

Factibilidad de producción y uso de hidrógeno verde en Colombia

Daniela Torres Morimitsu, Juan Fernando López López, Juan Esteban Tibaquirá

**Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia**

Resumen

El hidrógeno es uno de los elementos más abundantes del universo y una fuente de energía clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible. Su versatilidad como vector energético permite su uso en diversas aplicaciones, desde la industria y el transporte hasta la generación de electricidad y almacenamiento de energía. Debido a su alta densidad energética y a la posibilidad de producirlo a partir de diversas fuentes, el hidrógeno se perfila como una alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

De acuerdo con su método de producción, el hidrógeno se clasifica en diferentes tipos. Dicha producción ha dependido tradicionalmente de combustibles fósiles, sin embargo, en los últimos años y a nivel mundial se han hecho esfuerzos para promover y ejecutar proyectos para la obtención de hidrógeno a partir de fuentes renovables, o también llamado hidrógeno verde. Colombia por su parte cuenta con la Hoja de Ruta del Hidrogeno que tiene como objetivo contribuir al desarrollo e implementación del hidrogeno de bajas emisiones en el país, sin embargo, tras una revisión exhaustiva de la literatura actual, se ha identificado una ausencia de estudios concretos sobre la factibilidad de la producción y utilización de hidrogeno verde en Colombia.

Por lo anterior, para la primera fase del proyecto "Diseño de un sistema híbrido (eólico + sistema de combustible de hidrógeno verde) para suministro de energía y análisis de su factibilidad técnica y viabilidad económica" se analiza el potencial de Colombia para la producción y uso del hidrógeno verde. Para ello, se destacan los recursos naturales del país, su marco regulatorio y las oportunidades económicas asociadas con el desarrollo de esta tecnología, así mismo, se identifican los métodos de producción y los parámetros clave para generarlo. Se desarrolla un modelo para evaluar la factibilidad de su producción y se detectan las barreras técnicas y económicas para tal fin, lo que permitirá formular recomendaciones para impulsar el proyecto mencionado, así como otros proyectos relacionados.

Palabras clave: hidrógeno; hidrógeno verde; energías renovables; recursos naturales

Abstract

Hydrogen is one of the most abundant elements in the universe and a key energy source in the transition to a more sustainable energy system. Its versatility as an energy carrier allows it to be used in diverse applications, from industry and transportation to electricity generation and energy storage. Due to its high energy density and the possibility of producing it from various sources, hydrogen is emerging as an alternative to reduce dependence on fossil fuels and mitigate greenhouse gas emissions.

Hydrogen is classified into different types based on its production method. Production has traditionally relied on fossil fuels; however, in recent years, global efforts have been made to promote and implement projects to obtain hydrogen from renewable sources, also known as green hydrogen. Colombia, for its part, has a Hydrogen Roadmap, which aims to contribute to the development and implementation of low-emission hydrogen in the country. However, after an exhaustive review of the current literature, a lack of concrete studies on the feasibility of producing and using green hydrogen in Colombia was identified.

Therefore, for the first phase of the project "Diseño de un sistema híbrido (eólico + sistema de combustible de hidrógeno verde) para suministro de energía y análisis de su factibilidad técnica y viabilidad económica", Colombia's potential for the production and use of green hydrogen is analyzed. To this end, the country's natural resources, its regulatory framework, and the economic opportunities associated with the development of this technology are highlighted. Production methods and key parameters for generating it are also identified. A model is developed to evaluate the feasibility of its production, and the technical and economic barriers to this end are identified, which will allow for the formulation of recommendations to advance the aforementioned project, as well as other related projects.

Keywords: hydrogen; green hydrogen; renewable energy; natural resources

1. Introducción

A medida que los países crecen en población y desarrollo económico, también aumenta su demanda de energía. Sin embargo, gran parte de esa energía actualmente se obtiene de fuentes no renovables, que generan cerca de 33 Gt de CO₂-eq por año. Solo alrededor del 30% de la electricidad que se produce en el mundo proviene de fuentes renovables y tecnologías que emiten poco carbono (Agencia Internacional de Energía, 2021). En este sentido, las Naciones Unidas establecieron el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 que garantiza el acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna (Naciones Unidas, 2023). Además, a partir de la implementación del Acuerdo de París en el año 2016, la descarbonización del sistema de energía se convirtió en uno de los objetivos principales para todos los países, los cuales empezaron a desarrollar estrategias para garantizar una transición energética adecuada (Naciones Unidas, s.f.).

Una de las estrategias es el uso y producción de hidrógeno (H_2) para diferentes usos. Actualmente más de 50 países han desarrollado estrategias para producir y consumir dicho elemento, es así como a la fecha existen en desarrollo más de 1000 proyectos relacionados con H_2 y se prevé que la demanda se multiplique por 5 en los próximos años, que sea principalmente de bajas emisiones, es decir renovable o fósil con captura de carbono (Asociación de Hidrógeno de Colombia, 2023). De esta manera, el hidrógeno producido utilizando fuentes de energía renovables o también llamado hidrogeno verde (H_2V) se viene consolidando como un vector energético clave en la transición hacia un sistema más sostenible y descarbonizado. La versatilidad de este elemento permite su aplicación en sectores como la industria, el transporte y la generación de electricidad.

Para lograr la producción y el consumo de hidrógeno bajo en emisiones, se requiere de infraestructura, políticas y cooperación global. En este sentido, Colombia se plantea como focos de trabajo: Habilitar los recursos disponibles para generación de H_2 bajo en emisiones, incentivos tributarios y eficiencia en precios de electricidad, promover el conocimiento del H_2 y sus derivados, estudiar la demanda local, estructuración del primer fondo para proyectos junto a la Unión Europea y habilitar la exportación de H_2 (Asociación de Hidrógeno de Colombia, 2023).

2. Análisis del contexto

2.1 Revisión bibliográfica

Inicialmente se identificaron los aspectos de consulta clave: Recursos renovables en Colombia; Estado actual del H_2V , Tecnologías para la producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno; Normativas en transición energética y uso de H_2V en Colombia; Costo del hidrógeno en Colombia. Luego, se generaron ecuaciones de búsqueda que fueron utilizadas en bases de datos para encontrar la información relevante. De esta manera se realizó un estudio de la literatura científica, informes técnicos, políticas energéticas y marcos regulatorios vigentes en el país.

Lo anterior se llevó a cabo para conocer el estado actual del tema y fundamentar el marco teórico en la etapa inicial del proyecto “Diseño de un sistema híbrido (eólico + sistema de combustible de hidrógeno verde) para suministro de energía y análisis de su factibilidad técnica y viabilidad económica”, justificar la relevancia del estudio y tener herramientas base para seleccionar los métodos más adecuados. Además, esta etapa de la metodología se identifica como una parte esencial para conectar el proyecto de investigación en mención con la comunidad científica, académica y la construcción de una base sólida para avanzar.

2.2 Evaluación del potencial de recursos renovables en Colombia

Colombia posee un notable potencial en energías renovables, gracias a su diversidad geográfica y climática, lo que la posiciona como un actor clave en la transición energética de América Latina. En este sentido, es importante identificar y cuantificar las fuentes de energía renovable disponibles en Colombia, con el fin de realizar la caracterización del uso de dichas fuentes para evaluar la posible producción de H_2V a partir de ellas. Para ello, se revisaron datos de generación, así como estudios previos sobre la capacidad instalada y futura del país en energías renovables.

Según la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2023), en la matriz energética colombiana es pionera la energía hidráulica con una capacidad instalada de aproximadamente el 66%, seguida por la térmica con el 30%, la solar con el 3% y cogeneradores con el 1%. Sin embargo, Colombia ha avanzado notablemente en los últimos 10 años en la diversificación de dicha matriz para reforzar la seguridad energética frente al cambio climático y la desigualdad en el acceso a la energía (Departamento Nacional de Planeación, 2024).

En este sentido, Colombia está avanzando en la ejecución de proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes renovables, especialmente en energía solar y eólica. Existe una radiación solar promedio de 4,9 kWh/m²/día a nivel nacional, con zonas que superan los 6,0 kWh/m²/día, especialmente en La Guajira y el noroccidente del Vichada (Departamento Nacional de Planeación, 2024). En cuanto a energía eólica, la participación es solo de aproximadamente el 0,7%, siendo la Guajira el departamento más destacado, por tener vientos constantes y de alta velocidad (Departamento Nacional de Planeación, 2024).

Mediante el sitio web Sinergox, gestionado por XM (Sinergox, s.f.), que centraliza la información del Mercado de Energía Mayorista (NEM) y de la operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), se obtuvo la información que permitió analizar el comportamiento de la capacidad instalada de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) en MW para los últimos 5 años, tal y como se muestra en la Figura 1.

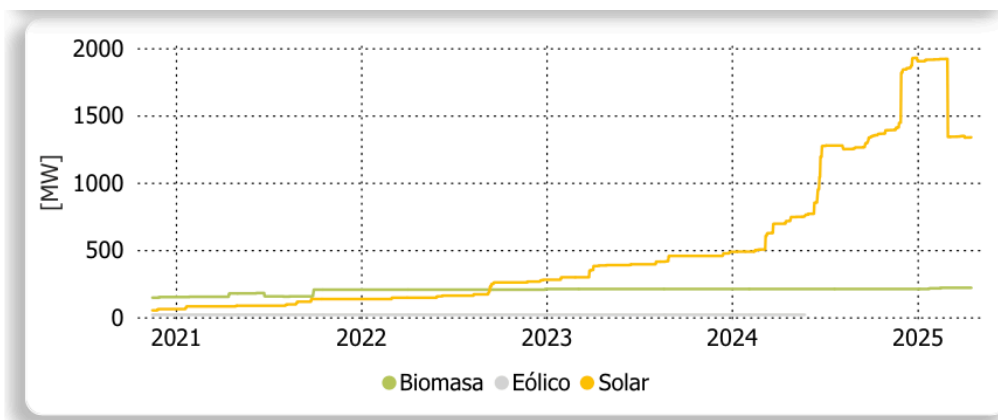


Figura 1. Capacidad efectiva neta de generación de energía por tipo de fuente en los últimos 5 años. Fuente: (Sinergox, s.f.)

2.3 Identificación de tecnologías de producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno verde

Se analizaron los principales métodos de producción de hidrógeno verde, considerando aspectos como eficiencia energética, costos de inversión, infraestructura requerida y disponibilidad de insumos. Adicionalmente, se estudiaron las tecnologías de almacenamiento y transporte para determinar su viabilidad en el contexto colombiano.

- **Producción de hidrógeno verde**

El hidrógeno verde puede ser producido utilizando electricidad proveniente de fuentes renovables (solar, eólica, hidro, etc.) con el fin de separar el agua en hidrógeno y oxígeno. Para lograr este objetivo actualmente se utilizan tecnologías basadas en la electrólisis del agua o en tecnologías emergentes como la fotocatalisis o termólisis del agua. En la electrólisis se lleva a cabo un proceso químico, en el cual se hace pasar corriente por agua con un poco de sal o ácido (para conducir mejor) y se obtiene hidrógeno y oxígeno en forma de gases. La fotocatalisis del agua utiliza la luz solar y materiales semiconductores para separar las partículas y la termólisis divide las partículas del agua por calor extremo.

El método más utilizado para la producción de hidrógeno verde y que más inversión y desarrollo está recibiendo a nivel mundial es la electrólisis, ya que no produce emisiones contaminantes, puede funcionar también como almacenamiento energético y genera oxígeno como subproducto útil. Sin embargo, aún existen retos para llevar a cabo dicha tecnología, como: tener una infraestructura adecuada, acceso confiable a fuentes de energía renovable y redes logísticas si se busca llevarlo a otros espacios.

Para la electrólisis, se han desarrollado diferentes tecnologías; una de ellas es la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM), la cual es barata y confiable, pero presenta una respuesta lenta y una menor pureza del H₂, otra de ellas es la electrólisis alcalina (AEL), es compacta, rápida y más pura que la primera, aunque al usar metales raros es más costosa. También se tiene la celda de electrolizador de óxido sólido (SOEC), que presenta una buena eficiencia, sin embargo, aún se encuentra en fase de desarrollo y es costosa. En este proceso han surgido tecnologías como la electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM), que busca combinar lo mejor de la PEM y la AEL.

- **Transporte de hidrógeno verde**

El transporte del hidrógeno es uno de los grandes retos logísticos que existe con este elemento, debido a que es ligero y altamente inflamable, además que maneja unas presiones altas. Se puede transportar en estado gaseoso, líquido o combinado químicamente, y cada método tiene aplicaciones y desafíos particulares.

Hidrógeno gaseoso (a presión): Se comprime a 200 – 700 bar y se transporta en cilindros. Es una tecnología madura y ampliamente usada para abastecimiento de estaciones de hidrógeno y consumo industrial cercano, ya que es adecuada para transporte de corto a mediano alcance (hasta 300 km aprox.) y es compatible con electrolizadores que ya producen H₂ a presión. Sin embargo, requiere alta energía para el proceso de compresión y puede ser costoso para grandes volúmenes o largas distancias.

Hidrógeno líquido (criogenización): Se enfría a -253°C para licuado, presenta una densidad mayor que el gas, lo que lo hace útil para largas distancias, por lo cual es utilizado para exportación y aplicaciones aeroespaciales o militares. Sin embargo, requiere refrigeración

extrema, lo que genera un alto consumo energético. También presenta pérdidas por evaporación y requiere una infraestructura costosa y especializada.

Portadores químicos (carriers): El H₂ se convierte en amoníaco (NH₃), LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers), metanol o metano sintético, los cuales son compatibles con infraestructura existente y pueden ser de transporte fácil. Sin embargo, requieren procesos de reconversión complejos, pueden presentar emisiones no deseadas y bajo rendimiento.

Tuberías o Redes Mixtas (H₂ + Gas Natural): Transporte por ductos diseñados para H₂ puro o mezclas con gas natural, es eficiente y económico en grandes volúmenes, ideal para distribución urbana o industrial. Como desventaja presenta costos iniciales altos para infraestructura nueva, también que el H₂ puede dañar algunos metales por fragilización y no es viable para exportación.

La mejor forma de transportar hidrógeno verde depende del destino, el volumen y la infraestructura disponible. Para uso local, el gas comprimido o ductos es ideal, ya que tiene menor densidad energética, puede utilizar infraestructura existente, requiere una menor inversión inicial y las pérdidas energéticas son menores, sin embargo, habría que considerar los riesgos asociados a la compresión y limitaciones para largo alcance. Para exportación, el NH₃ y el H₂ líquido son las opciones más viables, ya que presentan una mayor flexibilidad debido a su densidad energética y son adecuados para aplicaciones de largo alcance, aunque requiere una infraestructura específica (criogénica), lo que representa una mayor inversión inicial y presenta mayores pérdidas energéticas.

- **Almacenamiento de hidrógeno verde**

Almacenar hidrógeno verde de forma eficiente y segura es uno de los principales desafíos técnicos y económicos de esta tecnología. El método óptimo depende del uso final, la cantidad, y si se trata de almacenamiento a corto, medio o largo plazo.

Hidrógeno gaseoso (a presión): Se almacena a 200 – 700 bar y se transporta en cilindros. Es una tecnología madura y comercialmente disponible, fácil de integrar con electrolizadores y estaciones de carga, lo que lo hace una buena opción para aplicaciones móviles y de respaldo energético, tal como el uso en vehículos de hidrógeno y almacenamiento industrial o en estaciones de servicio. Sin embargo, puede presentar riesgo de fugas y necesidad de compresores, lo que puede elevar los costos.

Hidrógeno líquido (criogenización): Se enfría a -253°C para mantenerse en estado líquido en tanques aislados, presenta una mayor densidad que el gas, lo que lo hace útil para almacenar grandes cantidades, es decir, es más eficiente en su relación volumen/masa, lo que lo hace un buen método para exportación y aplicaciones aeroespaciales o militares. Sin embargo, requiere una energía alta para la criogenización, puede presentar pérdidas por evaporación y requiere una infraestructura especializada.

Materiales sólidos (Hidruros metálicos, compuestos químicos): Se almacena en metales o materiales porosos que absorben hidrógeno (forman hidruros o lo atrapan), maneja una alta densidad volumétrica, pero es un método seguro para almacenamiento a bajas presiones, lo que lo hace efectivo para sistemas estacionarios o de respaldo y para aplicaciones militares o espaciales. Ya que presenta un peso elevado, es poco viable para movilidad y presenta costos altos, además requiere calor para liberar el H₂.

Portadores químicos (carriers): El hidrógeno se convierte en compuestos como amoníaco, metanol o LOHC. Son más fáciles de almacenar que el H₂ puro y puede utilizar infraestructuras ya existentes como tanque u oleoductos, también son estables a temperatura ambiente, lo que los hace útiles para exportación o acoplamiento con redes de combustible sintético. Requieren de reconversión química lo que hace que la eficiencia energética sea menor que los otros métodos, aún es una tecnología costosa e incipiente.

Almacenamiento subterráneo: Inyección de H₂ en cavernas salinas, acuíferos profundos o formaciones rocosas porosas. Presenta una baja pérdida de energía y es ideal para almacenamiento estacional o de respaldo masivo, lo que lo hace útil para backup de redes eléctricas y suministro a industrias durante picos de demanda. Como desventaja requiere geología adecuada, inversión inicial alta y control técnico complejo.

El almacenamiento del hidrógeno no tiene una solución única, depende de la necesidad que se tenga. Si se requiere para movilidad es más factible almacenarlo como gas comprimido o líquido, para el uso en grandes industrias funciona mejor con portadores químicos o cavernas y para respaldo o estabilidad energética es más conveniente utilizar un sistema subterráneo o hidruros.

2.4 Situación actual de transición energética y uso de hidrógeno verde en Colombia

Colombia ha diseñado un marco normativo y de políticas públicas atractivo para el desarrollo de proyectos y la inversión en la transición energética justa. En el año 2014 empezó a regir la ley 1715, la cual establece incentivos para el desarrollo y la utilización de las FNCER y promueve la gestión eficiente de la energía (Enel, 2023). Para el año 2019 se estableció la ley 2169, la cual impulsa el desarrollo bajo en carbono del país. En 2020, el gobierno de Colombia anunció el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 51% con respecto al escenario proyectado para 2010, como una estrategia para cumplir con el Acuerdo de París. Como resultado, el Ministerio de Minas y Energía lanzó la Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno (NHR), en donde se establecen metas y acciones de corto, mediano y largo plazo. En el 2021 se establece la ley 2099 sobre transición energética, la cual incluye el hidrógeno verde y en el año 2022 se establece el decreto 1476 para la promoción del hidrógeno y el conpes 4075 que establece la Política Nacional de Transición Energética.

En este sentido, el país cuenta con una agenda clara para el despliegue de la economía del hidrógeno. Este elemento y sus derivados son parte fundamental de las estrategias de descarbonización, contempladas en las siguientes estrategias: Ley de transición energética, PND 2022-2026, PEN 2023-2052, Hoja de ruta de transición energética, así como la NHR. En esta

última, se traza una estrategia para lograr en el horizonte 2030 – 2050 una capacidad instalada de electrólisis en el país de 1 a 3 GW, que el 40% del hidrógeno consumido a nivel industrial sea hidrógeno de bajas emisiones, se produzcan 50 kton de hidrógeno fósil con captura de carbono, hayan de 2500 a 3500 vehículos de celda de combustible entre ligeros y pesados y de 50 a 100 hidrogeneras de acceso público (Ministerio de Minas y Energía, 2021; Asociación de Hidrógeno de Colombia, 2023).

De igual manera, a través del CONPES 4137 de 2024, Colombia ha establecido programas para la implementación de proyectos de hidrógeno a pequeña, mediana y gran escala, así como sus respectivos sistemas de transporte y distribución. Este marco normativo busca acelerar la generación de energías renovables y fomentar tecnologías que permitan el desarrollo del potencial de energía eólica y solar (Departamento Nacional de Planeación, 2024). Para conocer el estado actual de esta estrategia, se realizó la consulta en la base de datos global de la IEA (Agencia Internacional de Energía, s.f.) donde se relacionan los proyectos de producción e infraestructura de hidrógeno verde y se revisó la información compilada de proyectos operacionales en el país. Según este análisis, el país cuenta actualmente con más de 25 proyectos de hidrógeno en diversas etapas de desarrollo, de los cuales varios están en fase de experimentación, especialmente en áreas de movilidad.

2.5 Análisis económico de la producción de hidrógeno verde en Colombia

El costo de la producción de H₂V está influenciado por diversos factores como el costo de la electricidad o sistemas de generación de energía eléctrica, la eficiencia en los electrolizadores, la capacidad instalada y la madurez del mercado. Se debe considerar también que el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde requiere inversiones en infraestructura, incluyendo plantas de electrólisis, sistemas de almacenamiento y distribución, y conexiones a fuentes de energía renovable.

Costo Actual: Actualmente, producir hidrógeno verde en Colombia cuesta entre US\$4 y US\$6 por kilogramo, dependiendo de la región y la tecnología utilizada, posicionando al país como uno de los más competitivos de América Latina para la producción de H₂V (Asociación de Hidrógeno de Colombia, 2023).

Meta para 2030 – 2050: La Hoja de ruta para el hidrógeno en Colombia establece que el objetivo es reducir este costo a US\$1,70 por kg, mediante incentivos gubernamentales, financiamiento estructurado y una normativa clara (Ministerio de Minas y Energía, 2021). La meta al 2050 está en disminuir aún más dichos valores y lograr posicionar a Colombia como uno de los países con los costos de producción más bajos a nivel mundial.

Incentivos Gubernamentales: El gobierno colombiano ha implementado una serie de incentivos para fomentar la inversión en proyectos de hidrógeno verde, definidos en la ley 2099 de 2021 y ley 2294 de 2023:

- Deducción en el Impuesto sobre la Renta: Hasta el 50% de la inversión realizada, aplicable durante un período de 15 años.

- Exclusión del IVA: Aplicable a equipos, maquinaria y servicios necesarios para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde.
- Exención de Derechos Arancelarios: Para la importación de equipos y tecnología relacionados con proyectos de hidrógeno verde.
- Depreciación Acelerada de Activos: Permite una recuperación más rápida de la inversión en activos utilizados en proyectos de hidrógeno verde.
- Financiamiento a través de Fenoge: Ofrece opciones de financiamiento para proyectos de hidrógeno verde.

En resumen, la producción de H₂V en Colombia presenta una viabilidad económica prometedora, respaldada por costos de producción en disminución, incentivos gubernamentales y un entorno favorable para el desarrollo de proyectos sostenibles.

3. Evaluación de factibilidad

La evaluación de factibilidad para la producción y uso de H₂V en Colombia se basa en un enfoque integral que combina variables técnicas y económicas. Para el desarrollo de este punto, se adoptó un método basado en el análisis de la literatura, y se llevó a cabo una evaluación base de viabilidad que puede ser complementada en trabajos futuros.

3.1 Análisis del potencial de producción

Se consideran los recursos renovables disponibles en Colombia, especialmente la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Primero se calculó el potencial disponible para la electrólisis, este dato proviene de la capacidad de generación de las fuentes de energía renovables, dichos datos de entrada utilizados se tomaron de XM (Sinergox, s.f.).

Una vez hallado el potencial de generación eléctrica de acuerdo con cada fuente, se procede con la estimación del potencial de hidrógeno que se podría obtener de las energías renovables a través de la electrólisis, utilizando como referencia un electrolizador tipo PEM. Así, se calcula el potencial de hidrógeno utilizando la ecuación 1 (Contreras, et al., 2022).

$$P_{H_2} = \frac{(E_d \times \eta_e \times F_{ae})}{PCS} \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde E_d es el potencial de energía eléctrica disponible para el proceso de electrólisis a partir de las fuentes renovables (kWh/año), η_e es el factor de eficiencia del electrolizador (75%), F_{ae} es el factor disponible de la electrólisis (95%) y PCS es el poder calorífico del H₂ (39.4 kWh/kg H₂), estos valores se han usado como referencias en varios estudios de la literatura (Altayib & Dincer, 2022; Ma, et al., 2020). Entonces, de la aplicación de esta fórmula se puede estimar la cantidad de H₂ tentativa.

Para la energía eólica acorde con los potenciales de generación eléctrica en Colombia en el año 2024 (148,79 GWh) se puede estimar una producción de hidrógeno equivalente a $2,69 \times 10^6$ kg H₂/año. Para la energía solar, utilizando los valores de generación eléctrica en Colombia en el año 2024 (3303,36 GWh), se observa que se podría producir un equivalente a $5,97 \times 10^7$ kg

H₂/año. Por otro lado, para la generación hidroeléctrica, tomando en consideración los potenciales de electricidad provenientes de esta en el año 2024 (54504,22 GWh), se puede estimar que se podría obtener una potencia de generación de hidrógeno al equivalente a $9,86 \times 10^8$ kg H₂/año.

3.2 Aplicaciones potenciales en Colombia

Basándose en la revisión bibliográfica y los objetivos de descarbonización detallados en la hoja de ruta, se identificaron las aplicaciones de hidrogeno verde más adecuadas para Colombia. En la Industria, su uso en refinerías, producción de acero y fertilizantes. En el sector transporte para la implementación en movilidad sostenible, como vehículos de celda de combustible para transporte de carga y pasajeros. También en la generación y almacenamiento de energía en la integración en la red eléctrica para estabilizar la oferta de energías renovables intermitentes.

4. Conclusiones

Si bien las tecnologías de electrólisis han avanzado significativamente, los costos de producción del hidrógeno verde en Colombia aún requieren optimización para alcanzar competitividad frente a los combustibles fósiles. Además, la falta de infraestructura adecuada para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno verde representa uno de los principales retos para su implementación en el país. Se espera que la reducción de costos en energías renovables, y la creación de políticas públicas y de incentivos gubernamentales, favorezcan la viabilidad económica.

Se evaluó la factibilidad de la producción y uso del hidrógeno verde en Colombia considerando aspectos clave como recursos energéticos, tecnología, costos y regulación, lo que permitió identificar un alto potencial para el desarrollo de esta tecnología como parte de la transición energética del país, ya que representa una oportunidad estratégica para Colombia en su camino hacia un sistema energético más sostenible y competitivo. Existe una alta factibilidad, siendo la energía hidroeléctrica la que tendría mayor contribución, seguida por la energía solar y luego por la energía eólica, lo que podría contribuir a la diversificación de la matriz energética nacional.

Con el desarrollo de infraestructura, políticas adecuadas y un entorno de inversión favorable, el país puede consolidarse como un actor clave en la economía del hidrógeno a nivel regional y global. Lo anterior ya que presenta un alto potencial en recursos renovables, la producción de hidrógeno verde en Colombia puede ser una solución viable para la descarbonización del sector industrial, además, su implementación en el transporte y la generación de energía ofrece oportunidades para diversificar el uso de fuentes limpias.

5. Referencias

- Agencia Internacional de Energía. (2021). Revisión de energía global 2021.
- Agencia Internacional de Energía. (s.f.). Datos y estadísticas. Consultado el 20 de abril de 2025 en <https://www.iea.org/data-and-statistics>

- Altayib, K., and Dincer, I. (2022). Development of an integrated hydropower system with hydrogen and methanol production. Energy, No. 240. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122780>
- Asociación de Hidrógeno de Colombia. (2023). Panorama del Hidrógeno en Colombia.
- Contreras, L., Escobar, L., Acosta, R. and Medida, S. (2022). Factibilidad de producción de Hidrógeno verde en el Ecuador. Revista Investigación y Desarrollo, Vol. 16 pp.115-133. <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1805>
- Departamento Nacional de Planeación. (2024). Energía renovable en Colombia: resolver el trilema energético. Consultado el 02 de marzo de 2025 en <https://www.dnp.gov.co/publicaciones/Planeacion/Paginas/energia-renovable-en-colombia-resolver-el-trilema-energetico.aspx?utm>
- Departamento Nacional de Planeación. (2024). Potencial emergente en la explotación de hidrógeno.
- Ma, F., Li, L., Zeng, Q., and Zheng, J. (2020). Development Concept of Integrated Energy Network and Hydrogen Energy Industry Based on Hydrogen Production Using Surplus Hydropower. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 555, No.1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/555/1/012022>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia.
- Naciones Unidas. (2020). Cambio Climático, Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia.
- Naciones Unidas. (2023). Informe de los Objetivos Sostenibles.
- Naciones Unidas. (s.f.). Acerca de El Acuerdo de París. Consultado el 20 de abril de 2025 en <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2023). Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2019-2023.
- Sinergox (s.f.). Indicadores del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y el Mercado de Energía Mayorista (MEM). Consultado el 12 de febrero de 2025 en <https://sinergox.xm.com.co/Paginas/Home.aspx>
- Enel. (2023). ¿Cómo se beneficia Colombia con la generación distribuida?. Consultado el 13 de marzo de 2025 en <https://www.enel.com.co/es/historias/a202309-generacion-distribuida-beneficios-para-colombia.html>

Sobre los autores

- **Daniela Torres Morimitsu:** Ingeniera Mecánica y Magister en Ingeniería Mecánica, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Pereira. dantorres@utp.edu.co
- **Juan Fernando López López:** Ingeniero Mecánico, Magister en Sistemas Automáticos de Producción, Doctor en Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Pereira. Profesor titular. juanfll@utp.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

