



Un poco de todo sobre el **HIDRÓGENO**

Presentamos la historia, las principales características y algunas tecnologías para producir, almacenar y usar el hidrógeno. Asimismo, abordamos la posibilidad de aprovecharlo como un combustible sustentable para diferentes aplicaciones.

Origen y algunas propiedades

Un “poquito” después del Big Bang los protones y electrones se unieron y crearon, principalmente, átomos de hidrógeno (H) y algo de helio (He). Debido a esto el hidrógeno es el elemento más abundante; se calcula que 90% de todos los átomos del universo son de hidrógeno y, en términos de masa, se estima que es 75%, aproximadamente.

En su forma más estable y abundante el átomo de hidrógeno está compuesto de un protón y un electrón. Además existen dos isótopos: el deuterio y el tritio; el primero tiene un protón, un neutrón y un electrón, mientras que el segundo tiene un protón, dos neutrones y un electrón. De los tres, el H (a veces también llamado protio) corresponde a 99.9885%; el resto es deuterio. Es decir, en la naturaleza por cada átomo de deuterio existen 8694 átomos de protio. El tritio no se considera en esta cuenta porque no se presenta de manera natural, sino que es producido por el ser humano.

■ Descubrimiento del hidrógeno

■ Alrededor del año 1500, Paracelso (T. von Hohenheim) notó que cuando a las limaduras de hierro se les añade ácido sulfúrico, se liberan burbujas que son inflamables. Sin embargo, no sabía que estaba tratando con un elemento químico no descrito entonces. En 1671 Robert Boyle realizó algunos experimentos adicionales, pero tampoco se dio cuenta de que se trataba del hidrógeno; solamente lo conocía como “aire inflamable”. En condiciones normales (temperatura: 25 °C; presión: 1 atm) el hidrógeno es un gas inodoro, incoloro y altamente inflamable.

Fue hasta 1766 que Henry Cavendish describió por primera vez al hidrógeno como un elemento químico; además demostró que este gas, en combinación con





oxígeno, forma agua. En 1783 Antoine Lavoisier lo bautizó como hidrógeno, o “generador de agua” (de *hidro*, agua, y *genos*, generador) (véase la Figura 1).

Más adelante, en 1931, Harold Urey descubrió el deuterio. En 1934 por primera vez Ernest Rutherford y sus colegas produjeron el tritio a partir del deuterio.

■ **Química del hidrógeno**

■ En la naturaleza no es frecuente encontrar hidrógeno atómico (nos referimos a átomos aislados, H). En el caso más sencillo –pero tampoco muy frecuente– se puede encontrar como una molécula diatómica (H₂), que también se llama simplemente hidrógeno, o se conoce como dihidrógeno o hidrógeno elemental.

Lo más común es encontrar que el hidrógeno forma parte de muchos compuestos, gracias a que

reacciona prácticamente con toda la tabla periódica para formar agua, sales, hidruros, ácidos, metano, amoníaco, polímeros, etcétera. El hidrógeno puede formar enlaces iónicos o covalentes; puede formar compuestos simples o complejos; puede participar en reacciones químicas, electroquímicas, organometálicas, orgánicas, biológicas, ácido-base y un gran etcétera. En los compuestos químicos, el átomo de hidrógeno puede tender puentes (llamados de hidrógeno) entre las moléculas; esto las hace excepcionalmente estables, como el agua o el ADN.

La riqueza en la química de este elemento radica en su posibilidad de formar tanto iones negativos (H⁻, cuando captura un electrón adicional) como iones positivos (H⁺, al perder su electrón). Es por esto que en algunas tablas periódicas antiguas el hidrógeno aparece arriba del grupo de los halógenos, o en otras está de forma aislada, aunque lo habitual es

Un poco de historia del hidrógeno

1671: Robert Boyle realiza los primeros experimentos

1766: Henry Cavendish lo reconoce como elemento químico

1783: Antoine Lavoisier lo bautiza como hidrógeno: “hidro” — agua, “genos” — generador

1838: Christian Friedrich Schönbein combina H₂ y O₂ para producir agua y una corriente eléctrica

1838-1839: Sir William Grove construye la primera pila de combustible
Nace la pila de combustible

1875: Julio Verne publica *La isla misteriosa*, donde se propone al hidrógeno como combustible

1960: Combustible de las misiones espaciales

2020: BMW-Toyota FCV-R: auto a base de hidrógeno

Figura 1. Breve historia del hidrógeno.

que se encuentre en la parte superior de la familia de los metales alcalinos.

Usos y producción

Debido a su riqueza química, el hidrógeno tiene un gran número de usos industriales; por ejemplo, como reactivo químico para la producción de fertilizantes, plásticos o farmacéuticos. En México el principal usuario de hidrógeno es Pemex, que lo utiliza para el procesamiento de combustibles. Pemex es también el mayor productor de hidrógeno en el país (o al menos lo era hasta febrero de 2017, cuando se anunció que la compañía Air Liquide México suministrará el hidrógeno y operará una planta ya existente en Tula, Hidalgo). El método de producción más común es por reformación catalítica: al metano o gas natural (CH_4) se le quita el hidrógeno mediante altas temperaturas, catalizadores y agua: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$, y $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$.

En particular, el hidrógeno ha sido utilizado como combustible en las misiones espaciales de dos formas principales: para la propulsión de las naves

durante el despegue y para la generación de electricidad y agua cuando las misiones se encuentran en el espacio. Esto último se realiza por medio de las pilas o celdas de combustible. Tales aplicaciones datan de la década de 1960, pero el interés en ellas no decae; de hecho, se busca cómo mejorar las pilas de combustible (hacerlas más eficientes, más potentes, más pequeñas) para las futuras misiones a Marte.

No obstante, muchos científicos y tecnólogos queremos que el hidrógeno también se use como combustible no contaminante en diversas aplicaciones terrestres, como los automóviles. En este caso, es deseable que el hidrógeno sea producido de forma sustentable; es decir, que no se contamine el ambiente durante su producción, mediante el uso de energías y materiales renovables. Entre las fuentes primarias de energía (energías renovables) que se pueden utilizar destacan la solar y la eólica. Entre los materiales renovables están el agua (H_2O) y la biomasa (residuos orgánicos). Así pues, los procesos sustentables para la producción de hidrógeno son la fotólisis, termólisis o electrólisis de agua, así como la digestión anaeróbica (véase la Figura 2).

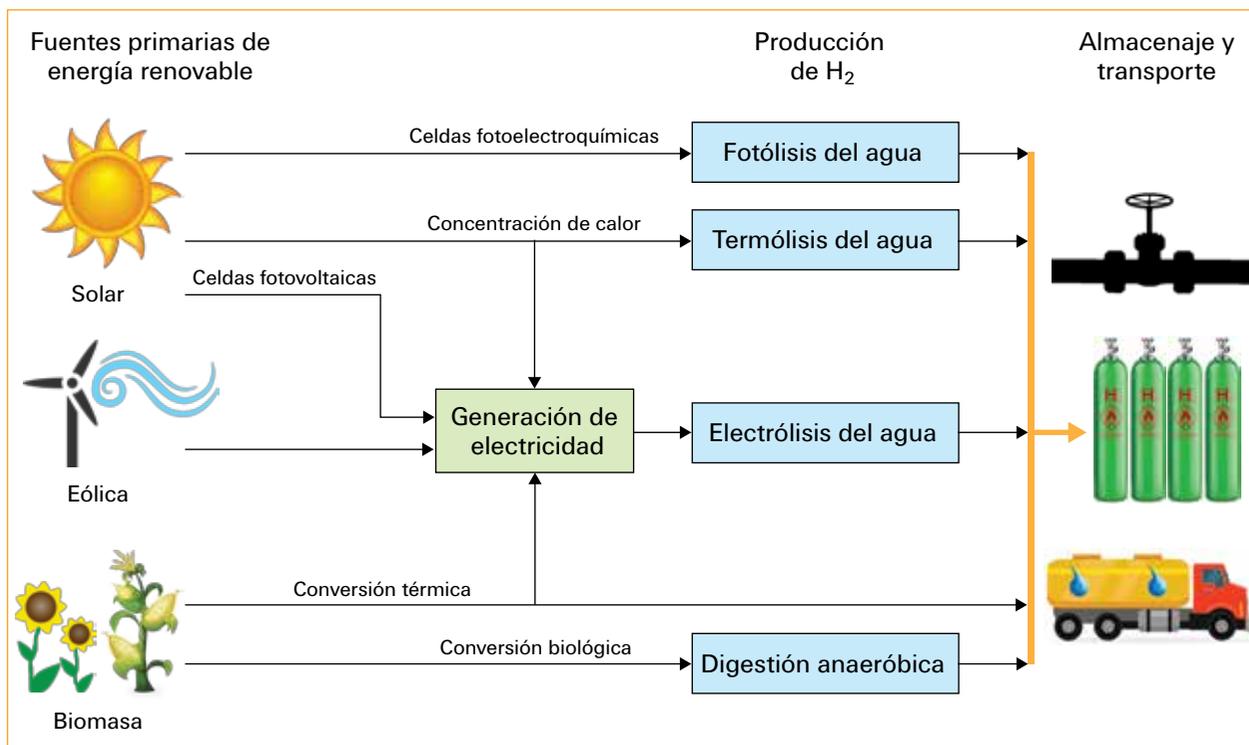


Figura 2. Producción sustentable de hidrógeno.



Recuadro 1. El *Hindenburg*

Los años anteriores a la Primera y a la Segunda Guerra Mundial estuvieron marcados por importantes desarrollos tecnológicos. En materia de aviación se propuso el uso de grandes globos dirigibles (zepelines) que pudieran realizar viajes largos; por ejemplo, atravesar el Atlántico desde Europa hasta América. El *Hindenburg* fue un zepelín alemán lleno de hidrógeno (aprox. 200 000 m³). No obstante, su cubierta fue pintada con una mezcla altamente inflamable: óxido de hierro, aluminio en polvo y acetato-butirato celulosa. En su último viaje, el *Hindenburg* salió de Frankfurt, Alemania, para cruzar el Atlántico; pero a punto de aterrizar en Estados Unidos, el zepelín fue víctima de la electricidad estática atmosférica que incendió la cubierta. El resultado fue una enorme explosión que mató a 36 personas. Se dice que las víctimas fueron más por caída o por aplastamiento por la estructura del zepelín que por el hidrógeno. El accidente del *Hindenburg* no fue el único, pero tal vez el más mediático.

Ahora, algunas preguntas obvias son: ¿por qué no usar helio en lugar de hidrógeno?, ¿por qué usaron ese tipo de pintura? Dejando aparte las cuestiones geopolíticas –Estados Unidos, principal fuente de helio en ese tiempo, había embargado su suministro a Alemania–, tal vez la respuesta más simple es que la selección de materiales no fue la más acertada y que los alemanes no tenían suficiente experiencia para manejar el hidrógeno de una manera más segura.



El hidrógeno a partir del agua

La fotólisis, termólisis o electrólisis de agua tienen en común la capacidad de separar los componentes del agua ($H_2O \rightarrow H_2 + 0.5O_2$). Sin embargo, el proceso es diferente en cada caso. En el primero se utiliza la fotoquímica o fotoelectroquímica por medio de los fotones capturados con celdas fotovoltaicas. La termólisis (proceso sustentable) aprovecha la energía térmica del sol por medio de concentradores solares; en esencia, se calienta el agua a tal punto que se favorece su reacción de descomposición. Por su parte, en la electrólisis del agua se usa la energía eléctrica (de manera sustentable) para realizar de forma electroquímica la reacción de descomposición del agua; “se le dan toques” hasta descomponerla. Estas tres tecnologías de producción de hidrógeno están disponibles de manera comercial, aunque todavía son caras en comparación con la reformación catalítica de metano. Aun así, podemos encontrar electrolizadores pequeños para uso en laboratorios, pequeños negocios que requieren hidrógeno o inclusive en casa, y es posible que en el futuro disminuya su precio.

Seguridad en el uso del hidrógeno

Es cierto que el hidrógeno puede reaccionar de forma violenta con el oxígeno (del aire), y por lo tanto es necesario tener precaución. Cabe mencionar que las medidas de seguridad deben implementarse con todos los reactivos químicos, y en especial con la gasolina y el gas natural, ya sea en nuestras casas, los comercios y el transporte.

El hidrógeno puede detonar si hay dos condiciones. La primera es una concentración de entre 4% y 75% de volumen en relación con el aire; es decir, la mezcla de combustible y oxidante. La segunda condición es que debe existir una chispa, fuente de calor u otra fuente de ignición.

A favor del hidrógeno podemos señalar que arde muy rápidamente (por lo general, un flamazo) y no impregna los materiales alrededor. Por lo ligero del hidrógeno, su flama forma un *jet* o “chorro” hacia arriba, lo cual en muchos casos reduce el riesgo de propagación del fuego.

No obstante, para evitar problemas debemos descartar la posibilidad de fugas en tuberías y sistemas donde se trabaja con hidrógeno. Otra forma es eliminar las fuentes de ignición por medio de diseños adecuados. Y, sobre todo, seguir las normas de seguridad. La experiencia colectiva ganada en cuanto al uso del hidrógeno ha derivado en manuales y reglas para un manejo seguro; por ejemplo, la NASA tiene un documento de acceso público al respecto (véase la literatura recomendada).

El hidrógeno como vector energético

En este escrito hemos ido “sembrando” la idea del uso del hidrógeno como combustible; algo que no es nada nuevo. Por un notable incremento del precio del petróleo y sus derivados, producto de problemas geopolíticos y debido a que aparentemente se había alcanzado el máximo de producción, en la década de 1970 se empezó a pensar en que necesitábamos un nuevo tipo de combustible.

En efecto, hemos llegado al máximo de la producción en los pozos tradicionales; sin embargo, la demanda de petróleo y gas natural, para ahora y a futuro, se está cubriendo con las técnicas de extracción por *fracking*. Entonces, ¿para qué preocuparnos por cambiar de combustible y usar el hidrógeno? La respuesta es por el cambio climático, la contaminación y otros problemas. Necesitamos urgentemente, como humanidad, reducir las emisiones de CO y CO₂ al ambiente, y la única forma de lograrlo es cambiando nuestro uso del petróleo por una combinación adecuada de energías renovables, hidrógeno, pilas de combustible, baterías de alto desempeño, etcétera. Esta combinación adecuada se refiere al uso de los recursos accesibles de manera local; por ejemplo, si una región recibe mucha irradiación solar, o bien si tiene a su disposición la energía de los vientos.

El hidrógeno es llamado un vector energético porque es necesario producirlo; ya mencionamos que no se encuentra libre en la naturaleza, no hay depósitos de hidrógeno como los de petróleo. Por lo tanto, para producirlo se propone usar agua y una energía renovable. Cabe recordar que las energías re-

novables son intermitentes; es decir, no están siempre disponibles. En este caso se requiere contar con métodos para almacenar energía, y resulta que producir hidrógeno es un modo muy eficaz de hacerlo. Cuando y donde se requiera el hidrógeno se puede generar energía eléctrica por medio de las reacciones electroquímicas que ocurren en una pila de combustible (véase la Figura 3).

En términos de masa, se sabe que 1 kg de hidrógeno tiene una energía equivalente a aproximadamente 2.75 kg de gasolina. Esto se debe a que tiene un poder calorífico más alto en comparación con otros combustibles; adicionalmente, las pilas de combustible son más eficientes que los motores de combustión interna. También se sabe que la pila de combustible tiene una eficiencia de 55%, mientras que el motor de combustión interna ronda un 33%. Ésta es una estimación modesta, porque es posible que los motores de combustión interna sean mucho (pero mucho) menos eficientes; por ejemplo, si un automóvil se encuentra en malas condiciones mecánicas, sin mantenimiento. Sin embargo, el problema del hidrógeno es que es un gas muy ligero, por

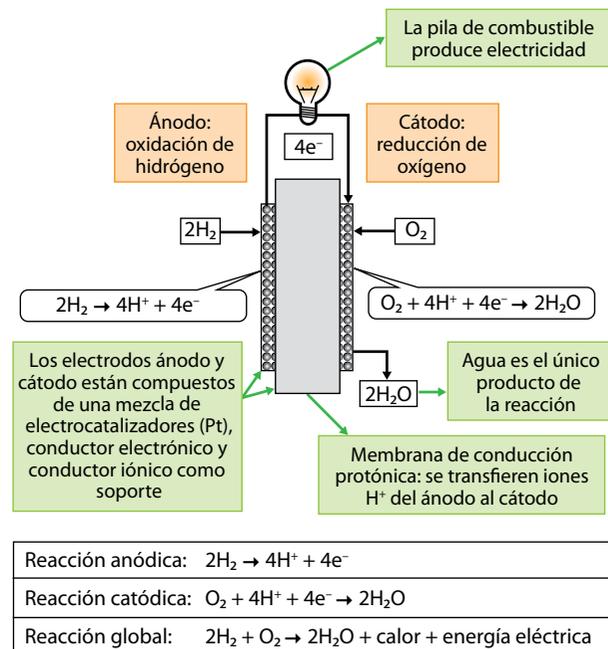


Figura 3. Principio de operación de una pila de combustible tipo MIP H₂/O₂ (MIP: membrana de intercambio, o conducción, protónica). Este tipo de pilas se han convertido en todo un ícono para referirse a las pilas de combustible de baja temperatura.



lo que para cualquier uso práctico es necesario almacenarlo con una densidad aumentada (que explicaremos más adelante).

El hidrógeno y las pilas de combustible

Como todo dispositivo electroquímico, las pilas de combustible constan de un ánodo, un cátodo y un electrolito. Una revisión detallada de los componentes de la pila de combustible con membrana de intercambio protónico se encuentra en la literatura recomendada (Suárez Alcántara, 2011). La pila de combustible también tiene su historia curiosa: en diciembre de 1839, Sir William R. Grove (inglés) y Christian Friedrich Schönbein (alemán) enviaron, cada uno por su cuenta, un trabajo de investigación a la *Philosophical Magazine*; ambos describían cómo el hidrógeno y el oxígeno reaccionan y generan agua

y electricidad. El trabajo de Grove fue publicado en enero de 1839, mientras que el de Schönbein apareció en febrero del mismo año; por eso comúnmente se da el crédito a Grove por el descubrimiento de la pila de combustible (véase la Figura 4).

Sin embargo, este descubrimiento sólo era una curiosidad científica (sin aplicación), porque la pila de Grove utilizaba ácidos fuertes concentrados, difíciles de manejar, corrosivos y tóxicos. Posteriormente se sentaron las bases para las pilas de combustible de alta temperatura, alcalinas, etcétera, desarrolladas por Varta, Nerts, Baur, entre otros. Pero fue hasta que se desarrolló la membrana de conducción protónica (por General Electric y después Dupont) que la pila de combustible con membrana de intercambio protónico se inventó (Willard T. Grubb) y pasó a ser una curiosidad industrial (con posible aplicación). No obstante, el primer uso de gran alcance fue el



Figura 4. Breve historia de la pila de combustible.

Tabla 1. Tipos de pilas de combustible y sus características principales.

Tipo de celda de combustible /propiedad	Alcalina (AFC)*	Con membrana alcalina (AAMFC)*	Ácido fosfórico (PAFC)*	Carbonatos fundidos (MCFC)*	Óxido-sólido (SOFC)*	Con membrana de intercambio protónico (PEMFC)*	Metanol directo Ácidas (DMFC)* Alcalinas (AMDMFC)*
Electrolito	KOH, NaOH, conducción de OH ⁻	Membranas de intercambio aniónico, conducción de OH ⁻	H ₃ PO ₄ concentrado, conducción de H ⁺	Mezclas de Li ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃ y K ₂ CO ₃ en LiAlO ₂ , movilidad de CO ₃ ²⁻	ZrO ₂ / Y ₂ O ₃ , perovskitas, cerámicos, movilidad del ion O ²⁻	Membrana de intercambio protónico (polímero conductor protónico, conducción de H ⁺)	Nafion (ácido), membranas, KOH (alcalina)
Temperatura de operación	50 °C - 250 °C (depende de la presión)	60 °C	180 °C - 200 °C	600 °C - 700 °C	800 °C - 1 000 °C	60 °C - 80 °C	80 °C - 90 °C
Catalizador	Aleaciones con pequeñas cantidades de metales nobles	Aleaciones con pequeñas cantidades de metales nobles	Pt, aleaciones de Pt	Ni, Ni poroso (+ Cr), NiO Litiado	Perovskitas, Ni / YSZ, óxidos de La, Sr, Mn	Pt, Pt-M, (M=metales nobles, metales de transición, etc.)	Pt, Pt-Ru
Combustible / oxidante	H ₂ , H ₂ reformado, alcoholes ligeros / O ₂	H ₂ , alcoholes ligeros, borohidruros / O ₂	H ₂ , gas natural, biogás / O ₂ , aire	Gas natural, biogás, H ₂ / O ₂ , aire	Gas natural, biogás, CO, H ₂ / O ₂ , aire	H ₂ , CH ₃ OH / O ₂ , aire	Metanol, etanol (alcoholes ligeros) / O ₂ , aire
Ventajas	La electroquímica es más sencilla y eficiente; es posible oxidar eficientemente moléculas más grandes que el H ₂	La electroquímica es más sencilla y eficiente; es posible oxidar eficientemente moléculas más grandes que el H ₂	Tecnología madura; disponible comercialmente; tolerancia al CO y CO ₂	Catalizador barato; variedad de combustibles; disponible comercialmente	No hay limitaciones cinéticas; no se necesitan metales nobles en los electrodos; disponibles comercialmente	Alto desempeño	Fácil producción y alimentación del combustible
Desventajas	Formación de carbonatos por contaminación por CO ₂ ; el H ₂ O producida disminuye la concentración y la eficiencia	Las membranas aún no han mostrado la durabilidad deseada	Manejo de ácido concentrado	Disolución del catalizador de Ni	Alta temperatura de operación; envenenamiento por S; dificultad en el manejo de materiales a alta temperatura (<i>thermal stress</i> , fisuras)	Sensible a contaminantes; catalizador caro	Entrecruzamiento (<i>crossover</i>) de metanol; baja eficiencia; producción de CO ₂ ; envenenamiento del Pt por CO

* Conocidas por sus siglas en inglés.

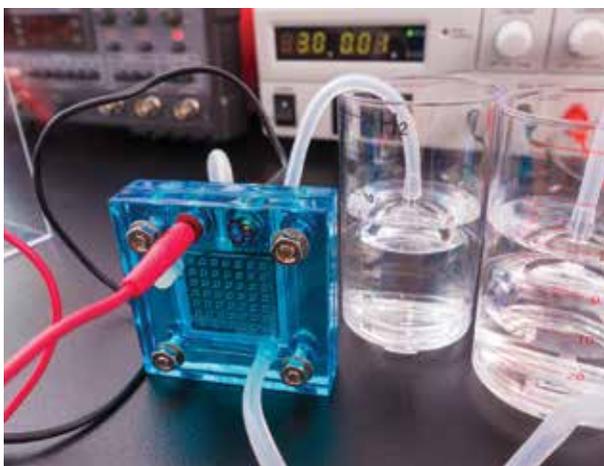
desarrollo de la pila de combustible alcalina para las misiones espaciales; más adelante se utilizarían las pilas de combustible con membrana de conducción protónica. De ahí al presente, destacan algunas aplicaciones militares en la década de 1980 y, más recientemente, el automóvil a pilas de combustible.

En la Figura 3 se representa una pila de combustible con membrana de intercambio protónico; no obstante, existen varios tipos de pilas de combustible (véase la Tabla 1). Básicamente, éstas se clasifican por el tipo de electrolito, que puede ser una solución acuosa ácida o básica, un polímero bien hidratado con muchos nanocanales por los que circulan iones H⁺ u OH⁻, o un cerámico. Las propiedades del elec-

trolito determinan la temperatura y la presión de operación de la pila, así como las características de los materiales de los otros componentes. Las pilas de combustible que operan a altas temperaturas pueden utilizar otros combustibles además del hidrógeno. Algunas de ellas están disponibles comercialmente para los usuarios especializados.

■ Almacenamiento de hidrógeno

■ Arriba se mencionó que el hidrógeno es un gas muy ligero, por lo que se debe aumentar su densidad de algún modo. Esto se realiza con el fin de almacenar en el menor espacio posible la mayor cantidad



de hidrógeno. Existen tres opciones para almacenarlo: 1) en forma de gas comprimido a altas presiones, 2) enfriándolo hasta hacerlo líquido y 3) que sea una parte superficial o estructural de algunos materiales sólidos.

En el primer caso se requiere bastante energía para comprimir el gas desde la presión atmosférica hasta 350-700 atm. Por lo tanto, se usan recipientes especiales que pueden soportar altas presiones sin sucumbir a la fragilización que ocasiona el hidrógeno: el H_2 , al ser una molécula pequeña, cabe en todos los huequitos, hendiduras, rendijas, etcétera; poco a poco va metiéndose por esos huecos hasta dañar la estructura de los metales. El resultado final podría ser una fuga o la explosión del hidrógeno a alta presión.

Por su parte, para el segundo método de almacenamiento se requiere mucha energía para enfriar el hidrógeno y después mantenerlo frío, por lo que también se utilizan tanques especiales. Esta tecnología se emplea para almacenar cantidades verdaderamente grandes de hidrógeno; por ejemplo, en plantas de producción o instalaciones petroleras.

El tercer método requiere un material sólido que pueda retener el hidrógeno. Existen muchos materiales que pueden utilizarse, clasificados en dos tipos de acuerdo con el modo en que el hidrógeno interactúa. El primero es la adsorción de hidrógeno (o

fisisorción; sólo hay una interacción superficial y el hidrógeno es almacenado en forma molecular). En el almacenamiento por quimisorción, el hidrógeno molecular primero se separa en hidrógeno atómico y después reacciona con el material almacenador para formar nuevos compuestos; esto es, hidruros simples o compuestos. El almacenamiento o la liberación de hidrógeno ocurre por medio de calentar/enfriar y subir/bajar la presión del material almacenador. Por ejemplo, para formar MgH_2 a partir de Mg y H_2 se requiere calentar el Mg hasta 350 °C a una presión de 25 atm; mientras que para liberar el hidrógeno del MgH_2 , es decir, regresar al Mg , se requiere bajar la presión a menos de 1 atm estando aún caliente. Otros materiales requieren otras condiciones específicas de presión y temperatura.

El presente trabajo fue realizado gracias al proyecto UNAM-DGAPA-PAPPIT IA100817, “Estudio del comportamiento masivo de $NaAlH_4$ como material de almacenamiento de hidrógeno obtenido a partir de Al reciclado”.

Karina Suárez Alcántara

Unidad Morelia del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.
 karina_suarez@iim.unam.mx

Lecturas recomendadas

- NASA (s/f), *Space Tech*. Disponible en: <<https://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/index.html>>. Consultado el 1 de noviembre de 2018.
- Schlapbach, L. y A. Züttel (2001), “Hydrogen-storage materials for mobile applications”, *Nature*, 414:353-358.
- Suárez Alcántara, K. (2011), “Pilas de combustible: piezas de un futuro limpio”, *Ciencia*, 62:26-32.