

# Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión

## *Hydrogen Production and its Perspective in Colombia: A Review*

Orlando Castiblanco<sup>a, b</sup>, Dany José Cárdenas<sup>a</sup>

---

### RESUMEN

Existe una gran oportunidad para que las energías alternativas y específicamente para las tecnologías de hidrógeno prosperen en Colombia. El hidrógeno es un material prometedor que puede obtenerse de diferentes fuentes. Los combustibles fósiles, el agua, la biomasa, la energía nuclear y las energías renovables son las fuentes de obtención mencionadas en este estudio. Sin embargo, se deben superar algunos desafíos tecnológicos para promover el avance y la aplicación viable de las tecnologías relacionadas con la producción de hidrógeno. Colombia destaca en el mundo por su potencial con la producción de carbón y su disponibilidad de recursos hídricos, biomasa y fuentes renovables de energía, como la hidroeléctrica y la fotovoltaica. El presente trabajo tiene como objetivo presentar una revisión en el campo de la producción de hidrógeno, su uso como recurso energético y materia prima para la industria, y la perspectiva de su implementación en Colombia, considerando aspectos como el impacto económico, ambiental, social, tecnológico y la confiabilidad de los métodos de producción.

**PALABRAS CLAVE:** fuentes de producción; materia prima; energías alternativas; combustibles; cambios de tecnología.

---

### ABSTRACT

There is a great opportunity for alternative and specific energies for hydrogen technologies to prosper in Colombia. Hydrogen is a promising material that can be obtained from different sources. Fossil fuels, water, biomass, nuclear energy and renewable energies are the specific sources of production in this study. However, some technological challenges must be overcome to promote the advancement and viable application of technologies related to hydrogen production. Colombia stands out in the world for its potential with the production of coal and its availability of water resources, biomass and renewable energy sources, such as hydroelectric and photovoltaic. The present work aims to present a review in the field of hydrogen production, its use as an energy resource and raw material for industry, and the prospect of its implementation in Colombia, specific aspects such as economic, environmental impact, social, technological and the reliability of production methods.

**KEYWORDS:** production sources; raw material; alternative energies; fuels; technology changes.

---

a Fundación Universidad de América, Ingeniería Química. Bogotá, Colombia. ORCID Castiblanco, O.: 0000-0002-3238-0912; ORCID Cárdenas, D.J.: 0000-0002-2041-0846

b Autor de correspondencia: [orlando.castiblanco@profesores.uamerica.edu.co](mailto:orlando.castiblanco@profesores.uamerica.edu.co)

Recepción: 19 de abril de 2020. Aceptación: 7 de mayo de 2020

## Introducción

La demanda de recursos energéticos como consecuencia del desarrollo de las economías globales impulsa a la búsqueda de nuevas fuentes de energía que respondan de forma sostenible al crecimiento industrial y económico que experimenta el mundo actualmente. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2016), cerca del 80% de los recursos energéticos que se produce en el planeta proviene de los llamados combustibles fósiles. Esta dependencia conlleva importantes implicaciones tanto económicas como medioambientales. Desde el punto de vista económico, su producción centralizada en determinadas regiones del mundo, está gobernada por factores netamente políticos, lo que deriva en precios volátiles y elevados. Desde el punto de vista medioambiental, su combustión constituye en la principal causa de la emisión de gases de efecto invernadero en el planeta.

El hidrógeno es indispensable en la industria química, petrolera y energética. Sirve como materia prima para la síntesis de productos químicos como el amoníaco y el metanol (Acar y Dincer, 2019), se utiliza en las refinerías de petróleo para producir combustibles limpios, y se espera que su consumo aumente considerablemente, ya que las refinerías necesitan procesar crudos pesados y amargos (Bae et al., 2016). En el campo de la energía, la utilización de hidrógeno en los sistemas de transporte, ya sea para el motor y celda de combustible, recibe cierta atención favorable como un problema de política energética (Rifkin, 2011).

El hidrógeno no se encuentra en su forma elemental, sino combinado químicamente con otros elementos (como en los hidrocarburos o el agua) y, por consiguiente, para poder utilizarlo, debe extraerse (Baykara, 2018). Actualmente la principal dificultad para la producción de hidrógeno es la fuente o materia prima desde la cual se obtiene, cerca del 96% proviene de fuentes no renovables como el gas natural, petróleo y carbón, y sólo un 4% proviene de fuentes renovables y limpias (Abdalla et al., 2018; Hanley et al., 2018; Acar y Dincer, 2019).

La transición hacia un sistema energético descarbonizado que mitigue el Cambio Climático se relaciona con el concepto de “Economía del Hidrógeno”, el cual se originó en los años 70, como

respuesta a la primera crisis del petróleo<sup>1</sup>. El químico australiano John Bockris utilizó por primera vez esta frase en la primera Conferencia Mundial del Hidrógeno en 1976, el hidrógeno como un portador de energía limpia para el futuro (Santamarta, 2004; Saeedmanesh et al., 2018).

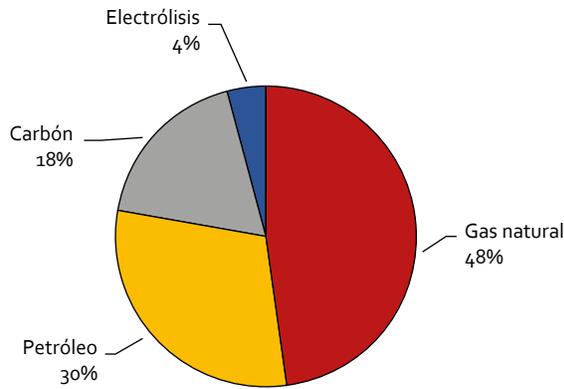
Este artículo describe los fundamentos básicos de los diferentes sistemas de producción de hidrógeno y aquellas alternativas más eficientes y sostenibles para su producción en Colombia. También presenta cuáles son las tendencias en cuanto al uso del hidrógeno como recurso energético y materia prima para la industria.

Para esta revisión se recurrió a una búsqueda exhaustiva de Internet, por medio de Google Scholar y Researchgate, haciendo una clasificación según el número de citas. La mayoría de las fuentes corresponden a artículos científicos actuales, pero también se consultaron libros y algunos reportes y boletines de entidades internacionales y regionales. Posteriormente, se organizó la información relacionada con los métodos de producción de hidrógeno, el panorama para su implementación en Colombia y las tendencias respecto a su utilización.

## Producción tradicional de hidrógeno a partir de hidrocarburos

Dadas las ventajas inherentes a los combustibles fósiles, como su disponibilidad, costo, almacenamiento y distribución, éstos desempeñan un papel importante en la producción de hidrógeno (Moliner et al., 2016). El gas natural y el petróleo representan respectivamente el 48% y el 30% de la producción mundial de hidrógeno (Figura 1). Sin embargo, casi todo el hidrógeno producido a partir de productos petrolíferos (como gases de refinería y residuos) se consume internamente en las refinerías (Gupta, 2008).

1 La economía global industrializada depende casi exclusivamente de los combustibles fósiles. La economía del hidrógeno es un modelo económico energético alternativo al uso de combustibles fósiles, en el cual la energía se almacena como hidrógeno.



**Figura 1.** Estructura mundial de producción de hidrógeno. Fuente: basada en Gupta (2008)

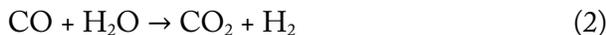
El gas natural es principalmente metano, y el proceso SMR (reformado de metano con vapor) se usa ampliamente para la producción de hidrógeno, en un rango de eficiencia del 65 a 75%.

En la reformación con vapor, reaccionan hidrocarburos ligeros, como el metano, con vapor de agua para formar hidrógeno:



En el caso típico, la reacción se efectúa a 870°C sobre un catalizador de níquel, empacado en los tubos de un horno de reformación.

Después de la reformación, el CO producido reacciona con vapor de agua para formar hidrógeno adicional, en la reacción de desplazamiento con agua:



Con esto se obtiene una mezcla formada principalmente por hidrógeno y CO<sub>2</sub>. Después de eliminar el CO<sub>2</sub>, por absorción selectiva en una solución de aminas, muchas plantas usan la metanación, proceso inverso de la reformación, para eliminar las trazas de óxidos de carbono.



La purificación del hidrógeno, luego de la reacción de desplazamiento con agua, puede hacerse también utilizando una unidad PSA (adsorción con oscilación de presión) para eliminar las impurezas de la corriente de hidrógeno (CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>) (Pinheiro et al., 2009). La adsorción con oscilación

de presión es en general, la primera opción para plantas de reformación con vapor de agua, por su combinación de alta pureza, costo moderado y facilidad de integración en la planta de hidrógeno (Chen et al., 2003; Bae et al., 2016).

También se puede producir hidrógeno por oxidación parcial de hidrocarburos (Freni et al., 2000; Lutz et al., 2004):



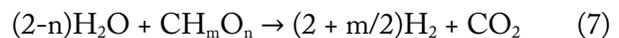
La reacción de desplazamiento participa también, y el resultado es una mezcla de CO y CO<sub>2</sub>, además de hidrógeno. La temperatura en la oxidación parcial no está limitada por los materiales de los tubos del catalizador, por lo que se puede usar mayor temperatura, con lo que se reduce el metano no convertido (Speight, 2016).

Dentro de las tecnologías que siguen utilizando hidrocarburos se analizan variantes al reformado con vapor y a la oxidación parcial, como el proceso autotérmico, cuyo objetivo es reducir el consumo energético ya que es una combinación del reformado con vapor, endotérmico, y la oxidación parcial, exotérmica (Abbas y wan Daud, 2010). También se encuentra el reformado con CO<sub>2</sub>, también conocido como reformado seco. Este proceso reemplaza el vapor de agua, parcial o totalmente, por CO<sub>2</sub>. De esta manera se consumen los dos gases principales del efecto invernadero en una sola reacción:



## Producción de hidrógeno a partir de carbón

Con el estado actual de la tecnología y las reservas mundiales de carbón, esta materia prima es una opción económica y técnicamente práctica para producir hidrógeno en plantas a gran escala. En la gasificación del carbón (CH<sub>m</sub>O<sub>n</sub>), éste se oxida parcialmente con vapor de agua y O<sub>2</sub> en un reactor de alta temperatura y alta presión, y los productos son principalmente gas de síntesis (H<sub>2</sub>, CO, mezclado con vapor y CO<sub>2</sub>).



A pesar de las ventajas de la gasificación del carbón, debido al alto contenido de carbono, este

método provoca mayores emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con otras tecnologías de producción de hidrógeno disponibles<sup>2</sup> (Shinnar, 2003). Actualmente, el hidrógeno producido a partir de la gasificación del carbón tiene un costo ligeramente mayor que el de reformado con vapor de gas natural, los costos unitarios de las materias primas son más bajos, mientras que los costos de capital unitarios son más altos (Gupta, 2008).

Durante las últimas décadas, el hidrógeno generado a partir de carbón se utiliza principalmente para la obtención de amoníaco, metanol, metano y los productos de Fischer-Tropsch (Gupta, 2008).

### Hidrógeno a partir de la gasificación termoquímica de la biomasa

La biomasa, al ser un recurso renovable, es una de las fuentes más prometedoras para la producción de biometano (gas renovable) e hidrógeno. Como tal, la biomasa está disponible abundantemente y está distribuida geográficamente de una manera más uniforme, en comparación con los combustibles fósiles (Quintero y Quintero, 2015).

La biomasa tiene un contenido de hidrógeno relativamente bajo, con contenidos de humedad muy variables, que pueden oscilar entre el 10% y el 70%. Este contenido de agua influye en la conversión termoquímica y el volumen de gases producidos por unidad de energía (Wang y Wan, 2009).

La gasificación de la biomasa es similar a la gasificación del carbón, excepto que se realiza a una temperatura mucho más baja. La gasificación de la biomasa genera el llamado biogás de síntesis, que contiene CO y H<sub>2</sub> en cantidades que dependen del proceso aplicado, el medio de oxidación y la relación combustible/oxidante (Venegas et al., 2016).

La gasificación es llevada a cabo a temperaturas superiores a 700 °C en presencia de oxígeno, aire y/o vapor. En estas condiciones se produce una combinación de pirólisis, oxidación parcial y/o reformado con vapor de hidrocarburos gaseosos y carbón (Tanksale et al., 2010; Arregi et al., 2018). Una

<sup>2</sup> El hidrógeno azul es aquel que se produce a partir de combustibles fósiles, donde el CO<sub>2</sub> se captura en lugar de ser emitido a la atmósfera, por lo que se considera de baja emisión de carbono.

ventaja de la gasificación basada en oxígeno es que no requiere ninguna fuente externa de energía.

### Hidrógeno a partir de la termólisis del agua

La termólisis del agua, también conocida como disociación térmica del agua, es una reacción que puede escribirse de la siguiente manera:



Para alcanzar un grado razonable de disociación, la reacción requiere una fuente de calor que pueda proporcionar temperaturas superiores a 2500 °C (Ju et al., 2018). Por lo tanto, la mezcla debe enfriarse antes de enviarse al proceso de separación, en donde las membranas semipermeables existentes se pueden utilizar a temperaturas menores a 2500 °C.

### Hidrógeno a partir de la electrólisis del agua

Entre los procesos para obtener hidrógeno a partir del agua se encuentra la conversión electrolítica. Este procedimiento combina reacciones de oxidación y reducción que producen gas hidrógeno separado del gas oxígeno (Ec. 8) (Ju et al., 2018). La electrólisis del agua en condiciones estándar requiere un mínimo teórico de 237 kJ de entrada de energía eléctrica para disociar cada mol de agua (Kelly, 2014).

Hay dos tecnologías principales disponibles en el mercado, los electrolizadores alcalinos y los de membrana de intercambio de protones (PEM). Un electrolizador teórico 100% eficiente consumiría 142 MJ por kilogramo de hidrógeno. Algunos desafíos se concentran en el alto consumo de energía y su costo (Wang et al., 2014; Shiva Kumar y Himabindu, 2019).

### Uso de energía nuclear en la producción de hidrógeno

La energía nuclear puede usarse como fuente de energía primaria en la producción centralizada de hidrógeno a través de procesos termoquímicos a alta temperatura, electrólisis del agua o electrólisis de

vapor a alta temperatura. La eficiencia energética es importante para proporcionar hidrógeno de manera económica y respetuosa con el medio ambiente (Dutta, 2014; Acar y Dincer, 2019). Por lo tanto, los reactores de alta temperatura, como las tecnologías de reactor refrigerado por gas, refrigerado por sal fundida y enfriado por metal líquido, son los candidatos para su uso en la producción de hidrógeno.

Las propiedades del proceso de producción de hidrógeno determinan los tipos de reactores que pueden adaptarse adecuadamente a esta tecnología. El primer requisito de diseño importante para la producción de hidrógeno, tanto termoquímico como electroquímico, es la alta temperatura necesaria para lograr una eficiencia energética alta (Dutta, 2014). Otro requisito para lograr una buena adaptación a la planta de hidrógeno es permitir una tasa efectiva de transferencia de calor a la planta química con una reducción mínima de la temperatura del refrigerante del reactor.

## **Uso de energías renovables en la producción de hidrógeno**

Los beneficios completos del hidrógeno como una materia prima ambientalmente sostenible se obtendrán cuando este se produzca a partir de fuentes renovables de energía<sup>3</sup>. Al seleccionar la fuente más sostenible para los sistemas de producción y al mejorar el rendimiento de las tecnologías de hidrógeno de uso final, como las celdas de combustible y los motores de combustión interna, se podría eliminar el papel dominante de los combustibles fósiles en los sistemas energéticos.

Uno de los métodos de producción de hidrógeno es la utilización de la energía solar, la cual se clasifica en cuatro tipos: fotovoltaica, energía solar térmica, fotoelectrólisis y biofotólisis (Plou et al., 2014). En la actualidad la eficiencia del foto-convertidor es de aproximadamente el 20% y la eficiencia de los electrolizadores es de alrededor del 80%. Además, la eficiencia para la conversión de energía solar es aproximadamente del 16% (Sharma y Kolhe, 2017).

<sup>3</sup> El hidrógeno verde es aquel que se produce por la electrólisis del agua a partir de electricidad proveniente de fuentes renovables. Su principal ventaja es que no emite CO<sub>2</sub>, el agua se transforma en moléculas de hidrógeno y oxígeno.

Esta tecnología enfrenta algunos desafíos, como el costo de las celdas fotovoltaicas que para la producción a gran escala y mantenimiento deben necesariamente reducirse. Otro aspecto está relacionado con la eficiencia energética, la seguridad, la durabilidad y la confiabilidad de la tecnología, la cual requiere de mayor investigación y mejoras (Parra et al., 2019).

La radiación solar es capaz de generar corriente eléctrica sin necesidad de equipos de alto costo o mantenimiento de por vida (Sharma y Kolhe, 2017). La eficiencia de la conversión solar a hidrógeno es el factor más importante a considerar para investigar cualquier dispositivo con tecnología foto-electroquímica, que destaca su potencial al fusionar la electrólisis del agua y la captación de energía solar en un solo dispositivo.

La energía eólica se obtiene del viento. La energía cinética asociada al movimiento de las corrientes de aire se convierte en energía eléctrica al provocar el movimiento de las aspas de un aerogenerador. Para producir y acumular la misma cantidad de energía eléctrica, un campo de energía eólica requiere menos área superficial que un campo de energía fotovoltaica. La energía eólica es la tecnología de energía renovable de más rápido crecimiento y es bastante competitiva en muchas regiones (Sherif et al., 2005).

En la Tabla 1 se comparan los diferentes sistemas energéticos con respecto a la producción de hidrógeno.

## **Perspectivas en Colombia**

### **Antecedentes**

En Colombia, el 31 de mayo del 2010 se presentó por parte del Ministerio de Minas y Energía, el programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales – PROURE (MME, 2010), el cual destaca el Plan de Acción 2015-2020 para promover el uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales de manera sostenible con el ambiente y los recursos naturales. Posteriormente algunas investigaciones destacadas como la presentada en Febrero de 2013, por Luis Gabriel Moreno y Carlos Eduardo Vargas en su trabajo de maestría titulado “La tecnología

**Tabla 1.** Ventajas y desafíos de los sistemas energéticos en la producción de hidrógeno.

| Sistema energético         | Ventajas   | Desafíos   |
|----------------------------|--|--|
| Hidrocarburos              | Se cuenta con recursos abundantes y a bajo costo                                   | Reducir las emisiones de CO <sub>2</sub> y de material particulado                                   |
| Biomasa                    | Se cuenta con recursos potencialmente abundantes                                   | La producción de hidrógeno es lenta y se requieren grandes áreas e investigación adicional           |
| Energía eléctrica          | Está disponible comercialmente y puede obtenerse de la conversión de otras fuentes | Desarrollar sistemas de generación eléctrica a gran escala a partir de energías renovables           |
| Energía solar fotovoltaica | Es una fuente abundante, sostenible y es aplicable en grandes y pequeñas escalas   | Se requiere encontrar materiales novedosos para una conversión efectiva y asequible                  |
| Energía térmica            | Es apropiado para la producción a gran escala y puede obtenerse de otras fuentes   | El proceso es complejo y requiere del desarrollo de materiales resistentes a la corrosión y al calor |
| Energía nuclear            | No hay emisiones de CO <sub>2</sub> ni de material particulado                     | Disminuir costos y reducir la generación de residuos potencialmente peligrosos                       |

Fuente: basada en Abdalla et al. (2018).

del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia” identifica algunas experiencias de gran relevancia en cuanto a la tecnología del hidrógeno a nivel mundial con el propósito de consolidar un plan estratégico para la utilización del hidrógeno en Colombia (Moreno y Vargas, 2013).

Otras investigaciones como la presentada en Agosto del año 2013 por el ingeniero Juan Guillermo Mejía en su artículo publicado en la Universidad Tecnológica de Pereira sobre la “Proyección al año 2025 para el uso del hidrógeno en el sector transporte del Valle de Aburrá”, presenta un plan que considera diversas variables como infraestructura, cadenas de distribución y plan de suministro, para la implementación o uso del hidrógeno destinado al sector transporte en el Valle de Aburrá (Mejía y Acevedo, 2013). En septiembre del mismo 2013, el físico y matemático Alejandro Martínez, en el Foro Mundial de Educación en Ingeniería (Cartagena), la cual lleva por nombre “Estudio de factibilidad de la economía del hidrógeno en Colombia”, destaca la factibilidad de la utilización de la economía del hidrógeno y sus aplicaciones en Colombia, las cuales considera pueden llegar a ser muy útiles para el desarrollo energético del país (Martínez et al., 2013).

### Potencial producción a partir del carbón

De acuerdo con el Ministerio de Minas y la Agencia Nacional de Hidrocarburos, las reservas de gas natural en Colombia al cierre de 2019 se ubicaron en 3,1 trillones de pies cúbicos, con una perspectiva

de 8 años, mientras que las reservas de petróleo llegaron a 2036 millones de barriles, que alcanzaría para 6,3 años. Esta condición permite que el hidrógeno producido a partir de estas materias primas se destine casi exclusivamente para el consumo interno de las refinerías.

Por otro lado, Colombia posee una de las mayores reservas de carbón en Latinoamérica y es un importante exportador de carbón térmico en el mundo (Tabla 2)<sup>4</sup>.

En Colombia se produce carbón térmico y metalúrgico, el carbón de La Guajira y buena parte de la zona carbonífera de la Costa Atlántica es térmico, mientras que gran parte del carbón del Altiplano Cundiboyacense es metalúrgico, el cual es sometido a un proceso de destilación para producir coque, una variedad de mineral de alto poder calorífico que se utiliza en hornos de la industria metalúrgica (UPME, 2012).

El carbón colombiano se conoce a nivel internacional por tener un alto poder calorífico, gran cantidad de volátiles y un bajo contenido de cenizas y azufre (UPME, 2012). La productividad de la industria del carbón en Colombia es alta, ya que muchos de los depósitos son superficiales, lo que ha permitido que el carbón se extraiga utilizando métodos de minería a cielo abierto (Moreno y Vargas, 2013).

<sup>4</sup> De acuerdo con la actual tasa de explotación, las reservas estimadas de carbón en Colombia aseguran más de 80 años de producción.

**Tabla 2.** Reservas recuperables (2017) y producción de carbón (2018)

| Posición | País           | Reservas (Mton) | Posición | País           | Producción (Mton) |
|----------|----------------|-----------------|----------|----------------|-------------------|
| 1        | Estados Unidos | 253455          | 1        | China          | 3908,690          |
| 2        | Rusia          | 176771          | 2        | India          | 817,473           |
| 3        | Australia      | 159634          | 3        | Estados Unidos | 756,167           |
| 4        | China          | 153022          | 4        | Australia      | 532,562           |
| 5        | India          | 111191          | 5        | Indonesia      | 604,705           |
| 15       | Brasil         | 7271            | 11       | Colombia       | 91,531            |
| 17       | Colombia       | 5380            | 28       | Brasil         | 5,530             |

Fuente: elaboración propia basada en El-Emam y Özcan (2019).

En Colombia, el crecimiento en la actividad extractivista asociada a la explotación minera en gran parte del territorio nacional ha puesto al descubierto una importante problemática social, ambiental, económica y cultural que ha sido evidente en varias regiones del país. En lo concerniente a la industria del carbón, la explotación a cielo abierto (principal método de explotación minera en Colombia) se ha catalogado como una de las etapas más contaminantes de toda la cadena de valor del carbón.

Colombia se ha dedicado a satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica en Europa y Estados Unidos, llegando a exportar alrededor del 90% del carbón extraído (UPME, 2012). Pero actualmente, con la caída estrepitosa en los precios internacionales del carbón, todo el sector minero que produce carbón térmico y también el de coque, está pasando por dificultades complejas.

El sector no espera que el precio se recupere con la misma velocidad con la que ha caído su cotización en los primeros meses de 2019, llegando a US\$41 la tonelada a principios de junio. El promedio del año 2020 escasamente estará por los US\$50 la tonelada, presentando una recuperación muy lenta para llegar a este precio. Y a corto o mediano plazo no se volverá a ver una cotización de US\$80 la tonelada como a finales del 2018 (US\$86 por tonelada a diciembre 31) (Portafolio, 2019).

Actualmente, algunos países apuestan por distintas maneras de aprovechar sus abundantes reservas de carbón. La motivación para ello radica en razones ambientales, económicas y principalmente, en el deseo de alcanzar la independencia energética.

La principal tecnología que actualmente está siendo utilizada es la gasificación del carbón, que busca

transformar el carbón químicamente en gas de síntesis en lugar de quemarlo<sup>5</sup>. Pero el sistema enfrenta dos grandes problemas: las plantas de gasificación de carbón producen más CO<sub>2</sub> que las centrales de carbón tradicionales y es uno de los sistemas de generación de energía que emplea más agua; por ello, el proceso requiere de esfuerzos mayoritarios para el desarrollo de sistemas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Con este panorama, Colombia cuenta con el potencial para la producción de hidrógeno a partir de carbón, un recurso muy abundante en el país, planteando la posibilidad de instalar plantas de gasificación en áreas vecinas a los más importantes yacimientos de carbón.

### Potencial energético de la biomasa residual

Los residuos se generan como resultado del crecimiento y desarrollo de una sociedad. Al ser la mayoría de ellos de carácter orgánico (biomasa residual), se puede suponer que presentan un enorme potencial para la producción de energía. En el contexto agropecuario e industrial del país, existe gran variedad de fuentes de biomasa residual. Las fuentes generadoras de biomasa que se tuvieron en cuenta en el reporte de la Tabla 3 son los residuos agrícolas y agroindustriales (banano, caña de azúcar, café, caña panelera, palma de aceite y plátano), los residuos del sector pecuario (avícola, bovino y porcícola) y los

<sup>5</sup> El gas de síntesis puede ser utilizable en la producción de gas y combustibles líquidos, como también para la generación eléctrica y la producción de materiales carboquímicos (equivalentes a los petroquímicos).

**Tabla 3.** Potencial energético de la biomasa residual en Colombia

| Fuente                             | Cantidad (Mton/año) | Potencial (TJ/año) |
|------------------------------------|---------------------|--------------------|
| Residuos del sector agrícola       | 20,4                | 11657,07           |
| Residuos del sector pecuario       | 105,4               | 117747,70          |
| Residuos sólidos orgánicos urbanos | 0,2                 | 409,85             |
| Total                              | 126,0               | 129814,62          |

Fuente: elaboración propia basada en Escalante et al. (2011).

residuos sólidos orgánicos urbanos (plazas de mercado, centros de abastos y podas en Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Bucaramanga, Cartagena, Cúcuta, Ibagué, Pereira, Villavicencio, Manizales y Montería) (Escalante et al., 2011).

En la producción de hidrógeno, la biomasa presenta unas características que ofrecen algunas ventajas para la conversión termoquímica, tales como alta volatilidad y bajos contenidos de azufre, nitrógeno y cenizas. La limitación más importante para utilizar la biomasa como fuente de energía radica en que al tratarse de tecnologías recientes, los procesos no han sido completamente desarrollados (Saravia, 2004).

El potencial energético total de las principales fuentes de biomasa residual, que se ha estimado en 129814,62 TJ/año, equivale a una generación eléctrica aproximada de 4116,4 MW.

### Favorabilidad de la producción a partir de la hidroelectricidad

Colombia posee abundantes recursos hidráulicos para establecer las condiciones propicias para una economía del hidrógeno. Se trata de energía renovable y muy asequible, ampliamente distribuida y favorecida por la geografía nacional, especialmente en la Región Andina, justamente donde se encuentra concentrada la mayor parte de la población. Y en consecuencia, existe un potencial excepcional para el desarrollo de proyectos de ingeniería de gran envergadura de los cuales la generación eléctrica del país depende casi en un 70% (Carvajal-Osorio et al., 2010).

El país cuenta con una capacidad instalada en generación de energía eléctrica de 16742 megavatios (MW), de estos, 10963 provienen de fuentes hidroeléctricas, 787 MW se generan en plantas menores, la energía eólica aporta al sistema 19 MW, y la cantidad restante es sumada por las centrales

térmicas a gas, carbón, combustibles líquidos y cogeneración (XM, s.f.).

Las plantas hidroeléctricas medianas a filo de agua (sin embalse), ofrecen mayores ventajas para el país por su instalación más sencilla y menos costosa que las convencionales, lo que hace posible la atención de demandas más localizadas, minimizando pérdidas de transmisión y evitando el impacto ambiental de las represas. Además, la explotación económica de estas centrales de generación eléctrica puede verse también beneficiada por el almacenamiento de la energía en forma de hidrógeno, ya que están más sujetas a las oscilaciones permanentes de caudal, no sólo estacionales sino también diarias, que no coinciden precisamente con las variaciones de la demanda de energía eléctrica. Esto ofrece una operación más firme y confiable, llegando a producir el hidrógeno con electricidad en exceso, por lo que resultaría más económico (Carvajal-Osorio et al., 2010).

Para el transporte de la energía, se pueden considerar dos opciones: transportar el hidrógeno por gasoducto desde la central hasta el punto de suministro, o, transmitir la electricidad generada en la central hasta el lugar donde se instalarían las celdas electrolíticas de producción de hidrógeno.

### Panorama de producción a partir de energía solar

Colombia cuenta con un potencial favorable de energía solar fotovoltaica frente a otras regiones del mundo. La mayor parte del territorio nacional cuenta con un recurso de brillo solar (horas de sol), alrededor de 4,8 y 12 horas de sol promedio diario anual. Lo anterior equivale a una radiación promedio uniforme de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> durante el año, la cual es superior al valor promedio mundial de 3,9 kWh/m<sup>2</sup> (Lache, 2015).

En Colombia, así como en todo el mundo, se ha reconocido la importancia de incorporar las energías renovables dentro de la matriz energética nacional, especialmente para Zonas No Interconectadas (ZNI), por esta razón, la Ley 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional (Congreso de Colombia, 2014), está principalmente orientada a garantizar el suministro energético en las ZNI, porque se reconoce el gran potencial del país para diversificar la actual matriz energética, dada su privilegiada y estratégica ubicación geográfica para formular proyectos, teniendo en cuenta las diversas opciones de energías renovables<sup>6</sup> (Lache, 2015).

Estadísticas de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) evidencian que de las iniciativas radicadas para la generación eléctrica a través de fuentes renovables no convencionales, el 88,3% tienen que ver con energía solar, en donde nueve de cada diez propuestas para generar energía, usarán paneles solares. La UPME y el Ministerio de Minas y Energía, estiman que para antes de 2030 cerca de 10% del consumo energético en Colombia va a provenir de proyectos fotovoltaicos o solares. Y con respecto a las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar, los métodos para producir hidrógeno, que tienen un mayor desarrollo técnico-económico, son los electroquímicos y los termoquímicos.

### Efecto en el mercado doméstico

En Colombia, el hidrógeno es susceptible de ser incorporado a la cadena energética a través de los procesos que involucran la transformación de la energía.

Investigar sobre las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de carbón con captura de CO<sub>2</sub>, abre la posibilidad de que el carbón siga siendo una fuente de generación de energía más limpia, con el beneficio adicional de que los productores de carbón puedan continuar con su actividad, y sigan

aportando a la economía del país (inversión extranjera, regalías, tributación y empleo), ya que se debe analizar la viabilidad de un modelo de negocio en el que se cambie la exportación de carbón por la exportación de hidrógeno.

Por otro lado, el país cuenta con algunos recursos de energía renovable abundantes y competitivos, como la energía hidroeléctrica, la energía solar y la biomasa, lo que puede facilitar un ascenso para la producción de hidrógeno en los próximos años. Sin embargo, en algunos casos, su carácter intermitente crea un desequilibrio entre la oferta y la demanda de electricidad en el sistema, por lo que se necesitarían baterías fiables y rentables para hacer frente al problema. El almacenamiento basado en el hidrógeno se está perfilando como una solución técnicamente viable y eficaz.

Es importante señalar que, para estimular la inversión, la economía debe ser apoyada y mejorada a través de políticas y programas de incentivos de mercado. Además, la reducción del costo de almacenamiento ayudará a maximizar el uso de la generación de energía renovable, reducirá las importaciones de energía y contribuirá a la prosperidad económica del país.

### Tendencias en cuanto al uso del hidrógeno como recurso energético y materia prima para la industria química

El hidrógeno es un medio de almacenamiento de energía y no una fuente de esta. La generación de electricidad a través de celdas de combustible o de una combustión interna con base a hidrógeno podría tener un gran impacto en el uso de una matriz energética ambientalmente sostenible, cuyas ventajas son favorecidas por la obtención de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, utilizando métodos de captura de CO<sub>2</sub>, o a partir de fuentes renovables de energía, tomando el agua de la naturaleza y separando sus componentes (oxígeno e hidrógeno) (Marchenko y Solomin, 2015).

Los altos costos del suministro de hidrógeno y la posibilidad de usarse en todas las aplicaciones donde se usa gas natural como combustible ha promovido recientemente la idea de inyectar el hidrógeno producido, por el exceso de electricidad en la red de

6 En 2019 entró en operación la planta de energía renovable más grande del país, ubicada en el municipio El Paso (Cesar), con capacidad para producir 176 GW/año, lo cual representa el 80% de la capacidad instalada de energía solar en Colombia. La construcción del proyecto demandó una inversión de US\$70 millones.

gas natural<sup>7</sup>. El hidrógeno puede ser transportado a bajas concentraciones (5 a 15%) por las tuberías de transmisión de gas natural existentes con sólo pequeñas adaptaciones, pero la durabilidad de algunas tuberías de metal puede afectarse cuando se exponen al hidrógeno durante largos períodos a altas concentraciones y altas presiones (Melaina et al., 2013; Hanley et al., 2018).

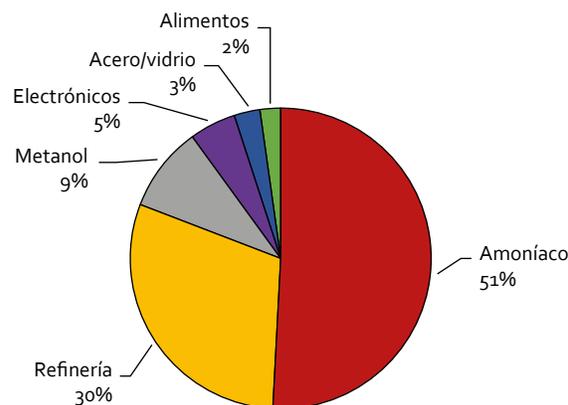
El hidrógeno puede llegar a considerarse el pilar fundamental de la transición energética (Acar y Dincer, 2019). Dentro de sus potencialidades existe gran cantidad de aplicaciones: fuente de energía para el transporte (Hanley et al., 2018), la industria (Acar y Dincer, 2019), aplicaciones residenciales (Abdalla et al., 2018) y generación eléctrica (Saeedmanesh et al., 2018).

En el sector del transporte, los motores de combustión interna alimentados por hidrógeno y las pilas de combustible pueden utilizarse junto con los vehículos eléctricos de batería para alcanzar la verdadera ecologización del transporte terrestre, aéreo y marítimo (Saeedmanesh et al., 2018). La dificultad que tiene esta tecnología actualmente para su masificación es que tienen que proporcionarse estaciones de servicio en todo el país, de lo contrario no tendría un impacto a gran escala.

La industria química y petroquímica utiliza grandes cantidades de hidrógeno como materia prima industrial. Entre estas industrias, la producción de amoníaco para la fabricación de úrea y otros fertilizantes corresponde al mayor consumo de hidrógeno, lo que representa aproximadamente el 51% del total de la demanda hidrógeno industrial (Kuntke et al., 2017).

El segundo mayor consumidor de hidrógeno como materia prima industrial es la industria de la refinación de petróleo (hidrocraqueo e hidrotratamiento). Su consumo representa alrededor del 31% de la demanda total de hidrógeno industrial (Speight, 2016). Los consumidores restantes de hidrógeno industrial son la producción de metanol, la

producción de acero y vidrio, el procesamiento de alimentos, etc. (Figura 2).



**Figura 2.** Consumo de hidrógeno en la industria.  
Fuente: basada en Speight (2016).

Con el crecimiento de la población mundial y la demanda de hidrógeno como materia prima industrial, es esencial que el suministro de hidrógeno provenga de fuentes limpias para reducir el impacto negativo de la industria sobre el medio ambiente (Parra et al., 2019).

La demanda energética de edificaciones es casi tan alta como la demanda energética de la industria (Arteconi et al., 2017). La ecologización de las edificaciones se puede realizar mediante la recuperación de calor residual (es decir, la calefacción/refrigeración urbana con plantas eléctricas tradicionales) y la transición a la energía de hidrógeno (Abdalla et al., 2018). El hidrógeno puede satisfacer efectivamente los requerimientos energéticos de las edificaciones de una manera segura, confiable y asequible (Dutta, 2014).

Por último, el hidrógeno puede convertirse en un medio eficaz de almacenamiento y transporte de energía renovable durante largas distancias y períodos de tiempo, y puede utilizarse para la producción de electricidad limpia (Rifkin, 2002).

## Conclusiones

El pleno desarrollo de una economía del hidrógeno es fundamental para un futuro sostenible con importantes beneficios ambientales, económicos y sociales. Además, la seguridad energética puede alcanzarse aprovechando las fuentes de energía y

<sup>7</sup> Bajo el concepto de "power to gas" (P2G), se sitúa la tecnología que permite generar hidrógeno mediante la electrólisis del agua e inyectarlo en la red gasífera directamente o convertido en metano (gas sintético) a partir de la reacción con CO<sub>2</sub> (Reacción de Sabatier).

materiales nacionales, disponibles localmente, confiables y seguros para la producción, distribución, almacenamiento y uso final del hidrógeno.

Para hacer del hidrógeno un componente crítico en la matriz energética nacional, se requieren importantes investigaciones e inversiones en los sistemas de producción de hidrógeno. Además, se necesita establecer una infraestructura de hidrógeno bien desarrollada, aumentando las capacidades de los sistemas de producción y reduciendo los costos, lo que llevaría a una amplia aceptación por parte del público y los gobiernos.

Colombia cuenta con importantes reservas de carbón (5380 MTON), que son de vital importancia para su desarrollo económico. Esta materia prima, también podría tener un potencial importante para la producción de hidrógeno, teniendo en cuenta los requerimientos medioambientales asociados.

La biomasa ofrece una enorme oportunidad para la generación de energía a gran escala y la producción de hidrógeno. En Colombia, el potencial energético de la biomasa residual es considerable (129814,62 TJ/año).

Colombia posee recursos hidroeléctricos suficientes (10963 MW) para contar con la viabilidad técnica, económica y ambiental respecto a una producción de hidrógeno basada en esta energía renovable.

En Colombia, la energía solar está ampliamente disponible y distribuida (4,5 kWh/m<sup>2</sup>), y el hidrógeno es susceptible de ser incorporado a la cadena energética por medio de procesos electrolíticos y termoquímicos.

Cuando se disponga de sistemas de hidrógeno renovables, asequibles, fiables, limpios y eficientes a escalas más grandes, habrá una transición más rápida de los combustibles fósiles a las energías renovables para una mejor sostenibilidad.

## Referencias

- Abbas, H., Wan Daud, W., 2010. Hydrogen production by methane decomposition: A review. *Int. J. Hydrog. Energy* 35, 1160-1190. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.036
- Abdalla, A., Hossain, S., Nisfindy, O., Azad, A., Dawood, M., Azad, A., 2018. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Convers. Manag.* 165, 602-627. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.03.088
- Acar, C., Dincer, L., 2019. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *J. Clean. Prod.* 218, 835-849. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.046
- Arregi, A., Amutui, M., Lopez, G., Bilbao, J. Olazar, M., 2018. Evaluation of thermochemical routes for hydrogen production from biomass: A review. *Energy Convers. Manag.* 165, 696-719. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.03.089
- Arteconi, A., Ciarrocchi, E., Pan, Q., Carducci, F., Comodi, G., Polonara, F., Wang, R., 2017. Thermal energy storage coupled with PV panels for demand side management of industrial building cooling loads. *Appl. Energy* 185, 1984-93. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.025
- Bae, J., Lee, S., Kim, S., Oh, J., Choi, S., Bae, M., Kang, I., Katikaneni, S., 2016. Liquid fuel processing for hydrogen production: A review. *Int. J. Hydrog. Energy* 41, 19990-20022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.135
- Baykara, S., 2018. Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *Int. J. Hydrog. Energy* 43(23), 10605-10614. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.022
- Carvajal-Osorio, H., Babativa, J., Alonso, J., 2010. Estudio sobre producción de H<sub>2</sub> con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. *Ing. Comput.* 12, 31-42. DOI: 10.25100/icy.v12i1.2700
- Chen, Z., Yan, Y., Elnashaie, S., 2003. Novel circulating fast fluidized-bed membrane reformer for efficient production of hydrogen from steam reforming of methane. *Chem. Eng. Sci.* 58, 4335-4349. DOI: 10.1016/S0009-2509(03)00314-2
- Congreso de Colombia, 2014. Ley 1715, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. DO 49150. Bogotá, DC.
- Dutta, S., 2014. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *J. Ind. Eng. Chem.* 20, 1148-1156. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.07.037
- El-Emam, R., Özcan, H., 2019. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *J. Clean. Prod.* 220, 593-609. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.309
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., Duarte, M., 2011. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Anexo E: Potencial energético departamental de la biomasa residual. Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Bogotá, DC. pp. 155-172.
- Freni, S., Calogero, G., Cavallaro, S., 2000. Hydrogen production from methane through catalytic partial

- oxidation reactions. *J. Power Sources* 87, 28-38. DOI: 10.1016/S0378-7753(99)00357-2
- Gupta, R. (Ed.), 2008. *Hydrogen fuel: Production, transport, and storage*. CRC Press, Boca Raton, FL. DOI: 10.1201/9781420045772
- Hanley, E., Deane, J., Gallachóir, B., 2018. The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives. *Renew. Sust. Energy Rev.* 82, 3027-3045. DOI: 10.1016/j.rser.2017.10.034
- International Energy Agency (IEA), 2016. *World Energy Outlook 2016: Executive summary*. Paris.
- Ju, H., Badwal, S., Giddey, S., 2018. A comprehensive review of carbon and hydrocarbon assisted water electrolysis for hydrogen production. *Appl. Energy* 231, 502-33. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.125
- Kelly, N., 2014. Hydrogen production by water electrolysis. En: Basile, A., Iulianelli, A. (eds.), *Advances in hydrogen production, storage and distribution*. Woodhead Publishing; Elsevier, Amsterdam; Oxford, UK. pp. 159-185. DOI: 10.1533/9780857097736.2.159
- Kuntke, P., Rodríguez, M., Widyakristi, L., Heijme, A., Sleutels, T., Hamelers, H., Buisman, C., 2017. Hydrogen gas recycling for energy efficient ammonia recovery in electrochemical systems. *Environ. Sci. Technol.* 51, 3110-3116. DOI: 10.1021/acs.est.6b06097
- Lache, A., 2015. Producción de hidrógeno a partir de energía solar panorama en Colombia. *Rev. Elementos* 5, 95-111. DOI: 10.15765/e.v5i5.621
- Lutz, A., Bradshaw, R., Bromberg, L., Rabinovich, A., 2004. Thermodynamic analysis of hydrogen production by partial oxidation reforming. *Int. J. Hydrog. Energy* 29, 809-816. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2003.09.015
- Marchenko, O., Solomin, S., 2015. The future energy: Hydrogen versus electricity. *Int. J. Hydrog. Energy* 40, 3801-3805. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.132
- Martínez, A., Barreneche, D., Bellon, D., Plata, D., Latorre, D., Porras, A., Rincón, L., 2013. Estudio de factibilidad de la economía del hidrógeno en Colombia. En: *World Engineering Education Forum WEEF 2013*. Cartagena, Colombia.
- Mejía, J., Acevedo, C., 2013. Proyección al año 2025 para el uso del hidrógeno en el sector transporte del Valle de Aburrá. *Sci. Tech.* 18, 327-334. DOI: 10.22517/23447214.8743
- Melaina, M., Antonia, O., Penev, M., 2013. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks. A review of key issues. NREL/TP-5600-51995. U. S. Department of Energy, Oak Ridge, TN. DOI: 10.2172/1219920
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia (MME), 2010. Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales (PROURE). Bogotá, DC.
- Moliner, R., Lázaro, M., Suelves, I., 2016. Analysis of the strategies for bridging the gap towards the hydrogen economy. *Int. J. Hydrog. Energy* 41, 19500-19508. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.202
- Moreno, L., Vargas, C., 2013. La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. Tesis de maestría. Facultad de Administración, Universidad de Nuestra Señora del Rosario, Bogotá, DC.
- Parra, D., Valverde, L. Pino, F., Patel, M., 2019. A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renew. Sust. Energy Rev.* 101, 279-294. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.010
- Pinheiro, A., Valentini, A., Sasaki, J., Oliveira, A., 2009. Highly stable dealuminated zeolite support for the production of hydrogen by dry reforming of methane. *Appl. Catal. A-Gen.* 355, 156-168. DOI: 10.1016/j.apcata.2008.12.007
- Plou, J., Durán, P., Peña, J., 2014. Perspectiva sobre la producción de hidrógeno por métodos emergentes basados en energía solar y de alta temperatura. *Boletín del Grupo Español del Carbón* (34), 12-17.
- Portafolio, 2019. Caída en precio del carbón ya afecta la operación en el país. *Diario de prensa*, 9 de junio. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/caida-en-precio-del-carbon-ya-afecta-la-operacion-en-el-pais-530425>; consultado: enero de 2020.
- Quintero, J., Quintero, L., 2015. Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano. *Gest. Ambient.* 18(1), 179-188.
- Rifkin, J., 2002. *The hydrogen economy: The creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth*. Tarcher/Putnam, Nueva York, NY. DOI: 10.1016/S1471-0846(03)80112-9
- Rifkin, J., 2011. *The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world*. Palgrave Macmillan, Nueva York, NY.
- Saeedmanesh, A., Kinnon, M., Brouwer, J., 2018. Hydrogen is essential for sustainability. *Curr. Opin. Electrochem.* 12, 166-181. DOI: 10.1016/j.coelec.2018.11.009
- Santamarta, J., 2004. Las energías renovables son el futuro. *World Watch* 22, 34-40.
- Saravia, E., 2004. Posibilidades de participación de la biomasa como combustible en Colombia utilizando como herramienta de modelaje de Long-range Energy Alternative Planning System (LEAP). Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, DC.
- Sharma, P., Kolhe, M., 2017. Review of sustainable solar hydrogen production using photon fuel on artificial leaf. *Int. J. Hydrog. Energy* 42, 22704-22712. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.115
- Sherif, S., Barbir, F., Veziroglu, T., 2005. Wind energy and the hydrogen economy - review of the technology. *Solar Energy* 78, 647-660. DOI: 10.1016/j.solener.2005.01.002

- Shinnar, R., 2003. The hydrogen economy, fuel cells, and electric cars. *Technol. Soc.* 25, 455-476. DOI: 10.1016/j.techsoc.2003.09.024
- Shiva Kumar, S., Himabindu, V., 2019. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Mater. Sci. Energy Technol.* 2, 442-454. DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002
- Speight, J., 2016. Hydrogen in refineries. En: Stolten, D., Emonts, B. (Eds.), *Hydrogen science and engineering: Materials, processes, systems and technology*. Wiley; VCH, Weinheim, Alemania. Vol. 2. pp. 1-18. DOI: 10.1002/9783527674268.ch01
- Tanksale, A., Beltramini, J., Lu, G., 2010. A review of catalytic hydrogen production processes from biomass. *Renew. Sust. Energy Rev.* 14, 166-182. DOI: 10.1016/j.rser.2009.08.010
- Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME), 2012. *La cadena del carbón en Colombia: fuente de energía para el mundo*. Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Bogotá, DC.
- Venegas, D., Meléndrez, M., Celi, S., Ayabaca, C., 2016. Métodos amigables de producción de hidrógeno como fuente de energía limpia. En: *II Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación*. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. pp. 95-104.
- Wang, J., Wan, W., 2009. Factors influencing fermentative hydrogen production: a review. *Int. J. Hydrog. Energy* 34, 799-811. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.11.015
- Wang, M., Wang, Z., Gong, X., Guo, Z., 2014. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review. *Renew. Sust. Energy Rev.* 29, 573-588. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.090
- XM, s.f. Mercado de energía. Disponible en: <https://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx>; consultado: febrero, 2020.