

Arturo Fernández Madrigal y Nini Rose Mathews

# Hidrógeno verde, el combustible del futuro

La generación eléctrica mundial se basa en el uso indiscriminado de los combustibles de origen fósil, los cuales han causado un gran deterioro ecológico. La alternativa más viable es el uso de las energías renovables para la generación de un combustible limpio, como es el hidrógeno verde.

## El problema ambiental y la necesidad de un cambio de combustible

Como es del dominio público, el clima del planeta está cambiando drásticamente. Hay diversas causas, entre las que se encuentran los ciclos naturales del clima en el planeta, el desarrollo de actividades humanas, etc. Estos cambios nos afectan de manera importante, ya que tienen efectos relevantes para la economía del país. Dichos cambios se asocian con la emisión de gases de efecto invernadero, tales como  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ , etc., los cuales son producto de las diversas actividades humanas. La mayoría de estos gases provienen de la combustión de combustibles fósiles. En particular, alrededor del 40% del total de las emisiones de estos gases emanan del sector transporte.

La presencia de estos gases en nuestra atmósfera ha traído diversos problemas a nuestro entorno, los cuales van desde el incremento de la temperatura del planeta, deterioro ecológico, clima extremo, daños a la salud, etc., lo que repercute económicamente en nuestra sociedad. En este contexto es importante tomar fuertes medidas para disminuir en gran medida el uso de combustibles fósiles y hacer la transición al uso de otros tipos de combustibles que no emitan este tipo de gases. Uno de los combustibles que posee características adecuadas para utilizarse en los diversos sectores de nuestra economía es el hidrógeno.

## El hidrógeno como combustible

El uso del hidrógeno es indispensable para la industria petroquímica, donde se utiliza para la refinación del petróleo; en la agroindustria para la fabricación de fertilizantes; en la elaboración de productos químicos, como el peróxido de hidrógeno (agua oxigenada), y en la industria de semiconductores, entre otros. De acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, el hidrógeno tiene el mayor poder calorífico,



**Vector energético** ▶ El vector energético es aquel compuesto, dispositivo o sustancia que almacena energía. Ésta puede utilizarse de formas diversas.

comparado con cualquier otro combustible de origen fósil, lo cual implica que nos proporciona mayor contenido de energía por kilogramo de hidrógeno; así, por ejemplo, un kilogramo de hidrógeno genera la misma cantidad de energía que 2.8 kg de gasolina, que 2.54 kg de gas natural y la misma cantidad de energía que 2.6 kg de gas licuado propano. En comparación con el gas natural, el hidrógeno posee entre 33.33 y 39.41 kWh/kg, mientras que aquél posee menos de la mitad; es decir, entre 13.90 y 15.42 kWh/kg. Aunado a lo anterior, durante su combustión no emite ningún gas de efecto invernadero.

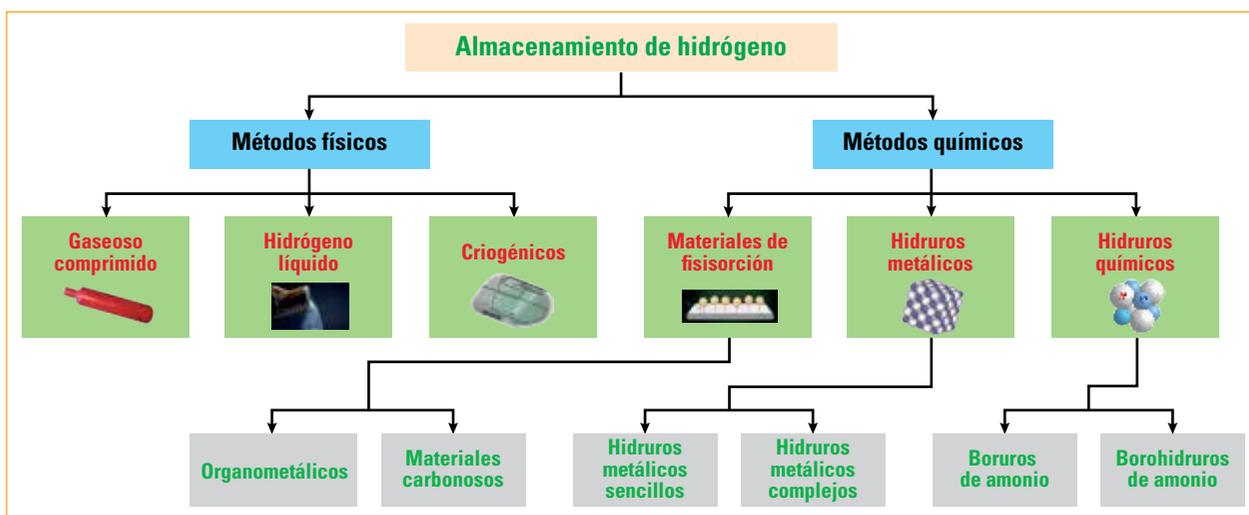
Debido a su alto poder energético, una posible explosión de este gas puede resultar más violenta por su alto contenido energético. Sin embargo, debido a que el hidrógeno posee un coeficiente de difusión más alto, comparado con cualquier gas o compuesto, bastará asegurarse de ventilar adecuadamente el posible lugar de fuga de este gas para reducir el riesgo de explosión. La temperatura de autoignición de una mezcla de hidrógeno/aire es de alrededor de 558 °C, mientras que para la mayoría de los combustibles fósiles esta temperatura oscila entre 200 y 500 °C. Esto indica que la mezcla hidrógeno/aire se inflamará a mayor temperatura, representando con ello una ventaja desde el punto de vista de la seguridad. Sin embargo, su energía de ignición es baja (0.017 milijoules), lo cual indica que dicha mezcla es propensa a inflamarse, y serán suficientes descar-

gas eléctricas estáticas para que esto ocurra. Al igual que los combustibles fósiles, el hidrógeno es un **vector energético**; es decir, es necesario obtenerlo a partir de diversas fuentes. Mientras que las gasolinas son producto del procesamiento del petróleo utilizando diversos procesos de refinación, en el caso del hidrógeno su obtención es posible a partir del petróleo y el agua.

Aunque tradicionalmente el hidrógeno se almacena en forma de gas, la formación de hidruros metálicos o la adsorción de dicho gas en sistemas como los nanotubos de carbón, los compuestos fulerenos, las microesferas de vidrio o en la formación de alanatos, han resultado ser la forma más segura para su almacenamiento y transportación. En particular, los hidruros metálicos actualmente tienen un costo aproximado de \$8 USD/kilogramo (**Figura 1**).

■ **El hidrógeno verde**

■ Al igual que las gasolinas, el hidrógeno no se encuentra disponible en la naturaleza, se obtiene a partir del petróleo o el agua. Actualmente, se han establecido denominaciones basadas en colores para clasificar el hidrógeno, con el fin de distinguir su origen (National Grid, 2022). Así, por ejemplo, el *hidrógeno café* y el *negro* se obtienen a partir de derivados del petróleo. Esto quiere decir que empleando el gas natural, el carbón u otros derivados de origen fósil,

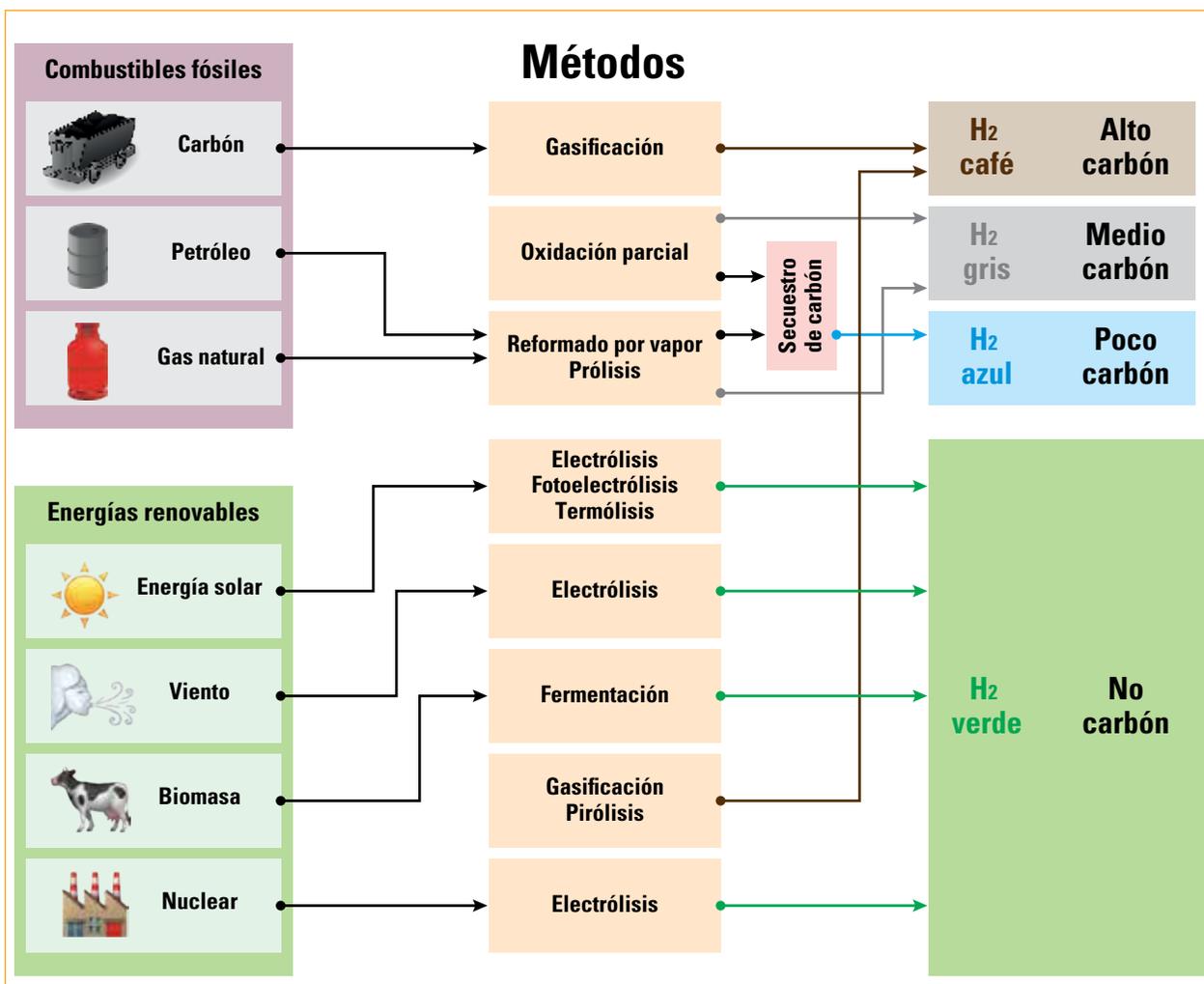


**Figura 1.** Métodos de almacenamiento del hidrógeno.

y realizando un tratamiento termoquímico, mediante el proceso denominado gasificación, podrá obtenerse hidrógeno negro o café. De igual manera, el *hidrógeno gris* se obtiene a partir de productos derivados del petróleo; en particular, utilizando el metano, al cual se le hace un tratamiento termoquímico con cualquiera de los siguientes procesos: reformación catalítica, autorreformado u oxidación parcial. El *hidrógeno azul* se obtiene mediante oxidación parcial: se le somete al proceso denominado secuestro de carbón (atrapamiento del CO<sub>2</sub> mediante diversos métodos).

Por otro lado, la denominación de *hidrógeno verde* corresponde al hidrógeno que se obtiene a partir del agua, empleando el proceso denominado electrólisis (Wood Mackenzie, 2019). La electrólisis requiere electricidad, la cual deberá obtenerse a partir

de energías renovables. También es posible obtener hidrógeno verde a partir de fotólisis o fotoelectrólisis del agua, proceso similar a la electrólisis, en el que, en lugar de aplicar una corriente eléctrica para “romper” la molécula de agua, se hace uso de materiales fotosensibles que inyectan electrones al agua, empleando la absorción de la radiación solar. Existe otro proceso denominado termólisis, el cual consiste en la descomposición directa del agua en sus componentes (hidrógeno y oxígeno), los cuales se obtienen al someter al agua a temperaturas superiores a los 2500°C. A estas elevadas temperaturas, prácticamente el 20% del agua se descompone en hidrógeno y oxígeno, por lo que para lograrlo será necesario utilizar concentradores solares con los cuales se pueden obtener dichas temperaturas. La **Figura 2** muestra



**Figura 2.** Clasificación por colores de los diversos métodos de preparación del hidrógeno.

con mayor detalle los procesos de conversión y los diversos métodos que se emplean para obtener las diversas denominaciones de hidrógeno.

■ **La economía del hidrógeno**

■ Con los Acuerdos de París (United Nations, 2015), algunos países propusieron iniciar la descarbonización de sus economías para detener el incremento de la temperatura del planeta y así reducir los efectos del cambio climático. Para lograrlo, en el año 2050 se tiene que reducir la emisión de gases de invernadero en alrededor del 85%; aunque esta propuesta se contrapone a la necesidad de satisfacer la creciente demanda energética (la cual se estima que para 2050 será del 150%). En la actualidad se utilizan los combustibles de origen fósil; sin embargo, los recursos petrolíferos se están agotando, por lo que es necesario migrar a una economía basada en un recurso energético sostenible y que no posea altos niveles de contaminación. Las tecnologías del hidrógeno ofrecen esta alternativa energética para continuar con el desarrollo económico mundial sin comprometer aspectos ambientales. Dichas tecnologías, de la mano de fuentes renovables de energía, permitirán generar la energía eléctrica necesaria para el desarrollo económico. Asimismo, el uso de este gas ayudará a minimizar los **problemas de intermitencia** que presentan las energías renovables.

Diversos países del mundo ya iniciaron acciones enfocadas al desarrollo de un sistema económico basado en el uso del hidrógeno. En particular, Islandia ha realizado los cambios necesarios para que, a partir de 2050, su economía se base en su uso. En diversos países de la Unión Europea se han establecido programas, tales como rutas tecnológicas, libros blancos y se han implementado leyes para el fomento del hidrógeno como combustible. Algunos países del continente asiático desarrollan programas para la utilización del hidrógeno en sectores de la economía, como el transporte. La gran mayoría de las compañías automotrices han desarrollado e implementado automóviles que funcionan con hidrógeno, utilizando celdas de combustible; en el sector industrial se emplea el hidrógeno para operar centrales

termoeléctricas, y en el sector residencial se utiliza el hidrógeno para proveer energía eléctrica a las casas o departamentos. Existen proyectos demostrativos en los cuales se ha validado la operatividad de este gas como combustible en transportes marítimos, ferrocarriles, submarinos, aviones, etc., utilizando celdas de combustible o la adaptación de motores de combustión interna para que funcionen con hidrógeno. Actualmente, el costo de conversión de un motor de combustión interna para utilizar hidrógeno ronda entre los 4 000 y los 6 000 pesos. Por otro lado, el costo de un automóvil con celdas de combustible oscila entre el millón y medio y los dos millones de pesos.

La visión de una economía basada en el hidrógeno significa el empleo de fuentes renovables de energía para producir hidrógeno verde, lo cual incidiría en el uso de recursos domésticos, reduciendo los costos de elaboración y permitiendo el cuidado del medio ambiente. En la medida en que se alcancen estas expectativas, una economía del hidrógeno beneficiaría al mundo proporcionando una mayor seguridad energética y calidad medioambiental.

Existen diversos retos en la construcción de la economía del hidrógeno, algunos de los cuales son de tipo tecnológico, como el desarrollo de materiales catalíticos de bajo costo, el desarrollo de sistemas eficientes de almacenamiento del hidrógeno, etc., así como la implementación de cadenas de valor para sistemas basados en el uso del hidrógeno como combustible. En relación con los retos sociales, deberán desarrollarse programas que favorezcan la apropiación social de las tecnologías del hidrógeno en los diversos estratos sociales.

■ **Cambios legislativos para nuevos combustibles**

■ Una economía basada en el uso del hidrógeno como combustible requiere de la implementación de leyes y políticas públicas que fomenten y regulen el uso de este combustible. Actualmente, existen diversos organismos internacionales que promueven diferentes lineamientos para la implementación de normas y códigos en la producción, almacenamiento, uso, manejo y distribución de este gas. En cada país

**Problemas de intermitencia**

En las energías renovables, son producto de los cambios que sufre, por ejemplo, la intensidad en la radiación solar a lo largo del día y la noche.



se deberán instaurar estos lineamientos para que los organismos legislativos nacionales creen órganos dedicados a su desarrollo y control. En México, dichos lineamientos se discuten y aprueban en los Comités Consultivos Nacionales de Normalización (CCNN) y los Comités Técnicos de Normalización Nacional (CTNN), organismos conformados por diversos sectores representativos de la sociedad. En ellos se norman las actividades, instrumentos y procedimientos que se realizarán para las diversas aplicaciones en las que interviene el hidrógeno como combustible. Estos comités están regulados por la Secretaría de Economía (en el caso de México), que se encarga de darle validez oficial a las actividades y documentos que resulten de las reuniones que se realicen.

En diversos países del mundo, se tienen ejemplos de lineamientos que –a partir de propuestas de proyectos de implementación del uso de hidrógeno como combustible para diversos sectores de la sociedad– han culminado en normas y leyes tanto a nivel estatal como nacional, y en donde el poder legislativo ha participado activamente. Un ejemplo de ello

es Argentina, donde en 2004 la Cámara de Diputados aprobó el uso del hidrógeno como combustible, con el propósito de dar viabilidad a proyectos de generación de hidrógeno mediante turbinas eólicas en la Patagonia. Otro caso es la iniciativa de un grupo denominado Hydrogen Fuel Cell Partnership, en California, EUA, que propuso a inicios del año 2000 que a partir de 2025 circulen en el estado automóviles con cero emisiones de dióxido de carbono, por lo que la oficina gubernamental recomendó su implementación a nivel estatal. Recientemente, el gobierno de Nueva Zelanda ha preparado un programa estratégico para el uso del hidrógeno verde, en tanto que Japón ha llevado a cabo un programa de 80 estaciones de llenado de hidrógeno; asimismo, junto con 21 países, coordina algunos proyectos de implementación del hidrógeno verde. Corea del Sur, por su parte, ha desarrollado un plan de trabajo para tener autobuses operados con hidrógeno en los siguientes 20 años, mientras que en Francia se tiene programado destinar 100 millones de euros para realizar diversos proyectos con hidrógeno y concluirlos

en los próximos cinco años. En 2018, en Bélgica, se aprobó una ley para el fomento de proyectos del uso del hidrógeno que se llevarán a cabo en los próximos 25 años. En la gran mayoría de las propuestas se ha tenido que solicitar el apoyo del gobierno y el poder legislativo para poder realizar estos proyectos.

■ **Perspectivas a futuro para el empleo del hidrógeno como combustible**

■ Es frecuente escuchar en los medios de comunicación que el sistema energético, tanto mexicano como mundial, seguirá basado en el uso del petróleo, por lo menos hasta el año 2050. Es decir, que todavía dependeremos del petróleo los próximos 30 años. Sin embargo, muchos sectores de la sociedad han reaccionado emprendiendo acciones dirigidas al desarrollo y construcción de una economía basada en el hidrógeno, para lo cual serán necesarias la elaboración y puesta en marcha de un plan nacional y cronograma tecnológico del uso del hidrógeno como combustible en los diversos sectores produc-

tivos de la economía. Cada país establecerá las directrices que se deban seguir con el fin de realizar el cambio hacia una economía basada en el hidrógeno. En este plan a futuro se deberá indicar en qué sectores de la sociedad podrá tener mayor impacto la sustitución del combustible; por ejemplo, en el sector transporte, residencial e industrial, entre otros. Del mismo modo, se establecerán los lineamientos jurídicos y legislativos para implementar estos cambios en los diversos sectores de la sociedad. Junto a todas estas propuestas, se deberán establecer programas de apropiación social de la tecnológica, con el objetivo de que la población integre estos cambios en sus actividades y se reduzca el posible rechazo social al cambio tecnológico.

■ **Conclusiones**

■ Como producto de la actividad humana, se ha incrementado de manera descontrolada la emisión de diversos gases que producen el cambio climático. Dichos gases son producto de la utilización de com-



bustibles provenientes del petróleo. Gases como el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, óxidos nitrosos, etc., modifican el clima, además de tener un efecto nocivo en los seres vivos. Por tal motivo, es necesario sustituir el tipo de combustible que se usa con uno que no produzca gases contaminantes del ambiente. Por sus características fisicoquímicas, el hidrógeno es un combustible adecuado para este propósito. Y si bien este gas es muy abundante, es necesario extraerlo de fuentes como el petróleo y el agua. Dependiendo de su fuente de extracción, recibe diversos nombres, como hidrógeno gris, café, azul, verde, etc. Desde el punto de vista de la sustentabilidad, el hidrógeno verde es el más adecuado, ya que para su elaboración se deben utilizar fuentes renovables de energía, empleando la electricidad que de ellas se genera para separar la molécula de hidrógeno presente en el agua.

El empleo del hidrógeno como combustible ha despertado enorme interés en México y en el mundo, interés que ha hecho que diversos países inviertan recursos económicos para producirlo, almacenarlo y aplicarlo en una variedad de sectores, como el industrial, residencial y de transporte. Esto ha traído como consecuencia que se esté desarrollando la denominada economía del hidrógeno; es decir, la búsqueda de un desarrollo económico, industrial y del trans-

porte, utilizando hidrógeno como combustible. Para ello será preciso superar los retos que plantea dicha economía, uno de los cuales es que deberán implementarse leyes y políticas públicas que permitan su crecimiento.

Es de suma importancia la continuación y aceleramiento del desarrollo de esta nueva economía, ya que de esa manera podremos garantizar la descarbonización de nuestra economía y disminuir los efectos del actual cambio climático.

Los autores agradecen a A. Elizabeth James por el amable apoyo en la realización de las figuras, y al físico Juan Tonda por la revisión del texto.

#### Arturo Fernández Madrigal

Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

afm@ier.unam.mx

#### Nini Rose Mathews

Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

nrm@ier.unam.mx

#### Lecturas recomendadas

National Grid (2022), “The hydrogen color spectrum”, *National Grid*, sección Energy Explained [en línea]. Disponible en: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>, consultado el 26 de febrero de 2025.

Rinkenbach, J. P. (2022), “Hidrógeno: ¿espejismo o realidad?”, *Energía a Debate* [en línea]. Disponible en: <https://energiaadebate.com/hidrogeno-espejismo-o-realidad>, consultado el 26 de febrero de 2025.

United Nations (2015), “El acuerdo de París”, *United Nations/Climate Change* [en línea]. Disponible en: [unfccc.int](https://unfccc.int), consultado el 26 de febrero de 2025.

Wood Mackenzie (2019), “Energy transition. The future for green hydrogen”, *Wood Mackenzie* [en línea]. Disponible en: <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/>, consultado el 26 de febrero de 2025.