

## El futuro del hidrógeno verde en la transición energética en México y el mundo

Sandra Edith Benito-Santiago <sup>1</sup>, Josefina García-Navarro <sup>1</sup> y Juan Jesús Reyes-Valdez <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Altamira, Nuevo Libramiento Altamira km 3, 89602 Altamira, Tamaulipas, México.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira Km. 14.5, 89600 Altamira, Tamaulipas, México.

\* Autor de correspondencia: [juan\\_jesus\\_reyes@hotmail.com](mailto:juan_jesus_reyes@hotmail.com)

### Artículo de divulgación científica

Recibido: 26 de octubre de 2024

Aceptado: 3 de diciembre de 2024

Publicado: 15 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.294>

**Resumen:** El Hidrógeno verde presenta oportunidades significativas para su implementación en empresas de los sectores público y privado, con aplicaciones en el transporte, la producción de energía y como insumo para la industria. Gobiernos y empresas a nivel mundial consideran el hidrógeno verde como un elemento fundamental para la descarbonización de diversos procesos, con el fin de alcanzar los objetivos climáticos establecidos para el año 2030. Se anticipa que el desarrollo del sector del hidrógeno verde establecerá las bases para nuevas oportunidades comerciales y generación de valor a nivel global, así como en México.

**Palabras clave:** Hidrógeno verde; transición energética; electrólisis; energía renovable; combustible sostenible.

### Introducción

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y es el elemento químico más simple. Su estructura atómica consiste en un protón y un electrón, y se presenta de manera estable como una molécula diatómica (H<sub>2</sub>). Bajo condiciones normales de temperatura y presión, se encuentra en estado gaseoso, careciendo de sabor, color y olor. Se considera el elemento más abundante en el universo y también uno de los más comunes en nuestro planeta. Su uso como portador de energía tiene una historia extensa que se remonta al siglo XVIII, donde uno de los primeros motores de combustión interna funcionó con una mezcla de hidrógeno y oxígeno como fuente de energía. Pero el hidrógeno nunca se encuentra de manera aislada, sino que se encuentra naturalmente en el agua o con el carbono formando compuestos orgánicos, por lo que es necesario extraerlo de sus compuestos (Gunawardane, 2024).

El primer interés significativo por el hidrógeno surgió en la década de los 70's, cuando los precios del petróleo se dispararon y hubo escasez de este recurso. Esto llevó a que se explorara más la producción de hidrógeno a partir de carbón o energía nuclear, con el objetivo de usarlo como combustible en el sector del transporte. Desafortunadamente, el interés en el hidrógeno disminuyó a medida que los recursos de petróleo y gas aumentaban, lo que llevó a una estabilización de los precios del petróleo. Así mismo, en ese momento, la energía nuclear se encontraba bajo una creciente resistencia por parte del público, además de otras regulaciones que trataban de resolver los problemas de contaminación del aire (International Energy Agency, 2019).

Sin embargo, una vez más, el interés por el hidrógeno se vio impulsado por problemas como el calentamiento global y el cambio climático que comenzaron a ser un tema importante en todo el mundo en los años 2000, lo que llevó a que se gestionaran iniciativas globales para mantener el calentamiento bajo control, como el Acuerdo de París (UNFCCC, 2015), el Protocolo de Kioto (UNFCCC, 1997), y la Enmienda de Kigali (Ministry for the Environment, 2016). En consecuencia, numerosos países han implementado nuevas políticas destinadas a regular las emisiones de carbono. Como una alternativa a los combustibles fósiles, ampliamente utilizados, se han promovido las energías renovables con el fin de disminuir los niveles de CO<sub>x</sub>. No obstante, la naturaleza intermitente de estas fuentes renovables ha generado un creciente interés en los métodos de almacenamiento de energía desde finales de la década del 2000. En el contexto actual, el hidrógeno, debido a su alto potencial como portador de energía, está teniendo un desarrollo acelerado en su infraestructura y tecnologías relacionadas con electrolizadores, celdas de combustible, turbinas eléctricas, Power-to-X (Power-to-metano, Power-to-amoniaco, Power-to-metanol) y tanques de gas (PNUD, 2023), (Gunawardane, 2024).

## Desarrollo

*Pero... ¿Y qué es el hidrógeno verde, como se obtiene, que lo hace un combustible limpio y sostenible?*

Cuando nos referimos al hidrógeno verde, estamos hablando de un hidrógeno producido por electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovables como la eólica o la solar, sin emisión de contaminantes, en otras palabras, un hidrógeno sostenible. Un combustible que está avanzando gradualmente como el elemento energético fundamental para lograr la descarbonización del planeta, con la meta de alcanzar un futuro de cero emisiones y cumplir con los objetivos climáticos establecidos para el año 2030 en la lucha contra el cambio climático (Yusaf *et al.*, 2022).

*¿Qué otros tipos de hidrógeno existen?*

Si bien el hidrógeno es un gas incoloro, frecuentemente se le asigna un nombre de color que refleja su método de producción. En la naturaleza, el hidrógeno se encuentra de manera natural, aunque es bastante escaso y a menudo se le denomina hidrógeno blanco. En el ámbito industrial, el hidrógeno se obtiene a partir de otros combustibles/procesos, lo que le confiere su designación de color como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Codificación de colores de los diferentes tipos de hidrógeno (Gunawardane, 2024).

Color	Combustible	Proceso	Productos	Respeto con el medio ambiente	Descripción
●	Carbón	Gasificación	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	Muy bajo	En este proceso se utiliza carbón como fuente de energía y se produce hidrógeno por gasificación.
●	Gas natural	Reformado con vapor	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	Muy bajo	Es el hidrógeno generado a partir de gas natural o metano mediante la técnica de reformado de metano con vapor.
●	Gas natural	Reformado con vapor	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	Alto	El hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles y en este proceso en lugar de liberar el CO <sub>2</sub> a la atmósfera, se utilizan nuevas tecnologías para capturar el CO <sub>2</sub> generado y almacenarlo bajo tierra.
●	Gas natural	Pirólisis	H <sub>2</sub> + C	Alto	El hidrógeno se extrae de la división térmica del metano mediante pirólisis.
●	Energía nuclear	División catalítica	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	Alto	El hidrógeno se genera mediante energía nuclear y consiste en la descomposición catalítica del agua a alta temperatura.
●	Energía nuclear	Electrólisis	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	Alto	Se utiliza la descomposición del agua mediante electrólisis, donde se genera oxígeno como subproducto.
●	Energía solar	Electrólisis	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	Alto	La energía solar se utiliza para generar hidrógeno mediante la electrólisis del agua.
●	Electricidad renovable	Electrólisis	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	Muy Alto	En este proceso el hidrógeno se produce utilizando energía renovable para la técnica de electrólisis del agua.

*¿De qué manera se obtiene el hidrógeno verde?*

El proceso se desarrolla de la siguiente manera:

- **Electrólisis:** mediante una corriente eléctrica proveniente de energías renovables como la eólica o la solar, donde las moléculas de agua se descomponen en hidrógeno y oxígeno. Cuando la electrólisis del agua ocurre en condiciones neutras (pH = 7), la diferencia de potencial teórica entre la semirreacción de evolución de oxígeno (SEO) y la semirreacción de evolución de hidrógeno (SEH) es de 1.23 V. Sin embargo, el ánodo tiende a acidificarse debido a la generación de H<sup>+</sup> mientras se lleva a cabo la electrólisis; al mismo tiempo, el cátodo se alcaliniza porque se libera OH<sup>-</sup>. Como consecuencia, el pH que rodea al ánodo y al cátodo varía, aumentando así el voltaje termodinámico del proceso. Debido a esto, se requieren soluciones concentradas de H<sup>+</sup> (pH ácido) u OH<sup>-</sup> (pH

alcalino) para evitar sobrepotenciales de concentración, ya que son las especies iónicas más móviles (Gandía *et al.*, 2013). Como se muestra en la Figura 1, la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo es siempre 1.23 V (McCafferty, 2010), aunque los potenciales característicos de cada semirreacción varían tanto en medio alcalino (+0.401 V SEO, -0.829 V SEH) como en medio ácido (+1.229 V SEO, 0 V SEH).

Los electrodos, el ánodo y el cátodo, generalmente están fabricados con materiales como níquel o platino y dependiendo de las características del electrolito, existen diferentes tipos de electrólisis, como:

- Electrólisis alcalina.
- Electrólisis por membrana de intercambio de iónico.
- Electrólisis de estado sólido.

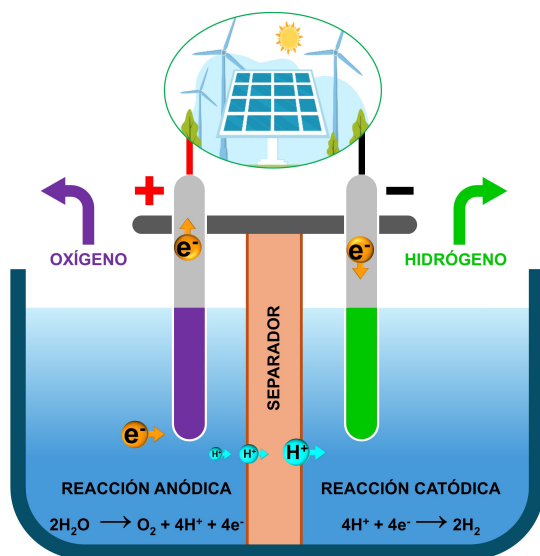


Figura 2. Ejemplo de celda de electrólisis alcalina.

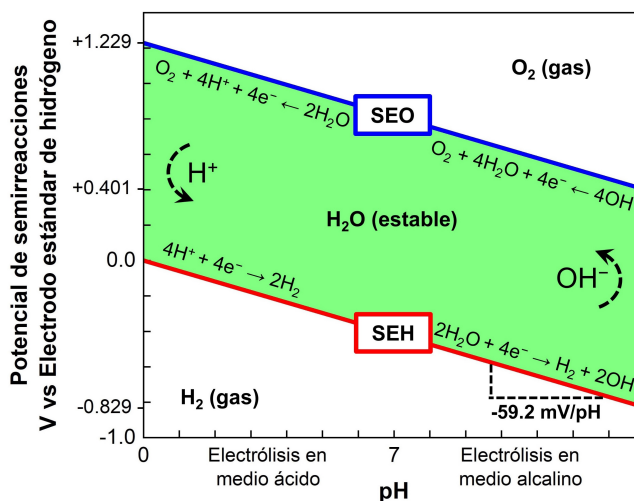


Figura 1. Proceso de destilación por arrastre de vapor.

- **Recolección del gas hidrógeno:** el gas hidrógeno se recoge en el cátodo donde ocurre el proceso de reducción de  $4\text{H}^+$  a  $2\text{H}_2$  (Figura 2).

- **Almacenamiento:** el gas hidrógeno puede ser recolectado, almacenado y empleado en diversas aplicaciones. Algunos de los principales métodos de almacenamiento de hidrógeno son: hidrógeno comprimido, licuado, criocomprimido, hidrógeno adsorbido físicamente, hidruros metálicos, hidruros complejos o hidruros orgánicos líquidos (Usman, 2022). Donde el uso del hidrógeno verde desempeña un papel crucial en la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles y en la mitigación del calentamiento global (Vahidinasab *et al.*, 2024). Extendiendo su uso a la industria pesada, al transporte de larga distancia y al almacenamiento de energía a largo plazo (Figura 3).

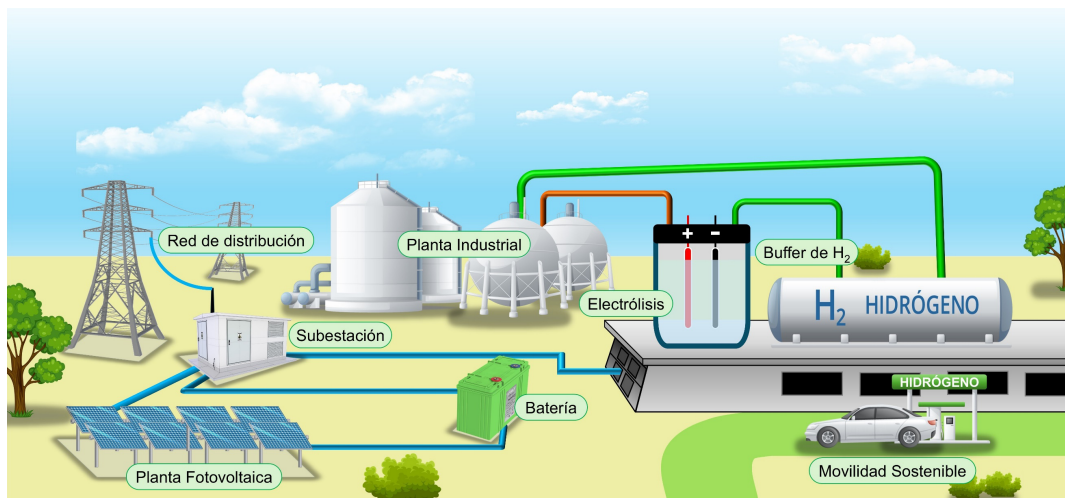


Figura 3. Etapas de obtención, almacenaje y distribución del hidrógeno verde.

### ¿Qué beneficios ofrece el hidrógeno verde? Usos para combatir el cambio climático.

Una de las características más destacadas del hidrógeno es su versatilidad, dado que puede ser utilizado no solo como un vector energético, sino también como una materia prima. A continuación, se describen algunas de las aplicaciones más prometedoras del hidrógeno verde que pueden contribuir a la descarbonización del planeta.

#### - En la Industria

El hidrógeno forma parte de la estructura molecular de los productos químicos y materiales industriales más utilizados, como plásticos, fertilizantes, disolventes y explosivos. Sin embargo, el amoníaco y el metanol son los productos químicos que se producen con más frecuencia utilizando hidrógeno, en la industria petroquímica para el proceso de refinación del petróleo y en la metalurgia para la obtención de acero. La utilización de hidrógeno en estas tres áreas genera una considerable cantidad de emisiones de dióxido de carbono, pero la implementación del hidrógeno verde como materia prima podría permitir la producción de acero sin emisiones, lo que constituiría un avance significativo hacia la necesaria descarbonización de estas industrias (International Energy Agency, 2019) (Figura 4).

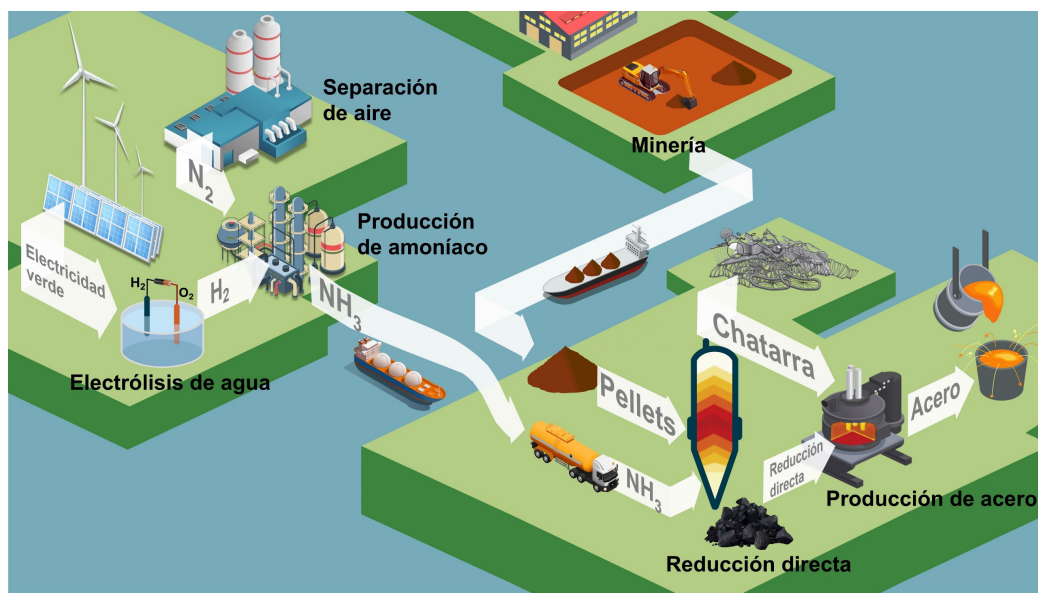


Figura 4. Futura industria siderúrgica con la implementación de energía renovable intermitente mediada por hidrógeno y amoníaco verde.

#### - Para almacenamiento de energía

El hidrógeno verde tiene el potencial de funcionar como un sistema de almacenamiento de energía debido a su considerable volumen y prolongada duración, de manera similar a cómo actualmente se utilizan las reservas de gas natural o petróleo. Así, se podrían acumular reservas de hidrógeno renovable para dar soporte a la red eléctrica (International Energy Agency, 2019).

#### - En el transporte

El hidrógeno verde se perfila como un combustible clave para la descarbonización

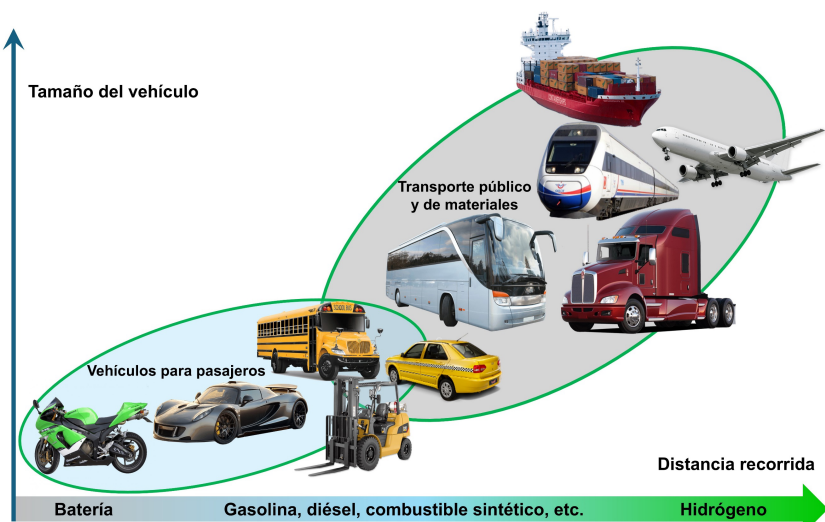


Figura 5. Perspectivas del hidrógeno en vehículos pesados.

del transporte, especialmente en el de trayectos largos y en la aviación. En el transporte marítimo, donde se utilizan combustibles económicos pero muy contaminantes, el hidrógeno verde se convierte en una opción crucial para los barcos que navegan grandes distancias. En el ámbito de la aviación, este hidrógeno puede ser la base para crear combustibles sintéticos que disminuyan drásticamente las emisiones. Además, será fundamental para otros medios de transporte como los trenes y el transporte de mercancías pesadas por carretera (Figura 5) (Gunawardane, 2024; International Energy Agency, 2019).

#### - Para uso doméstico

El hidrógeno verde tiene la capacidad de alcanzar temperaturas que son complicadas de lograr mediante otros métodos limpios. Por esta razón, su utilización en la generación de electricidad y en la calefacción de los hogares se presenta como una de las aplicaciones más prometedoras.

#### *El hidrógeno verde en el contexto de la transición energética en México y el Mundo*

Se estima que para el 2050, la demanda de hidrógeno podría alcanzar entre 500 y 680 millones de toneladas métricas, mientras que el mercado actual de producción de hidrógeno está valorado en 130 mil millones de dólares. Además, se proyecta que este mercado crecerá a un ritmo del 9.2 % cada año hasta 2030 (Kobina *et al.*, 2023).

Pero para poder integrar energía renovable a gran escala, es necesario contar con un sistema de almacenamiento de energía a largo plazo. En Europa, Estados Unidos y Australia, se han registrado días en que los precios de la electricidad caen a niveles negativos debido a un exceso de producción de energía eólica o solar. Asimismo, la producción de energías renovables presenta variaciones significativas según las estaciones y las condiciones climáticas. Aunque es probable que el equilibrio a corto plazo se logre mediante tecnologías como la gestión de la demanda y el uso de baterías, el hidrógeno podría desempeñar un papel crucial en el almacenamiento a largo plazo. El excedente de energía generado por fuentes renovables puede ser transformado en hidrógeno a través de electrólisis y almacenado para satisfacer futuras demandas (Hydrogen Council, 2017).

No obstante, debido al acelerado progreso de las tecnologías renovables, se anticipa una disminución en los precios de la energía. Asimismo, el desarrollo de los electrolizadores está mejorando notablemente su eficiencia. Con la fabricación a gran escala de estos dispositivos, se estima que los costos continuarán disminuyendo de manera gradual. Como consecuencia de estos factores, el costo de producción de hidrógeno verde ha disminuido un 40% desde 2015 y se proyecta que seguirá bajando en el futuro (Scott, 2020), rondando los 0.70 – 1.60 dólares por kg en la mayor parte del mundo para el año 2050 (Kobina *et al.*, 2023).

La expansión del hidrógeno verde se va a volver esencial a nivel mundial si se quiere cumplir con los objetivos de cero emisiones para 2050. Se estima que, para ese año, el 25% de la energía que se consume en el mundo tendrá que generarse a partir de hidrógeno verde. Muchos países ya han lanzado sus planes y estrategias nacionales sobre el hidrógeno, incluyendo a Australia, Chile, Alemania, la Unión Europea, Japón, Nueva Zelanda, Portugal, España y Corea del Sur (Scott, 2020). Se espera que la inversión global en hidrógeno verde supere los 300 mil millones de dólares para 2030 (Kobina *et al.*, 2023). En la región latinoamericana, Chile ocupa la posición de liderazgo en la generación de hidrógeno verde, y su ambición es producir el hidrógeno verde más barato para 2030 (Gunawardane, 2024).

En la actualidad, en México se identifican 19 instalaciones dedicadas a la producción de hidrógeno gris (PNUD, 2023). La mayoría de estas plantas emplean el hidrógeno principalmente para autoconsumo y como insumo en diversos procesos industriales. Las instalaciones que operan actualmente suministran hidrógeno para aplicaciones tradicionales en las siguientes industrias:

- **Alimentaria**, específicamente en empresas que elaboran grasas y mantecas a través de procesos de hidrogenación. La mayoría de estas instalaciones son de pequeña escala y se dedican al autoconsumo.
- **Petroquímica**, donde se utiliza para la fabricación de pinturas, fibras textiles, tintas y solventes.
- **Acerera**, que cuenta con plantas de autoconsumo para la producción de productos como alambre y alambrón.

- **Petrolera**, que lo utiliza en procesos de refinación. Este sector alberga algunas de las plantas más grandes debido a su elevado consumo.
- **De fertilizantes**, enfocada en la producción de amoníaco.
- **Cementera**, que aprovecha el hidrógeno por su alto potencial calorífico, esencial en sus procesos productivos.
- **Eléctrica**, donde se utiliza para el enfriamiento de generadores.

En relación con los métodos de producción de hidrógeno en el país, casi la totalidad (95 %) se realiza a través del reformado de gas natural; una fracción menor (4 %) se obtiene mediante electrólisis, donde los electrolizadores están conectados a la red eléctrica, y el resto (<1 %) proviene de la industria cloro-álcali (González, 2021). Esta situación conlleva una considerable emisión de gases de efecto invernadero. En el año 2021, PEMEX emitió 71.1 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e); de esta cantidad, el 21.4 % se originó en procesos de refinación de productos petroleros, y el 5.5 % en la producción de petroquímicos, como los fertilizantes (PEMEX, 2022).

Sin embargo, al día de hoy en México no se produce hidrógeno verde, aunque a partir del 2023 se iniciaron proyectos de pequeña escala y se prevé que para 2025 se implementen grandes iniciativas. La Agencia Alemana de Cooperación Internacional ha calculado que, aprovechando la energía renovable (solar y eólica) disponible en el México, se podría instalar una capacidad de hasta 22 Teravatios de electrólisis, generando aproximadamente 1,400 millones de toneladas de hidrógeno verde. También ha señalado que el país podría convertirse en el segundo exportador más competitivo hacia destinos asiáticos y el tercero hacia mercados europeos, gracias a su bajo costo de producción. Además, fomentaría la innovación, la creación de más de 3 millones de empleos, el fortalecimiento de la seguridad energética y la atracción de inversiones superiores a 60,000 millones de dólares. Pero aún no se cuenta con una política pública específica para el hidrógeno verde en México, sin embargo, hay iniciativas del sector privado; en 2022, la Asociación Mexicana del Hidrógeno presentó un estudio y una hoja de ruta para promover esta industria y según el informe “Renewable Hydrogen in Latin America & The Caribbean”, México ya cuenta con 9 proyectos de hidrógeno verde en fase de desarrollo (Tapia, 2023).

## Conclusiones

En resumen, aún queda un largo camino por delante para lograr un hidrógeno completamente verde en todos los sectores de la economía del hidrógeno. Sin embargo, al examinar la situación actual de su producción a nivel mundial, se observa un avance significativo hacia un futuro sostenible basado en el hidrógeno verde, a fin de cumplir con el Acuerdo de París. En este contexto, la contribución de México establece como metas la reducción de los gases de efecto invernadero y de las emisiones de carbono negro en un 22 % y un 51 %, respectivamente, para el año 2030.

## Bibliografía

- Gandía, L. M., Arzamendi, G., & Diéguez, P. M. (2013). *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05152-9>.
- González, R. de G. (2021). *Hidrógeno: Retos y Perspectivas*. [https://citedi.mx/comiteambiental/files/202108-Hidrogeno\\_retos\\_y\\_perspectivas.pdf](https://citedi.mx/comiteambiental/files/202108-Hidrogeno_retos_y_perspectivas.pdf).
- Gunawardane, K. (2024). Evolution of hydrogen energy and its potential opportunities around the globe. En *Hydrogen Energy Conversion and Management* (pp. 3–33). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15329-7.00007-7>.
- Hydrogen Council. (2017). *Hydrogen, Scaling Up*. <https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/>.
- International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen*.
- Kobina, M., & Gil, S. (2023). *Green Hydrogen: A key investment for the energy transition*. <https://blogs.worldbank.org/en/ppps/green-hydrogen-key-investment-energy-transition>.
- McCafferty, E. (2010). *Introduction to Corrosion Science*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0455-3>.
- Ministry for the Environment. (2016). *Kigali Amendment to the Montreal Protocol*. <https://environment.govt.nz/what-government-is-doing/international-action/vienna-convention-and-montreal-protocol/kigali-amendment-to-the-montreal-protocol/>.
- PEMEX. (2022). *Informe de Sustentabilidad*. [https://www.pemex.com/etica\\_y\\_transparencia/transparencia/informes/Documents/inf\\_sustentabilidad\\_2021\\_esp.pdf](https://www.pemex.com/etica_y_transparencia/transparencia/informes/Documents/inf_sustentabilidad_2021_esp.pdf).
- PNUD. (2023). *El potencial industrial de México en las cadenas de valor del hidrógeno verde*.
- Scott, M. (2020). *Green hydrogen, The fuel of the future, set for 50-fold expansion*. <https://www.forbes.com/sites/mikescott/2020/12/14/green-hydrogen-the-fuel-of-the-future-set-for-50-fold-expansion/>.
- Tapia, Patricia. (2023). *El ABC del hidrógeno verde y su avance en México*. <https://www.forbes.com.mx/el-abc-del-hidrogeno-verde-y-su-avance-en-mexico/>.

- 
- UNFCCC. (1997). *What is the Kyoto Protocol?* [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol).
- UNFCCC. (2015). *The Paris Agreement*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- Usman, M. R. (2022). Hydrogen storage methods: Review and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112743. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112743>.
- Vahidinasab, V., Mohammadi-Ivatloo, B., & Shiun Lim, J. (2024). *Green Hydrogen in Power Systems* (1a ed.). Springer Cham.
- Yusaf, T., Laimon, M., Alrefae, W., Kadirgama, K., Dhahad, H. A., Ramasamy, D., Kamarulzaman, M. K., & Yousif, B. (2022). Hydrogen Energy Demand Growth Prediction and Assessment (2021–2050) Using a System Thinking and System Dynamics Approach. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 781, 12(2), 781. <https://doi.org/10.3390/APP12020781>.