

## **Hidrógeno: tecnologías de producción, almacenamiento y aplicaciones**

## **Hydrogen: production technologies, storage, and applications**

Gonzalo Martínez-Barrera <sup>a</sup>, Miguel Martínez-López <sup>b\*</sup>, Antonio Téllez-López <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Km. 12 de la carretera Toluca-Atlacomulco, San Cayetano 50200, Toluca, Estado de México, México.

<sup>b</sup> Universidad Politécnica del Valle de Toluca, División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Carretera Toluca-Almoloya de Juárez km. 5.6, Santiaguito Tlalcilcali 50904, Almoloya de Juárez, Estado de México, México.

Correspondencia para autor: Miguel Martínez-López  
Universidad Politécnica del Valle de Toluca  
Correo electrónico: [miguel.martinez@upvt.edu.mx](mailto:miguel.martinez@upvt.edu.mx)

## Resumen

La creciente demanda energética y el cambio climático han acelerado la transición y diversificación energética de combustibles fósiles a energías alternativas. Así mismo, se ha investigado sobre combustibles que ayuden a la descarbonización de sectores como el transporte y la generación de electricidad. Una opción es el hidrógeno, el cual es considerado un “combustible limpio” ya que su combustión produce agua como producto secundario. El hidrógeno molecular es un portador de energía que puede canalizarse o transportarse a donde se requiera y puede ser producido a partir de diferentes materias primas y métodos, entre ellos, mediante energías renovables. Además, es utilizado como materia prima para la producción de fertilizantes y diferentes productos químicos, así como para la eliminación de impurezas durante la refinación del petróleo.

**Palabras clave:** hidrógeno, producción, almacenamiento, aplicaciones.

## Abstract

The growing energy demand and climate change have accelerated the energy transition and diversification from fossil fuels to alternative energies. Likewise, research has been carried out on fuels that help decarbonize sectors such as transport and electricity generation. One option is hydrogen, which is considered a “clean fuel” since its combustion produces water as a secondary product. Molecular hydrogen is an energy carrier that can be channeled or transported to where it is required and can be produced from different raw materials and methods, including renewable energies. In addition, it is used as a raw material to produce fertilizers and different chemical products, as well as for the elimination of impurities during oil refining.

**Keywords:** hydrogen, production, storage, applications.

## 1. Introducción.

El uso excesivo de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón mineral ha provocado graves problemas ambientales debido a la emisión de los gases contaminantes que se producen durante su combustión, entre ellos, el monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), siendo este último uno de los principales gases de efecto invernadero que provoca el calentamiento global y, en consecuencia, el cambio climático. Se ha estimado que en la década de los años 70's del siglo 20 la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha sido de 325 ppm (partes por millón) mientras que para el 2020 esta concentración alcanzó 412 ppm, es decir, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se incrementó 27% en aproximadamente 50 años (NOAA Climate, 2022).

La creciente demanda energética, calentamiento global y efectos del cambio climático han obligado a los gobiernos a cambiar el sistema energético basado en combustibles fósiles a otro con bajas o nulas emisiones de carbono. Esta transición energética puede lograrse mediante el uso de tecnologías basadas en energías de fuentes renovables las cuales han reducido considerablemente sus costes en las últimas décadas.

Esta transición energética no se ha limitado a la diversificación de fuentes de energía, desarrollo de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética, también ha sido necesario desarrollar combustibles amigables con el ambiente para disminuir las emisiones de contaminantes de origen antropogénicas. Entre estos combustibles alternativos podemos encontrar a los biocombustibles (biodiésel, bioetanol, biogás) y al hidrógeno.

El hidrógeno ha sido llamado el “combustible del futuro” debido a su gran versatilidad ya que es un portador de energía y puede utilizarse como medio de almacenamiento de energía, como combustible en celdas de combustible para producir energía eléctrica, como reactivo en diversas industrias, o directamente

como combustible produciendo vapor de agua. Además, puede ser producido a partir de una gran variedad de materias primas y mediante fuentes de energía renovable, lo que convierten al hidrógeno en un combustible inocuo del medio ambiente.

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es mostrar en forma sencilla y clara los métodos de producción de hidrógeno molecular, las tecnologías de almacenamiento y las aplicaciones más importantes.

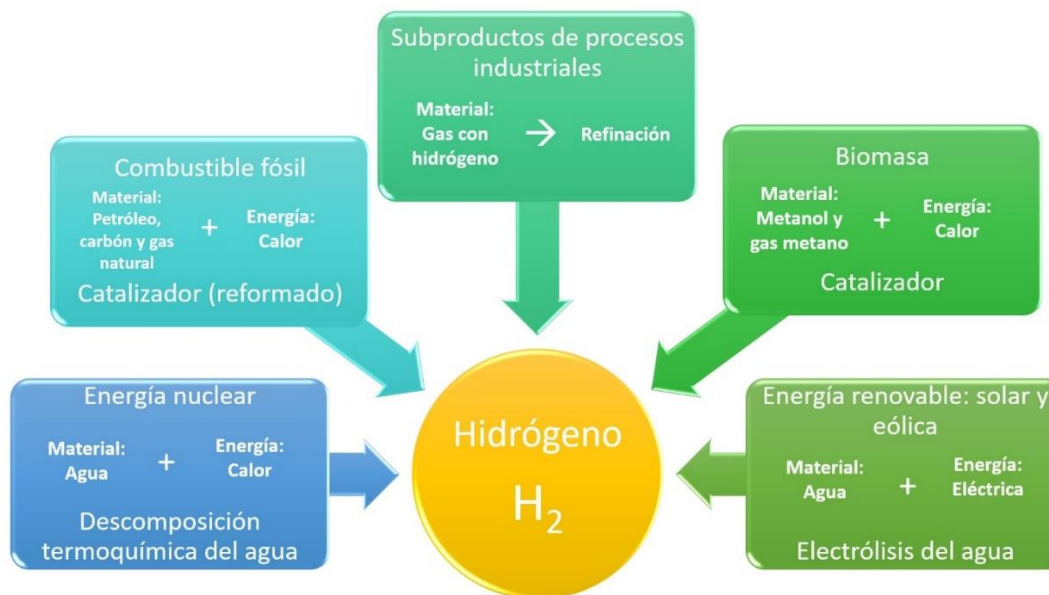
## **2. Procesos de producción**

Existen una gran variedad de fuentes de hidrógeno, así como diversidad de métodos para la producción de hidrógeno (Figura 1). Con base en la energía y materia prima utilizada para la producción de este combustible, los métodos se han clasificado en:

- a) Producción de hidrógeno mediante energía nuclear: se utiliza la energía que se produce en las centrales nucleares para producir hidrógeno de dos formas principalmente: 1) se aprovecha el exceso energía térmica nuclear para producir hidrógeno mediante la disociación termoquímica del agua mediante ciclos de múltiples pasos para reducir las temperaturas de reacción (entre 500 y 1000 °C) y 2) cuando los precios de la electricidad producida con energía del reactor son bajos o negativos, la energía eléctrica es usada para producir hidrógeno mediante diversos métodos como la electrólisis alcalina, electrólisis de membrana de intercambio de protones, celdas de electrólisis de óxido sólido o electrólisis de alta temperatura. El hidrógeno producido puede utilizarse para producir electricidad durante los periodos de alta demanda a través de celdas de combustible o venderse como producto. El uso del calor residual y precios bajos de electricidad generados en la central nuclear hacen que la producción de H<sub>2</sub> mediante energía nuclear sea una opción económicamente viable (Rami y col, 2020).

- b) Producción de hidrógeno mediante energías renovables: se usan energías de fuentes renovables como energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y biomasa para producir hidrógeno vía termólisis, electrólisis, procesos de reformado y descomposición térmica (pirólisis y gasificación), métodos biológicos, entre otros, siendo la energía solar fotovoltaica o eólica las opciones más viables (Ishaq y Dincer, 2021).
- c) Producción de hidrógeno mediante fuentes de energía no renovables: se basa en procesos que involucran combustibles fósiles como gas natural y carbón para la producción de hidrógeno mediante métodos termoquímicos (reformado, pirolisis y gasificación) (Ji y Wang, 2021).

De estos tres principales métodos, los procesos de producción mediante energías no renovables han sido los más utilizados (Ishaq y Dincer, 2021). La Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) estima que la demanda de hidrógeno en 2020 fue de aproximadamente 90 Mt, las cuales fueron producidas principalmente a partir de combustible fósiles, liberándose a la atmósfera cerca de 900 Mt de CO<sub>2</sub> (IEA, 2021). A continuación, se describe a profundidad los métodos más comunes y prometedores.



**Figura 1. Métodos reportados en la literatura especializada para la producción de hidrógeno.**

Fuente: Elaboración propia.

## 2.1 Procesos fotocatalíticos.

La fotocatalisis es un proceso a través del cual se modifica la velocidad de una reacción en presencia de luz. Todos los fotocatalizadores son materiales semiconductores, los cuales son capaces de conducir la electricidad en presencia de luz (Hitman y Jalil, 2020). El método para producir hidrógeno con gran potencial es el “desdoblamiento fotocatalítico del agua”, el cual consiste en la disociación de la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno utilizando catalizadores semiconductores (fotocatalizadores) como el óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>). La gran importancia de esta metodología radica en la obtención de hidrógeno utilizando

energía solar (luz), es decir, energía renovable, por lo que el hidrógeno producido se considera un “combustible limpio” (Ahmad y col., 2015; Qureshy y col., 2022).

## 2.2 Procesos biológicos.

La producción de hidrógeno a partir de microorganismos se lleva a cabo por la degradación de moléculas orgánicas y agua. Este proceso biológico ocurre de dos maneras: degradación fotosintética y no fotosintética. En el primero, los microorganismos realizan la degradación en presencia de energía solar (luz); cuando ocurre de esta manera los microorganismos reciben el nombre de “fototróficos”. Por otro lado, en la degradación no fotosintética, los microorganismos no necesitan luz solar para llevar a cabo la degradación. Una de las bondades de este método es que se puede usar como materia prima la biomasa, por lo que el hidrógeno es denominado “biohidrógeno” ya que se produce a partir de una fuente renovable (Bolatkhan y col., 2019; Pal y col., 2022; Li, 2021).

Los cuatro principales métodos para producir hidrógeno mediante métodos biológicos son la biofotólisis directa, biofotólisis indirecta, fermentación oscura y la fotofermentación. La biofotólisis directa es un método bioquímico similar al proceso de fotosíntesis que ocurre en las plantas y algas. Se basa en la producción de biohidrógeno por medio de la fotosíntesis de microalgas o cianobacterias a partir de agua. Un ejemplo de microalga verde que produce biohidrógeno en condiciones anaeróbicas es la *Chlamydomonas reinhardtii*. La fotólisis indirecta consiste en la generación de hidrógeno a partir de almidón y glucógeno en dos pasos, en el primero se lleva a cabo la síntesis de los carbohidratos en presencia de luz, en segundo lugar, se obtiene el hidrógeno a través de una fermentación a partir de microalgas y cianobacterias.

Fermentación oscura se lleva a cabo por medio de una serie de reacciones bioquímicas gracias a bacterias anaeróbicas, algunas algas (*Gelidium amansii*) y sustratos ricos en carbohidratos cultivados sin necesidad de energía lumínica. Por otro lado, la fotofermentación se lleva a cabo por la degradación del sustrato a partir



de una fermentación anaeróbica, la cual ocurre gracias a microorganismos fotosintéticos (enzimas) (Sivaramakrishnan y col., 2021).

### **2.3 Procesos electroquímicos.**

La electrólisis del agua es uno de los métodos más prometedores para la producción de hidrógeno debido a la alta pureza del producto obtenido. Este proceso se lleva a cabo por medio de celdas electroquímicas formadas por dos electrodos (cátodo y ánodo), a través de los cuales pasa una corriente eléctrica provocando la descomposición electroquímica (electrólisis) del agua, produciéndose hidrógeno y oxígeno gaseosos. Un aspecto importante para que se logre dicha separación es que en el agua se encuentre disuelto un compuesto que favorezca la conducción eléctrica formando así un electrolito; estas sustancias pueden ser ácidos, bases o sales solubles (Chi y Yu, 2018; Lee y col., 2022).

Existen diversos métodos de electrólisis del agua entre los que destacan: a) la electrólisis de agua alcalina: en este proceso se presenta la electrólisis del agua usando como electrolito una base, generalmente hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH). La temperatura de proceso es de entre 30 y 80 °C, b) electrólisis de óxido sólido: la temperatura de operación de este proceso es de entre 500 y 850 °C, por lo que el agua se encuentra en estado gaseoso. El electrolito en este proceso está en estado sólido formado principalmente por dióxido de zirconio (ZrO<sub>2</sub>) y c) electrólisis microbiana: la producción de hidrógeno a partir de este método se realiza utilizando materia orgánica, biomasa o aguas residuales, donde los microorganismos degradan las moléculas orgánicas para formar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), produciendo hidrógeno como subproducto (Kumar y Himabindu, 2019).

### **2.4 Procesos termoquímicos.**

Los procesos termoquímicos son los más utilizados para producir hidrógeno, incluso a nivel industrial. Sin embargo, en los últimos años ha disminuido el interés de esta



tecnología debido a que se usan combustibles fósiles como materia prima, contribuyendo a la contaminación ambiental. Una alternativa es el reemplazo de los combustibles fósiles por biomasa, la cual es una fuente renovable. Los métodos termoquímicos más usados son el reformado, gasificación y pirólisis (Ji y Wang, 2021).

#### **2.4.1 Reformado.**

El reformado de hidrocarburos es el método más utilizado para producir hidrógeno. Como materia prima se usan combustibles fósiles y se produce hidrógeno, monóxido de carbono, CO<sub>2</sub>, y otros subproductos. El principal inconveniente de este método de producción es el envenenamiento de los catalizadores provocado por el azufre que contiene la mayoría de los hidrocarburos.

Los principales procesos de reformado de hidrocarburos son el reformado de metano con vapor (RMV), oxidación parcial (OP) y reformado autotérmico (RA). El RMV (proceso endotérmico) es el método de producción de hidrógeno más utilizado ya que no requiere oxígeno puro y las temperaturas de proceso son menores. Este proceso utiliza metales como catalizadores, entre ellos platino y níquel, siendo el segundo el más utilizado ya que no limita la reacción y es más barato. Con el fin de evitar la formación de coque, la reacción se lleva a cabo a altas temperaturas (700-1000 °C) y presiones de hasta 3.5 MPa (Yang y col., 2022). La OP (proceso exotérmico) también es una tecnología comercialmente disponible, aunque con una eficiencia menor que el RMV. En este proceso se favorece la formación de coque, además de que los costos de producción son mayores por los requerimientos de oxígeno puro, pero es el mejor método de reformado para producir hidrógeno a partir de materia primas como el carbón y residuos de petróleo pesado.

El reformado autotérmico utiliza el calor producido en la OP para llevar a cabo la reacción endotérmica del RMV. Esta tecnología aún no está disponible comercialmente, pero se espera que tenga costos de producción y temperaturas de

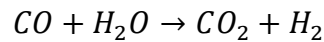
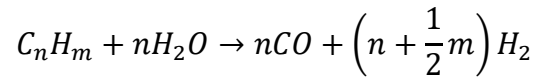
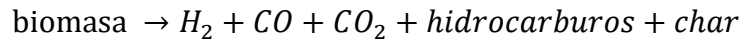
operación menores que RMV y OP (Da silva Veras y col., 2017; Nikolaidis y Poulikkas, 2017).

#### **2.4.2 Gasificación y pirólisis.**

Ambos procesos consisten en la degradación de combustibles sólidos como carbón o biomasa a altas temperaturas (superiores a 500 °C para la biomasa y 1200 °C para el carbón), obteniéndose así una mezcla de gases, entre ellos hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>), CO y CO<sub>2</sub>. La principal diferencia entre estos dos procesos es que la pirólisis ocurre en ausencia de oxígeno, mientras que en la gasificación se tiene una limitación de oxígeno (entre un 10 y 50% aproximadamente). Una ventaja de la pirólisis es que es un proceso más simple, por lo que los costos son menores, aunque no ha alcanzado la madurez comercial. Una desventaja de estos procesos es que se produce una mezcla de gases, por lo que se requiere de procesos de separación para obtener hidrógeno con alta pureza (Wu y col., 2013).

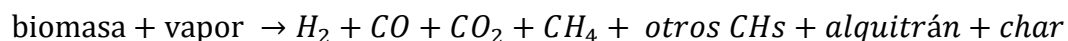
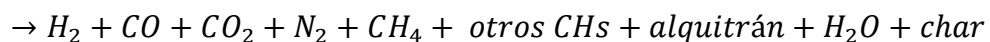
La pirólisis de hidrocarburos es un proceso bien conocido donde la descomposición térmica sigue la reacción general  $C_nH_m \rightarrow nC + \frac{1}{2}mH_2$ , con temperaturas de operación entre 300 y 1000 °C, dependiendo de la materia prima, mientras que en la pirólisis de la biomasa se lleva a cabo a temperaturas que oscilan entre 350 y 600 °C, produciéndose residuos líquidos (hidrocarburos de cadenas largas como alquitranes, aceites, fenoles), carbón vegetal y una mezcla de metano y otros hidrocarburos que pueden ser usados como materia prima para producir más hidrógeno. La cantidad de hidrógeno producido mediante pirólisis depende de la biomasa utilizada, tipo de catalizador, temperatura de operación y tiempo de residencia (Nikolaidis y Poulikkas, 2017).

La pirólisis de la biomasa sigue las siguientes etapas:



La gasificación es una oxidación parcial de la materia prima donde se usan cantidades de oxígeno inferiores a las estequiométricas, obteniendo como productos gas de síntesis el cual es una mezcla de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y nitrógeno si se usa aire como fuente de oxígeno. Además, se produce alquitrán, compuestos halogenados y partículas sólidas. Las temperaturas de operación oscilan entre 500 y 1400 °C, y presiones de 1 a 33 atmósferas. Lo anterior depende del tipo de reactor utilizado, tamaño de la planta y de la aplicación final del gas de síntesis.

Con base en la fuente de oxígeno, la gasificación de la biomasa sigue las siguientes reacciones:



El porcentaje de hidrógeno producido depende de la biomasa utilizada, tamaño de partícula, temperatura de operación y tipo de catalizador utilizado. Posteriormente el gas de síntesis es tratado mediante procesos de absorción para obtener un gas rico en hidrógeno (Da silva Veras y col., 2017; Nikolaidis y Poulikkas, 2017).

## 2.5 Mediante energías renovables

Las reservas de combustibles fósiles se agotan a ritmos cada vez más acelerados debido a la creciente demanda energética por el continuo aumento de la población y su nivel de vida. Esto ha conducido a la búsqueda de nuevas tecnologías y

materias primas para la producción de hidrógeno. Una alternativa ha sido el uso de energías renovables para la producción de este gas el cual es denominado “hidrógeno verde” debido a la fuente de energía utilizada para su producción.

La producción de hidrógeno a partir de recursos renovables es menor al 5%, siendo los métodos principales aquellos que usan biomasa como materia prima y las tecnologías para la disociación del agua. La producción de hidrógeno a partir de biomasa se puede llevar a cabo mediante procesos termoquímicos y biológicos. Entre los métodos termoquímicos está la gasificación y la pirólisis, siendo el primero el más usado por ser una tecnología madura y comercialmente disponible. En la gasificación, la biomasa se convierte en un gas rico en hidrógeno, y en menores cantidades metano y CO, los cuales pueden usarse como materia prima para producir más hidrógeno mediante procesos de reformado y reactores de desplazamiento. Por otro lado, los procesos biológicos aún están en desarrollo y tienen bajas tasas de producción y rendimiento. Entre los principales métodos están la fotólisis, fermentación oscura, la fotofermentación y la electrólisis microbiana (Ishaq y Dincer, 2021).

Las tecnologías de disociación de agua se pueden agrupar en tres métodos: electrólisis del agua, disociación termoquímica y disociación fotoelectroquímica del agua (DFEA). Estos métodos son considerados limpios ya que no emiten gases de efecto invernadero y la energía térmica o eléctrica requerida en los procesos es producida mediante fuentes de energías renovables. Se han realizado diversas investigaciones para la producción de hidrógeno basado en sistemas que producen electricidad mediante energía solar fotovoltaica (paneles solares), energía eólica (turbinas eólicas), energía oceánica y la captura de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. También se ha explorado la posibilidad de utilizar la energía geotérmica para la producción de hidrógeno (Dincer y Ishaq, 2022).

Así mismo, se han propuesto “métodos híbridos” donde se combinan métodos tradicionales de producción de hidrógeno y energía proveniente de fuentes

renovables, entre ellos el reformado de metano con vapor de agua para producir hidrógeno donde el vapor es producido por energía solar fototérmica.

Las diversas tecnologías para producción de “hidrógeno verde” aún se encuentra en procesos de investigación. Además, se requieren estudios de factibilidad técnica, económica y ambiental para comparar estas nuevas tecnologías de producción de hidrógeno con los métodos convencionales (Salari y col., 2022; Basha Syed, 2021).

### **3. Almacenamiento de hidrógeno**

La intermitencia y la fluctuación en la producción de energías renovables ha sido un tema que ha provocado debates sobre la fiabilidad y sostenibilidad de estas energías. Debido a lo anterior, la comunidad científica se ha enfocado en el desarrollo de Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE) para satisfacer la demanda mediante el almacenamiento de los excedentes durante los procesos de producción. Los SAE pueden ser químicos, eléctricos, electroquímicos, mecánicos y térmicos.

El almacenamiento de hidrógeno es un tema determinante para el uso de este combustible en diversas industrias. Los sistemas estacionarios de almacenamiento empleados en procesos industriales y de producción de energía eléctrica presentan menos complicaciones en comparación con aplicaciones móviles. Las diferentes técnicas de almacenamiento se presentan en la Figura 2, tales como el almacenamiento físico y en materiales, estos han diversificado el uso del hidrógeno debido a que se incrementa la densidad energética de este gas (Hassan y col., 2021).

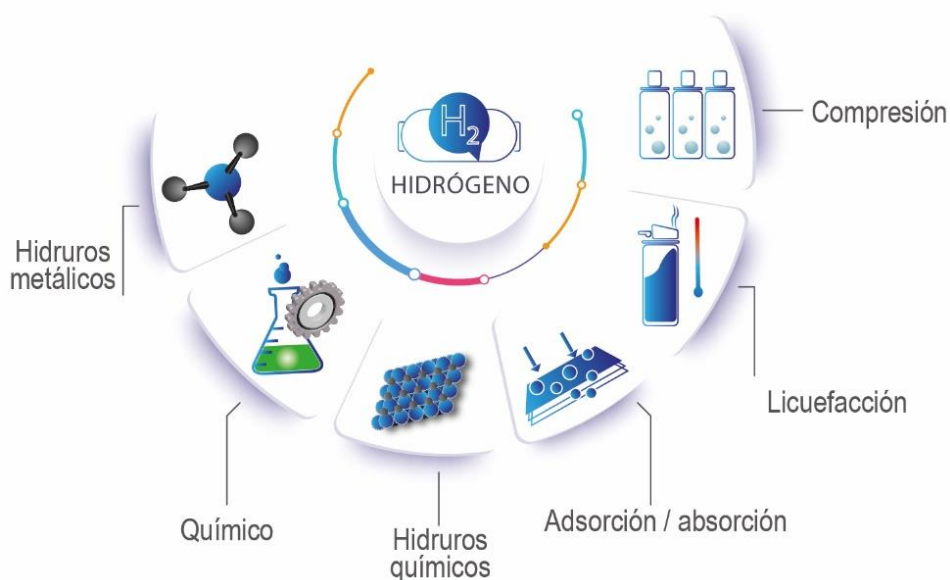


Figura 2. Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno molecular.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 Tecnologías de almacenamiento físico

#### a) Almacenamiento de hidrógeno-Gas Comprimido (GCH<sub>2</sub>)

La densidad del hidrógeno en condiciones de presión y temperatura estándar (una atmósfera de presión y 25 °C) es de 0.089 kg/m<sup>3</sup>. Bajo estas condiciones, la densidad energética del H<sub>2</sub> es de aproximadamente 0.0033 kWh/L. Para incrementar la densidad energética de este gas, es decir, cantidad de energía almacenada por unidad de volumen o masa, es comprimido a altas presiones (hasta 1000 atmósferas). Este proceso requiere del desarrollo de materiales capaces de soportar las altas presiones y de energía para comprimir el gas hasta la presión requerida. Por ejemplo, se estima que para comprimir hidrógeno a 700 atmósferas de presión (necesario para aplicaciones móviles), se consume hasta el 10% del contenido energético del gas, pero la densidad energética incrementa desde 0.0033 hasta 1.32 kWh/L, es decir, se almacena hasta 400 veces más energía en el mismo contenedor. La presión requerida para aplicaciones industriales es de 200 a 300



atmósferas. Estas presiones, aunque son mucho menores que para aplicaciones móviles, representan grandes riesgos para la seguridad de los procesos industriales donde se usa el hidrógeno comprimido. Actualmente, se han desarrollado contenedores a base de materiales metálicos, poliméricos y materiales compuestos capaces de soportar las presiones requeridas (Abe y col., 2019).

### **b) Almacenamiento de hidrógeno- Hidrógeno Líquido (H<sub>2</sub>L)**

Este método de almacenamiento está basado en el ciclo Linde-Hampson de licuefacción de gases. Este cambio de fase gas a fase líquida se lleva a cabo mediante el uso de compresores, motores de expansión, válvulas, intercambiadores de calor y nitrógeno líquido. En este método el hidrógeno se almacena a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica con una densidad de  $70.9\text{ kg/m}^3$  y densidad energética hasta tres veces superior a la gasolina. Desde el punto de vista energético, los costos de licuefacción pueden traducirse en hasta el 35 % del contenido energético del gas, pero debido a que sus principales aplicaciones radican en naves espaciales y cohetes, estos costos no son relevantes. El hidrógeno líquido es almacenado en tanques aislados térmicamente y en ocasiones se usan tanques presurizados para disminuir la evaporación del combustible ya que se estima que se puede evaporar hasta 3% cada día (Tarhan y Ali Çil, 2021).

### **c) Almacenamiento de hidrógeno- Hidrógeno Crio-Comprimido (H<sub>2</sub>CC)**

Con el fin de optimizar el almacenamiento de hidrógeno, es decir, incrementar la densidad y disminuir el consumo energético por compresión y enfriamiento del gas, se pueden modificar la temperatura y presión de almacenamiento para incrementar la densidad energética del combustible. Este proceso es conocido como criogenización, donde el hidrógeno es comprimido a presiones superiores a 15 MPa (1 MPa= 9.87 atmósferas) y almacenado a temperaturas cercanas a la temperatura de licuefacción ( $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



La densidad del hidrógeno crio-comprimido es aproximadamente de  $71.5 \text{ kg/m}^3$ . Este valor es casi el doble de la densidad del hidrógeno comprimido a 70 MPa ( $39.1 \text{ kg/m}^3$ ) y superior al hidrógeno líquido ( $70.9 \text{ kg/m}^3$ ). Lo anterior se traduce en mayor densidad energética del  $\text{H}_2\text{CC}$  en comparación con el  $\text{GCH}_2$  y  $\text{H}_2\text{L}$ , aunado a que el consumo de energía para la criogenización del hidrógeno es menor del 25% del contenido energético del gas, valor menor al requerido para el almacenamiento de hidrógeno líquido (35%) (Crotogino, 2016).

### **3.2 Almacenamiento de Hidrógeno en materiales**

El almacenamiento físico de hidrógeno presenta varios inconvenientes, entre ellos, la seguridad debido a las altas presiones que se requieren (hasta 70 MPa), capacidad de almacenamiento relativamente bajas, altos costos de los contenedores y de energía consumida para la compresión y enfriamiento.

Debido a lo anterior, se ha propuesto el almacenamiento de hidrógeno basado en materiales. Esta metodología se basa en procesos de adsorción y absorción, obteniéndose capacidades de almacenamiento superiores que el almacenamiento físico, además de disminuir considerablemente los riesgos (explosiones e incendios) ya que las presiones son mucho menores y el almacenamiento puede ser a temperatura ambiente. Lo anterior, abre la posibilidad al uso de hidrógeno en aplicaciones móviles (Shashikala, 2012).

#### **3.2.1 Tecnologías de adsorción**

La adsorción es un proceso de transferencia de masa donde un fluido (líquido o gas) es depositado en la superficie de un material sólido poroso. En este proceso es muy importante considerar dos aspectos principalmente: a) la termodinámica del proceso, es decir, la energía interfacial del sistema en el equilibrio y b) cinética del proceso: rapidez con la que se lleva a cabo la adsorción.

Con base en los fenómenos que se presentan, la adsorción puede ser física (fisisorción) o química (quimisorción).

#### a) **Materiales a base de carbono**

Propiedades como alta capacidad de adsorción, microestructura porosa, baja densidad y alta superficie específica, han convertido al carbón un candidato idóneo para almacenar hidrógeno. Este almacenamiento se lleva a cabo principalmente mediante tres tipos de materiales: carbón activado, nanotubos de carbono y nanofibras de grafito (carbono).

El carbón activado es un material sintético a base de cristales de grafito y carbón amorfo con diámetros de poro menores a un nanómetro ( $< 1\text{nm}$ ) y con superficie específica de hasta  $3000\text{ m}^2$  por cada gramo. Este almacenamiento se lleva a cabo principalmente altas presiones y a temperaturas criogénicas.

Los nanotubos de carbono son láminas de grafito “enrolladas” que forman cilindros con diámetros a escala nanométrica y longitudes de micrómetros, los cuales pueden ser simples o de paredes múltiples. Por otro lado, las nanofibras de grafito son materiales sintéticos que consiste en “láminas” de grafito apiladas en varias orientaciones; las longitudes de las nanofibras varían entre 5 y 100 milímetros.

El almacenamiento de hidrógeno en materiales a base de carbono se rige por fuerzas de Van Der Waals (fuerzas electrostáticas) entre los átomos de carbono y moléculas de hidrógeno, lo que permite que la “carga/descarga” del hidrógeno sea rápida y totalmente reversible. Se estima que la cantidad de hidrógeno almacenado en estos materiales es de hasta 10 % en peso (Millet, 2014).

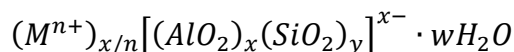
#### b) **Materiales organometálicos**

Los compuestos organometálicos, a menudo llamados MOF por sus siglas en inglés (metal-organic frameworks), son materiales tridimensionales cristalinos y porosos constituidos por una parte metálica y otra orgánica con superficies específicas de

hasta 4800 m<sup>2</sup> por cada gramo. En la actualidad existen diversos materiales organometálicos capaces de adsorber hidrógeno (almacenarlo) en condiciones tanto ambientales como criogénicas (hasta 4.5% en peso). Los MOF también pueden ser producidos mediante la combinación de dos iones metálicos y un ligando para obtener compuestos organometálicos con características y propiedades diferentes. La estructura y propiedades de los MOF no sólo depende de los materiales que lo constituyen, también depende de la temperatura de reacción y velocidad de crecimiento de cristales a la que fueron producidos. Los iones metálicos más usados en la producción de los compuestos organometálicos son Zn (II) y Cu (II), mientras que los componentes básicos orgánicos más utilizados son ácidos carboxílicos y compuestos heterocíclicos que contienen donantes de nitrógeno. Una de las desventajas de este método de almacenamiento es la débil interacción de Van Der Waals entre el hidrógeno y la superficie de los adsorbentes (Langmi y col., 2016).

### c) Zeolitas

Las zeolitas son compuestos microporosos con estructuras basadas en tetraedros (TO<sub>4</sub>), donde T representa a un átomo de aluminio (Al) o silicio (Si) y O<sub>4</sub> cuatro átomos de oxígeno. Los tamaños de poro varían entre 0.3 y 1.0 nanómetros. La fórmula general de una zeolita es



donde los cationes M de valencia n equilibran la carga aniónica, por ello la presencia de aluminio trivalente. Esto es importante ya que la proporción de silicio y aluminio en una zeolita determina sus propiedades químicas. Este material tiene varios usos industriales y a menudo son llamados “tamices moleculares” debido a su capacidad de absorber selectivamente moléculas de tamaños similares a sus cavidades o canales, por lo que también son usados como catalizadores heterogéneos y en procesos de separación de gases (Anderson, 2008).

El proceso de almacenamiento de hidrógeno en los poros de las zeolitas se lleva a cabo a temperaturas y presiones elevadas, posteriormente se libera la presión y se disminuye la temperatura, quedando encapsulado el hidrógeno. La capacidad de almacenamiento de estos materiales es limitada, alcanzando apenas el 1.0 % en masa de hidrógeno (Kayfeci y Keçebaş, 2019).

### **3.2.2 Tecnologías de absorción**

La absorción es un proceso de transferencia de masa donde las moléculas penetran y se disuelven o difunden en el material absorbente. A diferencia de la adsorción donde el proceso ocurre sólo en la superficie, en los procesos de absorción los átomos se difunden en todo el volumen.

#### **a) Hidruros metálicos**

Los hidruros metálicos son materiales binarios compuestos de hidrógeno (estado de oxidación -1) y un metal (M), es decir, están formados por átomos metálicos con imperfecciones reticulares y átomos de hidrógeno incrustados en los intersticios de las cavidades reticulares. El almacenamiento de hidrógeno se lleva a cabo mediante dos métodos: adhesión química ( $M + \frac{x}{2}H_2 \leftrightarrow MH_x + calor$ ) y separación electroquímica del agua ( $M + \frac{x}{2}H_2O + \frac{x}{2}e^- \leftrightarrow MH_x + \frac{x}{2}OH^-$ ), reacción en la que se utiliza paladio como catalizador. En la adhesión química el hidrógeno molecular alcanza un potencial superficial mínimo cerca de la superficie y el hidrógeno atómico se encuentra en una región más profunda.

El almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos es una de las mejores opciones debido a sus costos, seguridad, manejo y capacidad de almacenamiento. Aunque la capacidad de almacenamiento de estos materiales es mayor que el almacenamiento líquido o gaseoso, no es suficiente cuando se requiere suministrar hidrógeno de manera continua como es el caso de los vehículos. La capacidad de

almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos se estima en hasta 8 % en peso de hidrógeno (Tarasov y col., 2022).

### **b) Almacenamiento químico de hidrógeno**

El almacenamiento químico de hidrógeno permite mayores densidades energéticas y fácil uso, especialmente si el almacenamiento químico es en estado líquido. Este método de almacenamiento involucra elementos químicos más ligeros, lo que se traduce en densidades gravimétricas mayores, aunado a la facilidad de la liberación del hidrógeno. Entre estos compuestos encontramos al borano de amoníaco ( $\text{H}_3\text{N}-\text{BH}_3$ ), amida de litio ( $\text{LiNH}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y hidracina ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ). Además, los compuestos químicos que contienen hidrógeno también son considerados una forma de almacenamiento de hidrógeno, entre ellos está el metanol, amoníaco y metil ciclohexano, con capacidades de almacenamiento de 8.9, 15.1 y 13.2% en peso, respectivamente (Viswanathan, 2017).

El almacenamiento químico de hidrógeno también tiene desventajas, entre ellas es que deben producirse en plantas centralizadas y las reacciones producen subproductos que dañan el ambiente como el óxido de nitrógeno, pero el principal inconveniente de este método de almacenamiento es que es irreversible. (Winarta y col., 2020).

### **3.3 Almacenamiento a granel**

El hidrógeno puede ser utilizado en diversas áreas, por lo que el método de almacenamiento debe ser viable y garantizar el suministro del gas a los diferentes procesos. Una alternativa para almacenar grandes cantidades de hidrógeno es el almacenamiento subterráneo y en tuberías subterráneas (Papadias y Ahluwalia, 2021).

#### **a) Almacenamiento en tuberías subterráneas**

Países como Alemania y Suiza han comenzado a utilizar estos métodos de almacenamiento de hidrógeno considerado de mediana escala. En estas instalaciones se pueden almacenar hasta 350 mil metros cúbicos de gas a presiones de 90 atmósferas. Este método de almacenamiento tiene ventajas, entre ellas la protección ante condiciones climáticas adversas y que la tierra de la superficie puede ser utilizada para diferentes fines como la agricultura (Panfilov, 2016).

#### **b) Almacenamiento subterráneo**

Este método (considerado de gran escala) tiene costos un poco más elevados que otros métodos de almacenamiento. En el almacenamiento subterráneo se almacena hidrógeno en yacimientos de petróleo o gas natural agotados, así como en domos de sal y minas, permitiendo almacenar varios millones de metros cúbicos de hidrógeno. Esta tecnología ya es usada por países como Inglaterra, Francia y Rusia desde hace varias décadas (Muhammed y col., 2022; Lysyy, 2021).

### **4. Aplicaciones del Hidrógeno.**

En la actualidad, el hidrógeno tiene diversas aplicaciones (Figura 3) entre las cuales destacan la industria del petróleo, industrial aeroespacial, industria química, industria electrónica y la industria del vidrio. Además, es usado como combustible para celdas de combustible, como materia prima para la producción de fertilizantes, para el procesamiento de alimentos, como combustible en centrales eléctricas (mezclado con gas natural), entre otros (Mansilla y col., 2018; Oliveira, 2021).



Figura 3. Aplicaciones industriales del hidrógeno.

Fuente: Elaboración propia.

### a) Industria aeroespacial

La NASA fue una de las primeras en usar hidrógeno líquido como combustible para cohetes (década de los años 50's del siglo XX) ya que es el combustible con mayor densidad energética (hasta tres veces más energía que la gasolina). El hidrógeno también fue usado por la NASA para la producción de electricidad mediante celdas de combustible para alimentar los sistemas eléctricos de las naves espaciales. En la actualidad, el hidrógeno líquido se sigue utilizando para lanzar cohetes al espacio (EIA U.S., 2022).

### b) Celdas de combustible

Las celdas de combustible (a menudo llamadas pilas de combustible) son dispositivos que generan electricidad cuando el hidrógeno reacciona con el oxígeno a través de una celda electroquímica, produciéndose agua como producto y



pequeñas cantidades de calor. Estos dispositivos no poseen parte móviles y tampoco se requieren la combustión de combustibles, lo que los hace una tecnología atractiva y amigable con el ambiente.

En la actualidad, existen una gran variedad celdas de combustible para una amplia gama de aplicaciones, entre ellas, celdas de combustible de ácido fosfórico, alcalina, membraba de intercambio protónico, de carbonatos fundidos y de óxido sólido. El tipo y tamaño de celda depende de la aplicación, por ejemplo, pueden ser usadas para alimentar dispositivos portátiles como computadoras o para proporcionar energía eléctrica de respaldo o de emergencia a edificios (Thomas y col., 2020).

### **c) Industria del transporte**

La industria del transporte ha buscado disminuir su impacto ambiental mediante la sustitución de motores de combustión interna alimentados con combustibles fósiles por motores eléctricos de alta eficiencia y cero emisiones contaminantes. Esto ha sido posible mediante el uso de pilas de combustible de hidrógeno las cuales son hasta tres veces más eficientes que motores que funcionan con gasolina. Estos vehículos de cero emisiones sólo liberan agua a la atmósfera. (EIA U.S., 2022). Además, en la industria de la aviación se están estudiando las cámaras de combustión de hidrógeno como la cámara micromix y de inyección directa, los cuales son capaces de quemar hidrógeno puro (Lei y Khandelwal, 2021).

### **Industria química y petroquímica**

El hidrógeno tiene una gran variedad de usos en la industria química y petroquímica. En esta última el hidrógeno es usado en procesos de refinación del petróleo y para reducir el contenido de azufre de los combustibles (procesos de desulfuración o ablandamiento). Por otro lado, en la industria química es utilizado como reactivo para producir amoniaco para fertilizantes, en la producción de metanol, en la producción productos intermedios para la producción de plásticos y farmacéuticos,

para la producción de fibras textiles y en la industria del vidrio, electrónica y metalurgia. Además, es utilizado para hidrogenar grasas y aceites, como ambiente inerte y como agente reductor en el tratamiento de materiales metálicos, entre otros (Yue y col., 2021).

### **Conclusiones**

Satisfacer la demanda energética de la sociedad utilizando fuentes energía amigables con el ambiente, segura y eficiente es indispensable para un desarrollo sustentable y sostenible. Esto no es una tarea fácil ya que alcanzar este objetivo representa un reto social, ecológico, económico y político.

La descarbonización de diversos sectores es fundamental para disminuir el calentamiento global con el fin de minimizar los efectos del cambio climático. Esto se puede lograr mediante la diversificación energética y mediante el desarrollo de combustibles alterativos que sustituyan a los combustibles fósiles. Una opción muy atractiva es el hidrógeno molecular, el cual es considerado un combustible limpio y con una alta densidad energética, capaz de reemplazar a estos combustibles fósiles en una amplia gama de aplicaciones.

Existen diferentes métodos de producción de hidrógeno, siendo el más común el reformado del gas natural con vapor de agua, pero ya se exploran nuevas alternativas para su producción a nivel industrial como la producción de hidrogeno a partir de la biomasa y mediante el uso de energías renovables (hidrógeno verde). Uno de los aspectos que ha limitado el uso del hidrógeno en más industrias es su almacenamiento y transporte debido a que se requieren altas presiones para los sistemas de almacenamiento más comunes, lo que representa un peligro para el personal que labora.

El hidrógeno es un gas que puede ser utilizado como combustible directamente, como materia prima para la producción de otros productos, para la producción de

energía eléctrica, en la industria aeroespacial y transporte, y como medio de almacenamiento de energía.

La producción y aplicaciones del hidrógeno enfrentan grandes desafíos, entre ellos que casi la totalidad del hidrógeno comercial es producido a partir de combustibles fósiles, principalmente gas natural y carbón, liberándose grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, además de que la producción de hidrógeno a partir de energía baja en carbono aún no es viable económicamente. Respecto a las aplicaciones, estas están limitadas por el bajo desarrollo de la infraestructura del hidrógeno, lo que incrementa el precio de este gas a los consumidores y limita su uso generalizado. Además, las políticas y regulaciones actuales de los gobiernos limitan el desarrollo de esta industria.

### Referencias

- Abe, J.O., Popoola, A.P.I. , Ajenifuja, E. & Popoola, O.M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 44: 15072-15086.
- Ahmad, H., Kamarudin, S.K., Minggu, L.J. & Kassim M. (2015). Hydrogen from photo-catalytic water splitting process: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 43: 599-610.
- Anderson, P.A. (2008). Storage of hydrogen in zeolites. In G. Walker (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1533/9781845694944.3.223>. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2022.
- Basha Syed, M. (2021). Technologies for renewable hydrogen production. In A. Kalam Azad y M. M. Kamal Khan (Ed.), *Bioenergy Resources and Technologies*. [En línea]. Disponible en : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822525-7.00013-5>. Fecha de consulta: 15 enero de 2022.

Bolatkhani, K., Kossalbayev, B. D., Zayadan, B. K., Tomo, T., Veziroglu, T. N. & Allakhverdiev, S. I. (2019). Hydrogen production from phototrophic microorganisms: Reality and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*. 44: 5799-5811.

Chi, J. y Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*. 39: 390-394.

Crotogino, F. (2016). Larger Scale Hydrogen Storage. In T. M. Letcher (Ed.), *Storing Energy*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00020-8>. Fecha de consulta: 28 diciembre de 2021.

Da Silva Veras, T., Simonato Mozer, T., Da Costa Rubim Messeder dos Santos, D. & Da Silva César, A. (2017). Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide. *International Journal of Hydrogen Energy*. 42: 2018-2033.

Dincer, I. & Ishaq, H. (2022). Wind Energy-Based Hydrogen Production. In I. Dincer & H. Ishaq (Ed.), *Renewable Hydrogen Production*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85176-3.00015-9>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2022.

Dincer, I. & Ishaq, H. (2022). Ocean Energy-Based Hydrogen Production. In I. Dincer & H. Ishaq (Ed.), *Renewable Hydrogen Production*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85176-3.00014-7>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2022.

Dincer, I. & Ishaq, H. (2022). Geothermal Energy-Based Hydrogen Production. In I. Dincer & H. Ishaq (Ed.), *Renewable Hydrogen Production*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85176-3.00003-2>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2022.

IEA, International Energy Agency (2021). Hydrogen. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2022.

EIA U.S., U.S. Energy Information Administration. Hydrogen explained: Use of hydrogen (2022). [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of->

hydrogen.php#:~:text=Hydrogen%20is%20used%20in%20many,the%20sulfur%20content%20of%20fuels. Fecha de consulta: 11 de enero 2022.

Hassan, I.A., Ramadan, H.S., Saleh, M.A. & Hissel, D. (2021). Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 149: 111311.

Hitam, C. N. C. & Jalil A. A. (2020). A review on exploration of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photocatalyst towards degradation of dyes and organic contaminants. *Journal of Environmental Management*. 258: 110050.

Ishaq, H. & Dincer, I. (2021). Comparative assessment of renewable energy-based hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 135: 110192.

Ji, M. & Wang, J. (2021). Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46: 38612-38635.

Kayfeci, M. & Keçebaş, A. (2019). Hydrogen storage. In F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini y D. Ferrero (Ed.), *Solar Hydrogen Production*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00004-7>. Fecha de consulta: 9 enero de 2022.

Kumar, S. S. & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*. 2: 442-454.

Langmi, H.W., Ren, J. & Musyoka, N.M. (2016). Metal–organic frameworks for hydrogen storage. In R.B. Gupta, A. Basile y T.N. Veziroğlu (Ed.), *Compendium of Hydrogen Energy*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00007-9>. Fecha de consulta: 18 enero de 2022.

Lee, J.E., Shafiq, I., Hussain, M., Lam, S.S. Rhee, G.H. & Park, Y.K. (2022). A review on integrated thermochemical hydrogen production from water. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47: 4346-4356.

Lei, H. & Khandelwal, B. (2021). Hydrogen fuel for aviation. In B. Khandelwal (ed.), *Aviation Fuels*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818314-4.00007-8>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2022.

Li, P. (2021). Photosynthetic hydrogen production bacteria breeding technologies. In Q. Zhang, C. He, J. Ren y M. Goodsite (Eds.), *Waste to Renewable Biohydrogen*. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821659-0.00005-8>. Fecha de consulta: 28 enero de 2022.

Lysy, M., Fernø, M. & Erslund, G. (2021). Seasonal hydrogen storage in a depleted oil and gas field. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46: 25160-25174.

Mansilla, C., Bourasseau, C., Cany, C., Guinot, B., Le Duigou, A. & Lucchese, P. (2018). Hydrogen Applications: Overview of the Key Economic Issues and Perspectives. In Catherine Azzaro-Pantel (Ed.), *Hydrogen Supply Chains*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811197-0.00007-5>. Fecha de consulta: 3 de enero de 2022.

Millet, P. (2014). Hydrogen storage in hydride-forming materials. In A. Basile y A. Iulianelli (Eds), *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*. [En línea\*]. Disponible en: <https://doi.org/10.1533/9780857097736.3.368>. Fecha de consulta: 15 enero de 2022.

Muhammed, N.S., Haq, B., Shehri, D.A., Al-Ahmed, A., Rahman, M.M. & Zaman, E. (2022). A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. *Energy Reports*. 8: 461-499.

Nikolaidis, P. & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 67: 597-611.

NOAA Climate (2021). Climate Change: atmospheric Carbon Dioxide. [En línea]. Disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>. Fecha de consulta: 10 de enero 2022.

Oliveira, A.M., Beswick, R.R. & Yan, Y. (2021). A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 33: 100701.



Pal, D.B., Singh, A. & Bhatnagar, A. (2022). A review on biomass based hydrogen production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47: 1461-1480.

Panfilov, M. (2016). Underground and pipeline hydrogen storage. In R.B. Gupta, A. Basile y T.N. Veziroğlu (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Energy*. [En línea]. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3>. Fecha de consulta: 27 de diciembre de 2021.

Papadias, D.D. & Ahluwalia, R.K. (2021). Bulk storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46: 34527-34541.

Qureshy, A.M.M.I. & Dincer, I. (2022). A new photoelectrochemical reactor designed for solar hydrogen fuel production: Experimental study. *Chemical Engineering Science*. 250: 117404.

Rami, S., El-Emam, H.O. & Calin, Z. (2020). Updates on promising thermochemical cycles for clean hydrogen production using nuclear energy. *Journal of Cleaner Production*. 262: 121424.

Salari, S., Hakkaki-Fard, A. & Jalalidil, A. (2022). Hydrogen production performance of a photovoltaic thermal system coupled with a proton exchange membrane electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47: 4472-4488.

Shashikala, K. (2012). Hydrogen Storage Materials. In S. Banerjee y A.K. Tyagi (Ed.), *Functional Materials*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385142-0.00015-5>. Fecha de consulta: 4 enero de 2022.

Sivaramakrishnan, R., Shanmugam S., Sekar M., Mathimani T., Incharoensakdi A., Kim S. H., Parthiban A., Geo V. E., Brindhadevi K. & Pugazhendhi A. (2021). Insights on biological hydrogen production routes and potential microorganisms for high hydrogen yield. *Fuel*. 291: 120136.

Tarasov, B.P., Arbutov, A.A., Volodin, A.A., Fursikov, P.V., Mozhzhuhin, S.A., Lototsky, M.V. & Yartys, V.A. (2022). Metal hydride – Graphene composites for hydrogen based energy storage. *Journal of Alloys and Compounds*. 896: 162881.



Tarhan, C. & Ali Çil, M. (2021). A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods. *Journal of Energy Storage*. 40: 102676.

Thomas, J.M, Edwards, P.P., Dobson, P.J. & Owen, G.P. (2020). Decarbonising energy: The developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells. *Journal of Energy Chemistry*. 51: 405-415.

Viswanathan, B. (2017). Hydrogen Storage. In B. Viswanathan (ed.), *Energy Sources*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56353-8.00010-1>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2022.

Winarta, J., Yung, A., & Mu, B. (2020). Hydrogen and methane storage in nanoporous materials. In J. Liu y F. Ding (Ed.), *Micro and Nano Technologies, Nanoporous Materials for Molecule Separation and Conversion*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818487-5.00010-8>. Fecha de consulta: 6 de enero de 2022.

Wu, C., Wang, Z., Huang, J. & Williams, P.T. (2013). Pyrolysis/gasification of cellulose, hemicellulose and lignin for hydrogen production in the presence of various nickel-based catalysts. *Fuel*. 106: 697-706.

Yang, X., Wang, S. & He, Y. (2022). Review of catalytic reforming for hydrogen production in a membrane-assisted fluidized bed reactor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 154: 111832.

Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S. & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 146: 111180.