Costo Actual (USD/kg)	Viabilidad Técnica Futura	Ventajas	Desventajas	Millones de toneladas producidas en 2023	Porcentaje de la Producción Mundial en 2023
<b>Verde</b>	Electrólisis del agua con energía renovable	Cero emisiones si se utiliza energía renovable	3-7 USD	Alta: Se espera que los costos disminuyan significativamente para 2030	Cero emisiones, basado en energía renovable, potencial para descarbonizar completamente	Costo elevado actualmente, requiere grandes cantidades de electricidad renovable	< 1 Mt	< 1%
<b>Azul</b>	Reformado de gas natural con captura y almacenamiento de carbono (CCS)	Emisiones reducidas en un 55-90% dependiendo de la eficiencia del CCS	2-3 USD	Moderada: Viable si se mejoran las tecnologías de CCS	Emisiones reducidas con CCS, viabilidad a corto plazo para transición energética	Dependencia de gas natural, costoso debido a la tecnología de CCS	< 1 Mt	< 1%
<b>Gris</b>	Reformado de gas natural sin CCS	Alta: 830 millones de toneladas de CO <sub>2</sub> anuales a nivel mundial	1-2 USD	Baja: No sostenible a largo plazo debido a su impacto ambiental	Económico, tecnología ampliamente disponible	Alta huella de carbono, no viable para descarbonización	64 Mt	~66%
<b>Turquesa</b>	Pirólisis de metano	Baja: Sin emisiones de CO <sub>2</sub> , pero genera carbono sólido como subproducto	2.5-3.5 USD	Moderada: En desarrollo, podría ser prometedor si se escala	No genera CO <sub>2</sub> , subproducto útil (carbono sólido)	Costos elevados, tecnología aún en desarrollo	Muy pequeña fracción	< 1%
<b>Marrón/ Negro</b>	Gasificación de carbón	Muy alta: Gran cantidad de emisiones de CO <sub>2</sub>	1-2 USD	Baja: No sostenible debido a las altas emisiones	Bajo costo, materia prima abundante (carbón)	Altas emisiones de CO <sub>2</sub> , impacto ambiental severo	24 Mt	~24%
<b>Rosa</b>	Electrólisis del agua con energía nuclear	Emisiones bajas, pero dependencia de la energía nuclear	2-4 USD	Moderada: Dependiente de la aceptación y expansión de la energía nuclear	Bajas emisiones de carbono, producción continua con energía nuclear	Dependencia de la energía nuclear, que tiene sus propios desafíos	Muy pequeña fracción	< 1%

Fuente: elaboración propia con datos adaptados de Global Hydrogen Review 2024, Dincer & Acar, 2015; Rashid *et al.*, 2021; Schmidt *et al.*, 2019.

### *Almacenamiento y Transporte: Superando los Desafíos Logísticos*

En la actualidad el almacenamiento y el transporte de hidrógeno se enfrenta a desafíos técnicos y logísticos muy importantes, de hecho hoy el hidrógeno solo se produce en zonas donde se requiere o necesite, limitándose tan solo a transportarlo por camiones y tuberías (principalmente gasoductos, la opción más barata) a tan solo unos pocos cientos de kilómetros, principalmente entre países que son vecinos. No es extraño saber que en 2024, aún el comercio de hidrógeno puro ( $H_2$ ) sea muy pobre, comercializándose mayoritariamente en formas como amoníaco ( $NH_3$ ), metanol ( $CH_3-OH$ ), y fertilizantes, mayoritariamente.

Debido a la baja densidad del hidrógeno, de  $0.08988 \text{ kg/m}^3$  en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y  $20^\circ\text{C}$ ) (Lemmon, McLinden, & Friend, 2021)., y a su baja densidad energética en estado gaseoso, se provoca que para almacenar un bajo volumen de hidrógeno se tenga que hacer uso de un espacio demasiado grande, lo cual no es factible técnicamente. Por lo que, para resolver este problema, se opte por someterlo a procesos de compresión (a presiones de entre 350 a 700 bar) o licuefacción (a temperatura de  $-253.15^\circ\text{C}$  y 1 atm de presión) (Dincer & Acar, 2015)., lo cual ocasiona un alto consumo energético adicional y, en consecuencia, costos económicos más altos. Si hablamos del transporte, la infraestructura es todavía limitada, con solo 5,000 km de tuberías dedicadas al hidrógeno, éstas encontrándose en Estados Unidos y Europa, principalmente. Pero, se prevé que esta cifra se incremente notablemente para el año 2030, gracias a la expansión de la red y a que Europa planea desarrollar más de 40,000 km de ductos para 2035 (International Energy Agency [IEA], 2024).

El panorama del transporte de hidrógeno por mar, ya sea por medio de procesos como la licuefacción o por portadores de hidrógeno, como amoníaco o metanol, aún se queda muy corta; no obstante, a pesar de estos desafíos se espera que las exportaciones crezcan en Japón y Corea del Sur. La oportunidad de crecer la red de almacenamiento, se haya en algunas tecnologías emergentes, como lo son el almacenamiento subterráneo (por medio de cavernas de sal, de roca dura, de yacimientos agotados de petróleo y de acuíferos salinos), y el almacenamiento en hidruros metálicos, tecnologías que están siendo investigadas actualmente para permitir reforzar la eficiencia y la seguridad. Así pues, la necesidad de realizar importantes inversiones en las infraestructuras y los avances de las nuevas tecnologías, y de promover el apoyo de políticas públicas adecuadas para el desarrollo del hidrógeno en los distintos países, brindan enormes perspectivas para la superación de estos retos, permitiendo que el hidrógeno pase a desempeñar un papel clave en la matriz energética mundial.

### *Aplicaciones del Hidrógeno: Más allá del Combustible*

El hidrógeno, hoy en día, cuenta con muchas aplicaciones en la industria. Se utiliza, por ejemplo, en la industria química, para producir principalmente amoníaco, y en muchos procesos de la refinación del petróleo, como los son hidrodesulfuración (HDS), hidrotratamiento, hidrocrackeo, e isomerización. No obstante, es importante mencionar que el mayor potencial que tiene se halla justamente en la capacidad para descarbonizar sectores importantes que necesitan de mucha energía, como por ejemplo, lo es la producción de acero usando las tecnologías de reducción directa de hierro (DRI) mediante el uso del hidrógeno verde. De acuerdo con datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), para el año 2023, tan solo el 0.1% del acero mundial producido se generaba con el hidrógeno, sin embargo, este valor se proyecta que aumentará de forma muy importante para 2030. Otro sector con un potencial demasiado grande es el del transporte, en particular de los vehículos de celda de combustible (o FCV, por sus siglas en inglés). Más de 50,000 FCV se conducían por las carreteras del mundo en 2023, y se espera un crecimiento significativamente mayor en los próximos años, particularmente en Japón y Corea del Sur.

### **Conclusión**

En este trabajo se utiliza la metodología de la Cadena de Valor, priorizando en el estudio la producción, el almacenamiento y transporte, así como las aplicaciones finales y el impacto económico, para estudiar el estado actual del uso de Hidrógeno como vector energético y su posible desarrollo en el corto plazo a nivel mundial.

Se concluye que las dos principales tecnologías de obtención con posibilidades de uso generalizado son el reformado de gas natural con captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) y la electrólisis de agua. La principal ventaja de usar como combustible hidrógeno verde obtenido mediante procesos de electrólisis con el uso de energía auxiliar

limpia, es que ofrece la posibilidad de lograr cero emisiones de carbono hacia el medio ambiente, en contraste con el hidrógeno azul que ofrece como ventajas una importante reducción en la huella de carbono, un costo inicial más bajo debido a la infraestructura ya existente, y a la oportunidad de usar el CO<sub>2</sub> capturado para la fabricación de distintos materiales de alto valor comercial en distintos campos de la industria, lo cual brinda oportunidades de la creación de una economía circular de carbono. La disponibilidad de la materia prima en la obtención de hidrógeno verde no tiene limitaciones (sin embargo, es importante aclarar que este requiere de electricidad renovable, lo cual representa una limitación grande en regiones donde existe una deficiencia de infraestructura energética adecuada y, por ende, altos costos de la electricidad), en tanto que para obtener el hidrógeno azul necesariamente se tienen que utilizar hidrocarburos y el costo económico de la aplicación de tecnología CCUS. Desde el punto de vista de la comercialización, distribución, venta y expendio al público, ambas tecnologías de obtención se enfrentan al reto de almacenar, transportar y colocar a disposición del consumidor un compuesto gaseoso, clasificado como material peligroso y de alto riesgo explosivo. Para el sector industrial, esto no sería un obstáculo insalvable, sin embargo, para el sector de la movilidad, el futuro del hidrógeno es muy incierto (habiendo potencial dentro de la movilidad de transporte aéreo, marítimo y pesado terrestre). Si bien los retos tecnológicos, logísticos y económicos son grandes (principalmente como el de reducir los costos de producción de hidrógeno verde, hasta la falta de una infraestructura adecuada en general de hidrógeno), las oportunidades que existen también son igual de esperanzadoras. Con inversiones estratégicas, avances y desarrollos tecnológicos, y políticas públicas bien estructuradas, enfocadas y dirigidas, el hidrógeno tiene el potencial de convertirse en un pilar fundamental de un futuro energético más limpio y sostenible, posicionándose más allá de ser solo un vector energético y abriendo camino hacia una nueva era de innovación y desarrollo industrial.

**Agradecimientos y financiamiento:** Este trabajo se realizó en el marco del proyecto "Cadena de Valor, de la Industria de los Energéticos. Los Retos de México Ante los Convenios Signados y Ratificados en Materia Energética de 2014-2024", con registro asignado por la SIP: 20240905, cuya directora es la M. C. María de la Luz Valderrábano Almegua. Agradecemos su invaluable guía y apoyo para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, expresamos nuestro más sincero agradecimiento al M. C. René Hernández Mendoza por su valiosa orientación y contribución técnica, que fueron fundamentales para la consolidación de este trabajo.

Este artículo tiene su origen en la investigación que forma parte del desarrollo de la tesis de Pablo Eduardo Baltazar Victoria. Esta tesis está siendo desarrollada como parte de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Químico Petrolero en la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional, bajo la asesoría de la M. C. María de la Luz Valderrábano Almegua y el M. C. René Hernández Mendoza.

## Bibliografía

- Ball, M., & Wietschel, M. (2009). The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511635359>.
- Catling, D. C., & Kasting, J. F. (2017). Atmospheric evolution on inhabited and lifeless worlds. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139020558>.
- Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. International Journal of Hydrogen Energy, 40(34), 11094-11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>.
- Draine, B. T. (2011). Physics of the interstellar and intergalactic medium (Vol. 19). Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400839087>.
- International Energy Agency. (2024). Global Hydrogen Review 2024. International Energy Agency. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
- International Energy Agency. (2024). World Energy Outlook 2024. International Energy Agency. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
- Lemmon, E. W., McLinden, M. O., & Friend, D. G. (2021). Thermophysical Properties of Fluid Systems: Hydrogen (NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69). National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://doi.org/10.18434/T4D303>.
- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Senior, B. T. F., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9(11), 2296. <https://doi.org/10.3390/app9112296>.
- Melaina, M. W., Antonia, O., & Penev, M. (2013). Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Recuperado de: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>.
- Rashid, M. M., Al Mesfer, M. K., Naseem, H., & Danish, M. (2015). Hydrogen production by water electrolysis: A review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v4i3/C3749024315.pdf>.
- Rostrup-Nielsen, J. R., & Christiansen, L. J. (2011). Concepts in syngas manufacture. Imperial College Press. Recuperado de: [https://books.google.com.mx/books?id=H\\_VpDQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=H_VpDQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2019). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. International Journal of Hydrogen Energy, 42(52), 30470-30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>.
- United States Environmental Protection Agency. (2022). Overview of Greenhouse Gases. EPA. Recuperado de: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>.