

ALMACENAMIENTO



Hernando Romero Paredes, Juan José Ambriz García,
Gilberto Espinosa Paredes y Arturo Fernández Madrigal

En este artículo, los autores exponen diversos mecanismos para el almacenamiento de la energía. Entre otras cosas, hacen especial énfasis en la necesidad de producir y almacenar hidrógeno –a partir de sistemas de disociación del agua mediante una serie de reacciones químicas–, el energético con mayor viabilidad para las sociedades del futuro.

Introducción

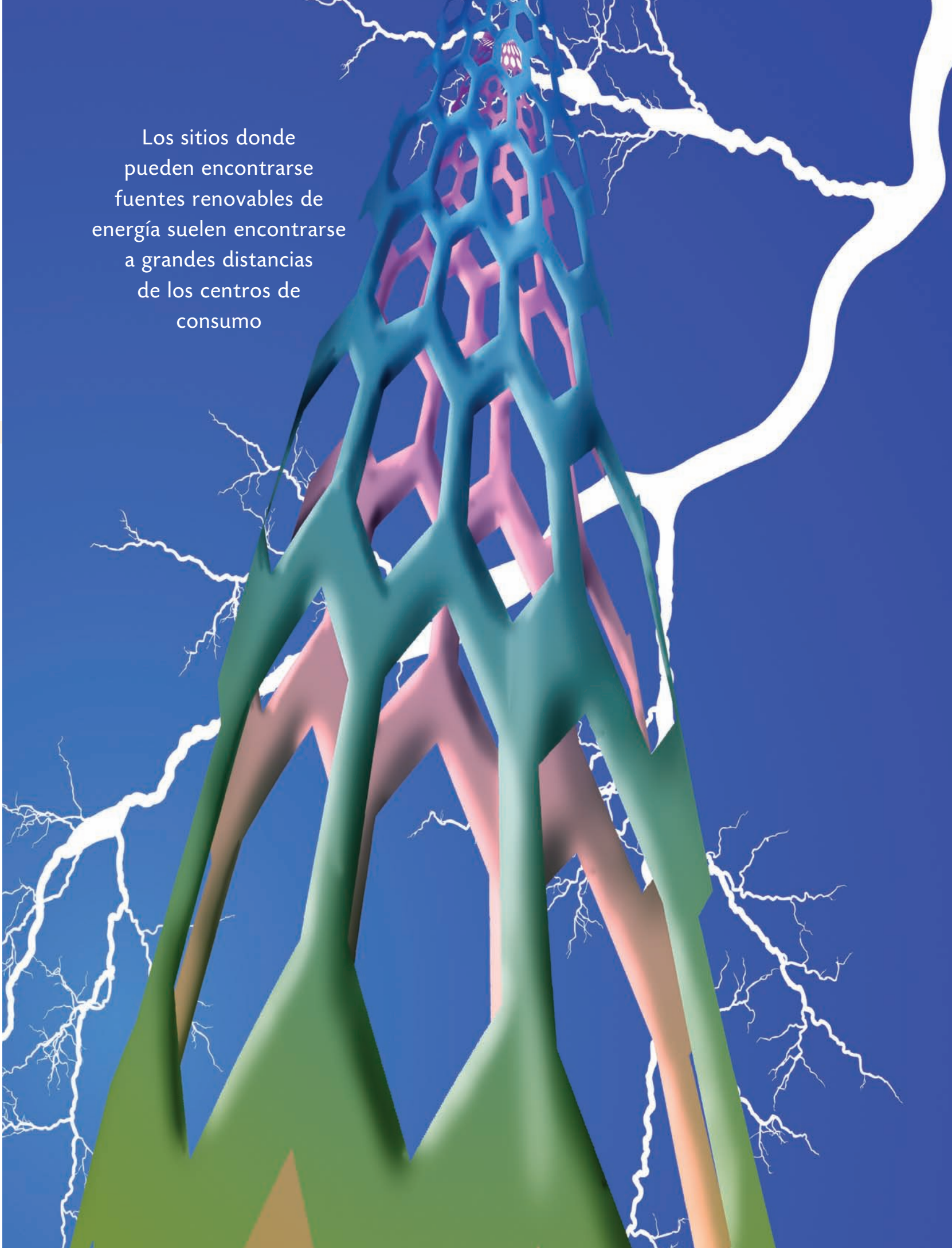
La energía que se genera a partir de algunas fuentes renovables suele presentar intermitencias. El almacenamiento de dicha energía es una alternativa para paliar este problema.

Si bien la naturaleza ha almacenado energía de origen solar en vastas cantidades en forma de biomasa, carbón mineral e hidrocarburos, éstos tardan mucho tiempo en formarse. Para enfrentar con éxito la transición hacia el empleo de fuentes renovables de energía, los sistemas para su almacenamiento son un importante reto para la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

En las sociedades industriales, el almacenamiento de energía responde a las necesidades energéticas o económicas de cada región. Por ello, el almacenamiento puede dividirse en almacenamiento de reserva o estratégico, móvil, y de ajuste. El primero es aquel que permite asegurar el abasto de energía de una región, país o grupo de países ante posibles fluctuaciones en la producción o en los precios de la energía en el mercado mundial. El almacenamiento móvil asegura la autonomía energética para el transporte. Finalmente, el almacenamiento de ajuste se usa para enfrentar las variaciones de la demanda de energía por parte de los consumidores. Estas tres formas de almacenamiento han sido cubiertas en un alto porcentaje por los combustibles fósiles, principalmente el petróleo y sus derivados, así como el gas natural.

Por su parte, las fuentes renovables de energía cuentan con virtudes ampliamente señaladas, pero éstas se ven limitadas por algunos problemas relevantes, como:

Los sitios donde
pueden encontrarse
fuentes renovables de
energía suelen encontrarse
a grandes distancias
de los centros de
consumo



a) la intermitencia de la fuente; b) el desfase entre oferta y demanda de energía; y c) su baja densidad energética.

Adicionalmente, los sitios donde pueden encontrarse fuentes renovables de energía (la mayor parte de los sitios de máxima insolación solar, las regiones con mayores valores de velocidades de viento, las regiones de los océanos con mareas de alto oleaje o gradientes térmicos, así como las áreas con adecuadas cantidades de biomasa) generalmente se encuentran a grandes distancias de los centros de consumo. Para resolver estas limitaciones, deben emplearse sistemas viables de almacenamiento y transporte de energía. En este trabajo se abordará el tema del almacenamiento de la energía térmica solar mediante sistemas químicos, no sin antes dar un pequeño panorama de otros mecanismos de almacenamiento de energía.

Mecanismos para el almacenamiento de energía

Energía eléctrica

Es posible almacenar la energía eléctrica en baterías electroquímicas, tal como se hace en los vehículos automotores o en ciertas

aplicaciones como sistemas de respaldo para computadoras; dicho método es adecuado para pequeñas cantidades de energía almacenada.

Sin embargo, para cantidades mayores es posible utilizar sistemas basados en materiales superconductores. Se han propuesto sistemas que permiten almacenar por tiempos pequeños la energía mecánica, a través de volantes de inercia; la energía potencial mediante el bombeo (o re-bombeo) de agua, para después ser utilizada en una pequeña central hidroeléctrica; la energía potencial también almacenada como aire comprimido (con un compresor eléctrico) que después puede ser utilizado en una turbina de aire comprimido para la generación eléctrica.

Existe en la actualidad un gran interés en los dispositivos denominados *supercapacitores electroquímicos*, los cuales permiten el almacenamiento de energía eléctrica mediante el empleo de dos colectores de corriente formados por materiales de alta porosidad, los cuales están separados por un material poroso que posee una alta conductividad iónica. Estos dispositivos pueden almacenar 100 faradios por gramo.

La energía eléctrica utilizada para producir hidrógeno mediante sistemas electrolíticos también es una forma de almacenamiento, pues el hidrógeno se puede utilizar en una celda de combustible para producir electricidad.

Energía térmica

La energía térmica puede ser almacenada mediante el aprovechamiento del *calor sensible* de los cuerpos, del *calor latente* al cambiar de una fase a otra (por ejemplo, de líquido a gas) o de la energía involucrada en una reacción química. Se acostumbra emplear el término *almacenamiento térmico* al que se basa en el calor sensible o latente, y el de *almacenamiento termoquímico* al que utiliza el calor de reacción.

Cuando el diseño de un sistema de almacenamiento se realiza para periodos cortos de tiempo, los sistemas térmicos puros pueden ser una buena solución. Sin embargo, si la energía almacenada debe ser conservada durante largo tiempo antes de su utilización, o bien ser transportada a un lugar alejado de donde se encuentra la fuente térmica original, la mejor solución es el almacenamiento termoquímico.

En el almacenamiento térmico por calor sensible, la temperatura del medio de almacenamiento se incrementa durante la fase de carga; pierde energía mientras permanece almacenada, con una disminución de la temperatura, y en la etapa de res-



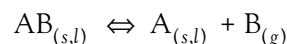
titución de la energía al usuario, la temperatura del medio decrece. En los sistemas por calor latente, la temperatura del medio de almacenamiento permanece constante durante la carga y descarga del sistema, aunque se pierde energía durante el periodo de almacenamiento.

Para periodos de almacenamiento elevados y niveles de carga y restitución de energía a temperaturas altas y constantes, la mejor solución es el almacenamiento termoquímico. Además, la gran cantidad de energía que se requiere durante la creación o destrucción de un enlace químico hace que estos sistemas sean los que ofrecen las mayores densidades energéticas por unidad de masa. En la Tabla 1 se compara la densidad de almacenamiento de energía promedio de tres de los sistemas más comunes: por calor sensible, por calor latente y termoquímico, por reacciones reversibles.

Tabla 1. Comparación de la densidad de almacenamiento de energía de diversos sistemas

Mecanismo de almacenamiento	Medio de almacenamiento	Densidad de almacenamiento (megajoules por metro cúbico)
Calor sensible	Agua a 50 °C	104.5
Calor latente	Hidratos (20-150 °C)	~ 350
	Fluoruros (500-1 000 °C)	~1300
Reacción química	A temperaturas superiores a 600 °C	~3500

Como consecuencia de cambios energéticos en los enlaces químicos, las reacciones reversibles pueden ser utilizadas para acumular gran cantidad de energía que puede conservarse por mucho tiempo a temperatura ambiente y restituirse a temperaturas elevadas. La mayoría de los sistemas desarrollados hasta ahora se basan en una reacción de disociación térmica del tipo:



en donde $AB_{(s,l)}$ es un compuesto químico, en fase sólida (s) o líquida (l), formando los compuestos $A_{(s,l)}$, y $B_{(g)}$ en fase gas (g) o en fase líquida (l).

Al suministrarle energía térmica al compuesto $AB_{(s,l)}$, éste se separa en sus componentes y acumula la energía en forma de energía potencial química. La reacción inversa ocurre espontáneamente a temperatura ambiente, o con una pequeña energía de activación. El gas que se desprende se almacena, excepto

cuando se trata de un constituyente de la atmósfera, o se puede obtener fácilmente por otros medios. El éxito del ciclo depende del rendimiento de la reacción en ambos sentidos, la facilidad para separar los productos de la reacción a la temperatura de descomposición y la estabilidad a largo plazo de la reacción.

Ciclos termoquímicos de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento termoquímicos son potencialmente atractivos, debido primordialmente a las ventajas adicionales que presentan en comparación con los sistemas por calor sensible y latente. Entre estas características se encuentran:

- *Alta densidad de energía:* la capacidad teórica de almacenamiento es alta, debido a que el calor producido mediante la posible reacción química es generalmente mucho mayor que la temperatura de transición o los cambios de calor sensible.
- *Almacenamiento a temperatura ambiente:* los productos pueden ser enfriados y almacenados a temperatura ambiente.
- *Almacenamiento a largo plazo:* los sistemas termoquímicos también tienen la ventaja de almacenar energía durante periodos largos sin que ésta se degrade.
- *Facilidad de transporte:* dado que los productos están a temperatura ambiente, pueden utilizarse para transportar la energía térmica a grandes distancias.
- *Alta temperatura:* algunas reacciones proceden a temperaturas suficientemente altas como para generar electricidad en condiciones de temperatura constante, y por tanto entregar una potencia constante.

La parte fundamental de un sistema de almacenamiento termoquímico es la reacción química. Sin embargo, no se puede utilizar eficientemente cualquier tipo de reacción reversible. Es

necesario considerar las propiedades termodinámicas y cinéticas del sistema cíclico. Se preferirán las reacciones rápidas, que den buen rendimiento, que no presenten reacciones laterales o secundarias, y que tengan productos de volumen molar pequeño. Estos parámetros definen la densidad de almacenamiento para el caso de las reacciones reversibles. Es importante que las temperaturas de las reacciones involucradas estén en los niveles que se tienen en la oferta de energía (solar) y el que se requiere por el usuario. Se usarán compuestos que preferentemente no reaccionen fácilmente con oxígeno ni con agua, ya que difícilmente se les puede excluir totalmente de un sistema cerrado, a menos que esos compuestos formen parte de los reactivos del sistema.

Para seleccionar los posibles sistemas de almacenamiento, es útil contar con un criterio que permita establecer la posibilidad de una transformación química o física en determinadas condiciones. Para ello, es conveniente utilizar una propiedad de la termodinámica denominada *energía libre* ($G_{T,P}$), la cual nos permite establecer los criterios de espontaneidad y equilibrio para los procesos.

La mayoría de las reacciones ocurre a temperatura y presión constantes, por lo que el cri-

terio de espontaneidad y equilibrio es aplicable en estas condiciones. Así, en un proceso a temperatura y presión constante, en ausencia de toda transferencia de trabajo, excepto por trabajo en la frontera, la energía libre ($G_{T,P}$) es una propiedad termodinámica que siempre disminuye en un cambio espontáneo. Al acercarse al equilibrio, dicha energía libre alcanza un valor mínimo.

Para un cambio macroscópico, la energía libre se expresa como:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T^0 \Delta S^0$$

ΔH^0 es la propiedad termodinámica conocida como *entalpía* del cambio macroscópico a condiciones estándares de temperatura y presión; T^0 es la temperatura a la cual se llevó a cabo dicho cambio; y ΔS^0 es la propiedad termodinámica denominada *entropía* a condiciones estándares de presión y temperatura.

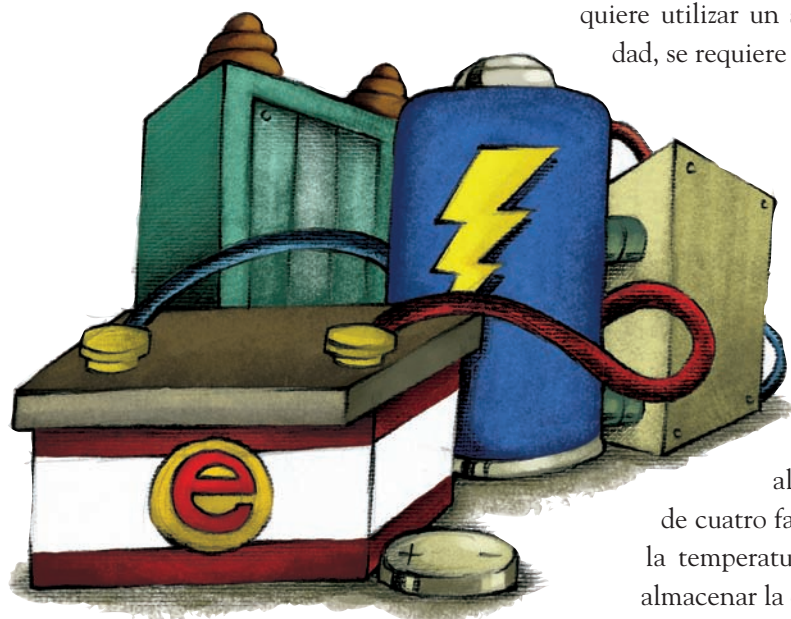
En forma natural, un sistema tiende a llegar al equilibrio en un estado de mínima energía y máxima entropía.

En el equilibrio, el cambio de la energía libre, ΔG^0 , tiende a cero, por lo que se puede estimar fácilmente T^0 , la cual bajo estas condiciones se denomina *temperatura de inversión*. Para valores de temperatura de reacción T mayores que T^0 , se favorece la reacción *endotérmica*, o sea la que almacena energía. Pero si la temperatura de reacción T es menor que T^0 , la reacción será *exotérmica*: una reacción de recombinación que regenera la energía acumulada.

La magnitud de T^0 es un valioso criterio en la selección de una reacción para almacenamiento de energía, pues proporciona la temperatura termodinámica en que una reacción dada puede utilizarse para almacenar y regenerar calor. Por ejemplo, si se quiere utilizar un sistema termoquímico para generar electricidad, se requiere que libere calor a 773 kelvin (medida de temperatura absoluta), y almacenar energía solar a 1 273 kelvin; esto implica que la magnitud de T^0 debe encontrarse aproximadamente

en el intervalo 773 a 1 273 kelvin. Así, en un primer análisis bastará con examinar el valor que guarda la relación $\Delta H^0/\Delta S^0$ para seleccionar las reacciones que potencialmente son capaces de regenerar calor a la temperatura deseada.

La Figura 1 presenta la capacidad de almacenamiento de la reacción de disociación de cuatro familias de compuestos químicos en función de la temperatura de inversión. Se aprecia que, si se desea almacenar la energía térmica solar a temperaturas inferiores



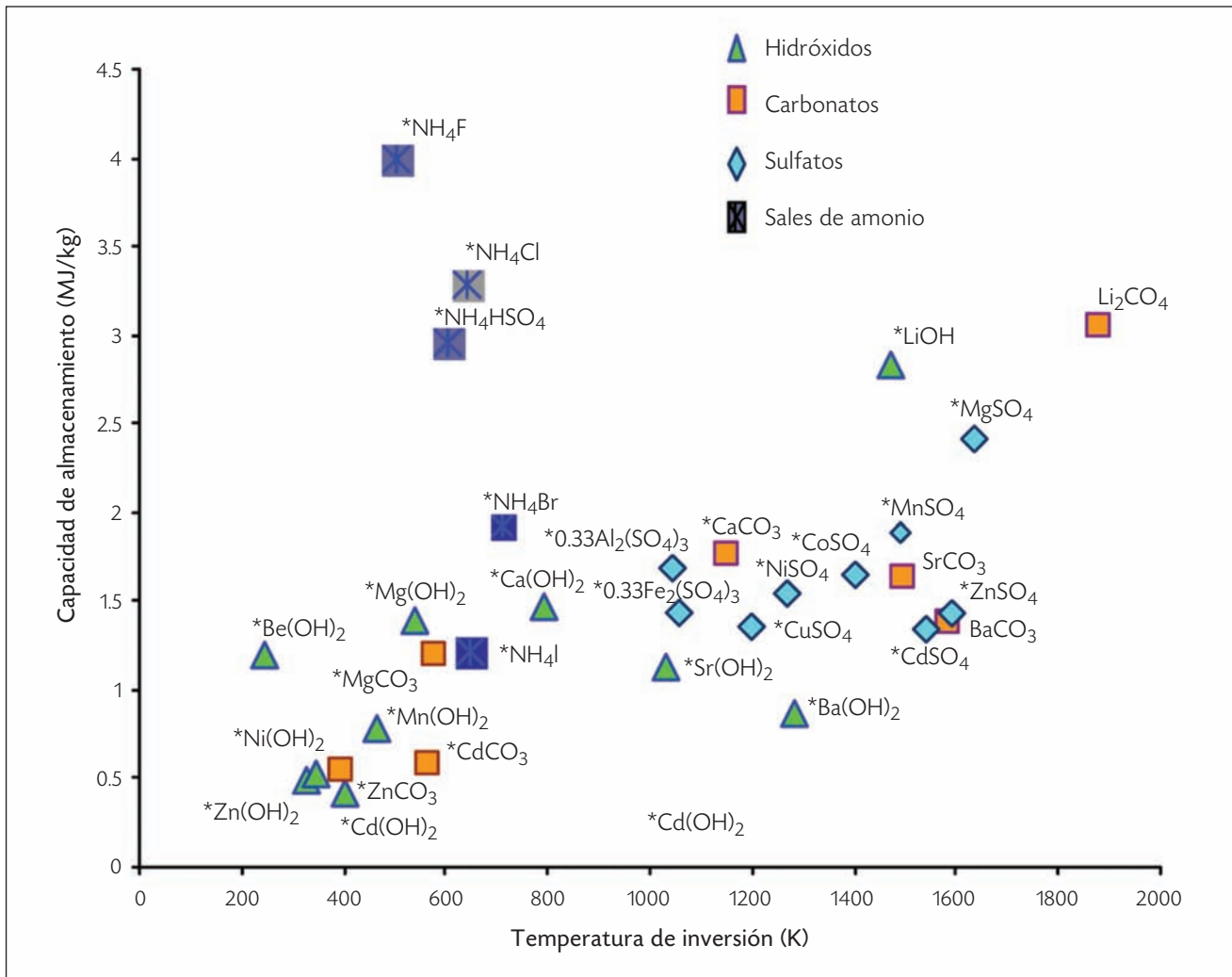


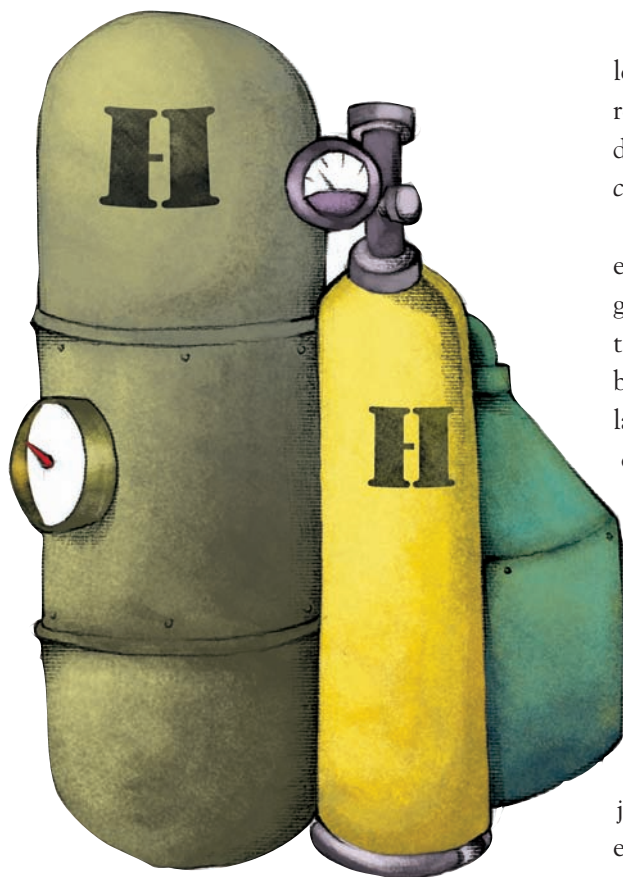
Figura 1. Capacidad de almacenamiento de energía térmica solar respecto a la temperatura de inversión de reacciones reversibles seleccionadas.

de los 600 kelvin, las sales de amonio son candidatas idóneas para ese fin. Si se incrementa la temperatura, digamos hasta los 1 000 kelvin, el carbonato de calcio y los sulfatos de aluminio y de hierro son ideales para ese nivel térmico. A temperaturas mayores a los 1 000 kelvin, el hidróxido de litio, carbonato de litio, sulfato de magnesio y el sulfato de manganeso presentan las mejores características para lograrlo.

Producción de hidrógeno

La opinión generalizada de que el hidrógeno es el energético con mayor viabilidad para el futuro, que además ofrece una sustentabilidad elevada, establece la necesidad de un método adecuado para obtenerlo.

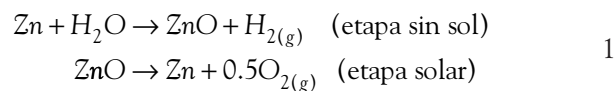
El hidrógeno es sin lugar a dudas una de las mejores alternativas para almacenar energía solar a temperaturas elevadas. Pero su producción al día de hoy es muy limitada, y está enfocada exclusivamente a su obtención a partir de hidrocarburos. Hasta la fecha, los métodos clásicos de producción de hidrógeno han sido incosteables para producción masiva. Durante muchas décadas, las principales fuentes para la producción de hidrógeno han sido el gas natural y los hidrocarburos líquidos, ambas materias primas no renovables. El uso de la energía solar para la producción de hidrógeno es una alternativa que se explora con mucho énfasis en todo el mundo.



Los ciclos termoquímicos de descomposición del agua han sido ampliamente propuestos y son una forma interesante de almacenar y transportar energía térmica proveniente principalmente de la energía solar concentrada

El agua constituye una reserva inagotable de hidrógeno, por lo que los métodos alternos de producción utilizan una serie de reacciones químicas cuya suma da como resultado la disociación del agua (véase ecuación 1). Estos sistemas son conocidos como *ciclos termoquímicos de descomposición del agua*.

La disociación térmica del agua, o termólisis, es la base para evaluar cualquier ciclo termoquímico para producción de hidrógeno. La Figura 2 muestra el diagrama de temperatura contra entalpía, entropía y energía libre, así como el diagrama de equilibrio para esa reacción. Se aprecia que a temperatura ambiente la disociación de agua es posible si se le suministra una gran cantidad de trabajo (ΔG), como sucedería con la electrólisis. Conforme se va incrementando la temperatura, la cantidad de trabajo por suministrar (ΔG) va disminuyendo, en tanto que el calor suministrado se incrementa ($T\Delta S$). Se observa que la disociación térmica completa del agua es posible a temperaturas superiores a los 4 mil 700 grados centígrados ($\Delta G = 0$). Ahora bien, como lo que se busca es reducir esta temperatura de reacción y eliminar la necesidad de suministrar trabajo para disociar el agua, se han planteado un conjunto de reacciones químicas exo y endotérmicas cuya suma neta es justamente la reacción de disociación del agua. Los ciclos termoquímicos de descomposición del agua han sido ampliamente propuestos y son una forma interesante de almacenar y transportar energía térmica proveniente principalmente de la energía solar concentrada. Así se tiene por ejemplo el ciclo Zn/ZnO, que se ilustra en forma condensada en la siguiente ecuación:



Para este ciclo, el reactivo que se consume es el agua, en tanto que el cinc se recicla, y no se requiere alimentar cada vez nuevo reactivo. Adicionalmente, la separación del hidrógeno del oxígeno se realiza de forma natural, ya que éstos se producen en reacciones diferentes. La Figura 3 muestra cómo podría operar este ciclo.

En la literatura existen más de 500 ciclos termoquímicos de descomposición del agua que se han propuesto para producir hidrógeno a partir de agua. El primero de ellos fue probablemente el postulado por Emil Callet en 1924, patentado en Gran Bretaña. Posteriormente, hacia la década de los setenta, y en el contexto de la búsqueda de sistemas de almacenamiento de la energía de reactores nucleares para regular la oferta y la demanda de energía eléctrica generada por este medio, se propusieron

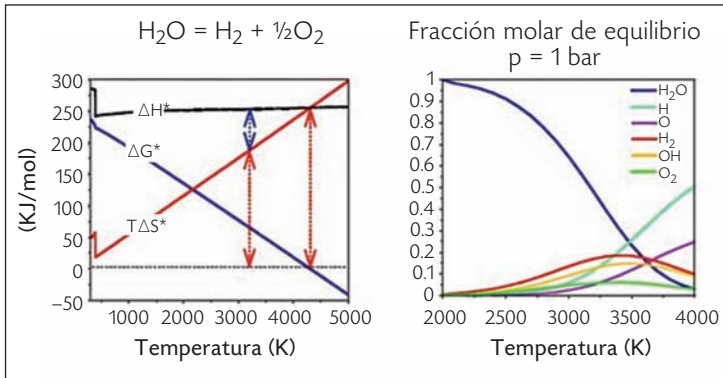


Figura 2. Diagrama de temperatura energía y de equilibrio para la disociación del agua.

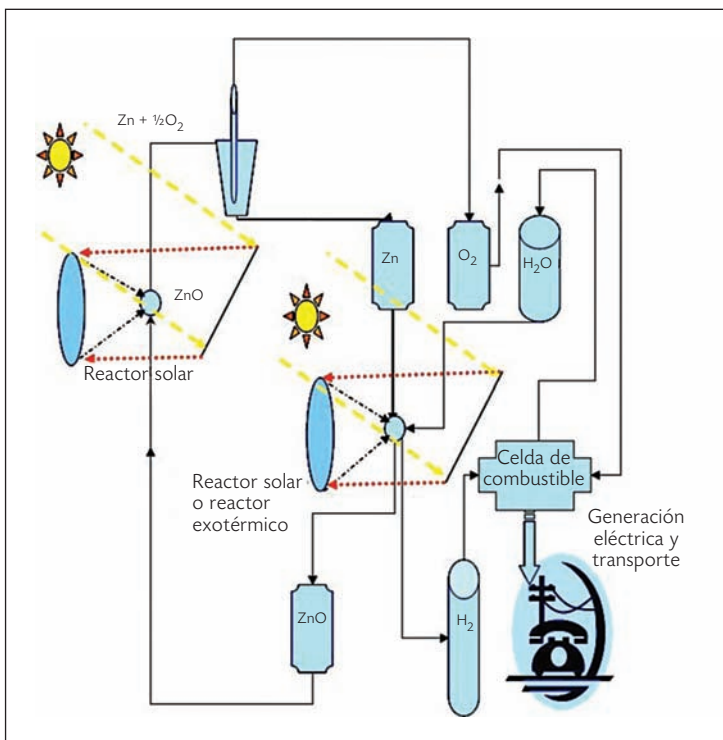


Figura 3. Esquema de un ciclo termoquímico para la producción de hidrógeno.

un conjunto de ciclos cuyo nivel de temperatura máxima fue alrededor de 850 grados centígrados. Los ciclos de temperatura más alta fueron desechados.

A partir de 1973, luego de la primera crisis energética mundial, se incrementaron las investigaciones para potenciar el uso de la energía térmica solar. A partir de entonces se han identificado y propuesto un conjunto de reacciones químicas que incluyen a los óxidos de metales volátiles, óxidos de metales perma-

nentes, sulfatos metálicos y una lista que se incrementa constantemente.

Pero, pese a la gran cantidad de ciclos propuestos, las investigaciones para demostrar su factibilidad se han centrado en sólo unos pocos. La mayor parte de los ciclos termoquímicos solares que se han investigado son de dos etapas, e involucran óxidos metálicos, o los ciclos propuestos para los reactores nucleares (Ciclo I-S, UT-3). Algunos de los ciclos que se propusieron de dos etapas, con temperaturas para la reacción endotérmica del orden de los 2 mil 300 kelvin, están relacionados con CdO/Cd, ZnO/Zn, Fe₃O₄/FeO.

De manera clásica, la temperatura máxima de trabajo de estas reacciones químicas, que pertenecen a los ciclos termoquímicos de descomposición del agua, es una función del número de reacciones involucradas en los ciclos. A mayor número de reacciones, menor es la temperatura máxima de trabajo. Sin embargo, la cantidad de masa que se maneja en el proceso se incrementa con el número de reacciones. Para una buena selección del o los ciclos apropiados se deben tomar en cuenta las cuatro opciones de captación solar para obtener elevadas temperaturas: canal parabólico, parábola de revolución y sus arreglos particulares (Defrac, CPC, etc.) y torre central estándar y avanzada. Un grupo de investigadores de Estados Unidos, por un lado, y uno de Francia, por otro, hicieron una selección de ciclos termoquímicos de descomposición del agua que cumplieran con ciertos criterios. Entre los más importantes están el nivel de temperatura máxima compatible con el sistema de concentración solar, el número de reacciones involucradas y las etapas de separación de productos, el número de elementos en el ciclo, su factibilidad teórica (equilibrio termodinámico) y técnica (cinética química, reacciones secundarias, relación entre reactivos e hidrógeno producido), la eficiencia exergética esperada, los costos del proceso, los riesgos en su desarrollo y operación, los riesgos ambientales y la sensibilidad

suelve ese problema, se podrá acelerar el cambio a una economía mundial basada en este gas.

En la actualidad existen diversas formas de almacenamiento para el hidrógeno; cada una presenta ventajas y desventajas muy específicas.

Las principales características que deben tenerse en cuenta para elegir un método de almacenamiento son su seguridad y sencillez. Los métodos actuales se basan en almacenarlo en forma de gas, en cilindros (comprimido), o bien almacenarlo en forma líquida o sólida (mediante hidruros metálicos), y más recientemente en nanotubos de carbono y micro-esferas de vidrio.

El almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido se realiza a presión o temperatura constante; se emplean para ello cilindros de acero a presiones de hasta 250 atmósferas. Su comercialización se realiza en cilindros desde 10 litros hasta 10 mil metros cúbicos. Los materiales empleados para la construcción de los cilindros son acero al carbón o aluminio reforzado con fibras de carbono.

Para licuar este gas se emplean dos procesos: enfriarlo hasta la formación de gotas de líquido, produciendo su licuefacción, o aplicando presión al gas, lo que provoca la reducción de la distancia promedio entre las moléculas, de forma que se mantengan juntas por atracción mutua. En procesos industriales de licuefacción se utiliza una combinación de ambos métodos.

La licuefacción del hidrógeno se realiza a 253 kelvin. Los recipientes empleados para su almacenamiento generalmente son de acero inoxidable de doble pared, para evitar pérdidas de calor. Esta forma de almacenamiento se prefiere por razones de seguridad, y permite alcanzar densidades de energía de hasta 22 megajoules por kilogramo. Pero estos procesos de licuefacción requieren grandes cantidades de energía, además de equipo costoso, lo que encarece el almacenamiento del hidrógeno por este medio.

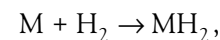
El almacenamiento del hidrógeno en estado sólido se puede realizar mediante el empleo de dos tipos de materiales: los denominados *aleaciones metálicas* y los *hidruros metálicos*. Los primeros se presentan en cuatro diferentes formas (AB_5 , AB , AB_2 , A_2B , donde A y B son metales, pero particularmente B es un metal tipo catalizador). Algunos ejemplos de estas estructuras son los compuestos intermetálicos como los siguientes: tipo AB_5 : $LaNi_5$, $LaCo_5$, $CeNi_5$ y YNi_5 ; tipo AB : $TiFe$, $TiCo$ y $TiFe_{1-x}Mn_x$; tipo AB_2 : ZrV_2 , $ZrCr_2$, $ZrMn_2$ y $Zr(CoCr_{1-x})_2$; y tipo A_2B : Mg_2Ni , $Mg_2Ni_{0.95}Cu_{0.05}$ y $Mg_2Ni_{0.5}Al_{0.5}$.

Los hidruros metálicos son compuestos sólidos formados de hidrógeno y un metal. Alrededor de 50 elementos de la tabla



periódica pueden absorber hidrógeno en grandes cantidades, formando así compuestos que verdaderamente actúan como “esponjas” de hidrógeno. Para ello, deben poseer tamaños de grano menores a los 50 nanómetros (millonésimas de milímetro). Su densidad de almacenamiento es mayor que si se tratara de hidrógeno líquido. La formación de estos hidruros metálicos ocurre debido a la unión química en la red cristalina del metal con el hidrógeno.

La reacción que se lleva a cabo es:



donde M es un metal. La reacción es reversible y está determinada por la presión del gas. Si dicha presión está por arriba de la presión de equilibrio, se formará el hidruro; si está por debajo, el hidrógeno será liberado. La capacidad de almacenamiento de estos materiales ha alcanzado del orden de siete gramos de hidrógeno por gramo de hidruro. Generalmente los hidruros metálicos con alta capacidad convencional requieren también altas temperaturas (300 a 350 grados centígrados) para liberar el hidrógeno. Actualmente se están buscando nuevos hidruros metálicos en los que dicha liberación ocurra a bajas temperaturas. Existen diversos métodos de preparación de estos compuestos; sin embargo, el método tradicional es el aleado mecánico.

La absorción del hidrógeno sobre carbón activado es un fenómeno que se conoce desde hace mucho tiempo; sin embargo, estudios recientes realizados sobre este punto han llevado a encontrar que estructuras como nanotubos y nanofibras de carbono, así como los *fulerenos* (estructuras de carbono en forma de esferas), poseen una mayor capacidad de adsorción, además de ser económicamente baratas y muy fáciles de regenerar.

En estos materiales microporosos, las moléculas de hidrógeno se adsorben mediante fuer-

zas de Van der Waals (atracciones a nivel molecular). Debido a que dichas fuerzas son débiles, el proceso de adsorción se dificulta a temperatura ambiente. Por ello, muchas investigaciones se han orientado a desarrollar métodos de tratamiento para, por ejemplo, hacer nanotubos de pared simple que permitan alcanzar mejores porcentajes de almacenamiento a temperaturas bajas. A principios de esta década se logró obtener del orden de 7.5 por ciento en peso de almacenamiento de hidrógeno a baja temperatura en nanotubos de carbono de pared simple tratados con métodos de ultrasonido.

Otra de las tecnologías que se desarrolla actualmente son las esferas de vidrio huecas, que pueden almacenar hidrógeno al ser



calentadas (lo cual aumenta la permeabilidad de sus paredes). Posteriormente se sumergen en gas hidrógeno a alta presión, y después se refrigeran hasta la temperatura ambiente; así, el hidrógeno queda retenido en su interior. Un incremento posterior en la temperatura libera el hidrógeno encerrado en estas esferas. El reto de esta técnica consiste en comprender cómo activar y desactivar todo el proceso. Esta forma de almacenar hidrógeno tiene un gran potencial, ya que es una forma portátil de almacenarlo, además de segura (pues las esferas contienen hidrógeno a muy baja presión), económica, recargable y reciclable.

Conclusión

Como se ha mencionado anteriormente, el almacenamiento de energía en la economía basada en el petróleo, está implícito en el uso de este energético no renovable, ya que el uso de combustibles fósiles ha permitido establecer las tres finalidades del almacenamiento.

Sin embargo, ante la inminente disminución de este tipo de combustibles, es necesario desarrollar principalmente las fuentes de energía renovable, lo que conlleva también el desarrollo de procesos de almacenamiento de energía que tomen en cuenta las diversas características que tienen estas formas de energía.

Como se ha visto, los métodos más adecuados desde el punto de vista de térmico son los basados en procesos termoquímicos, los cuales permitirán asegurar el almacenamiento de grandes cantidades de energía, empleando, por ejemplo, la radiación solar. Estos procesos emplean una reacción química, la cual debe ser reversible, para generar y almacenar la energía necesaria para las diversas actividades humanas.

Otra característica importante de los procesos termoquímicos es que los compuestos empleados en la reacción química son, en general, abundantes en la naturaleza, lo cual permite una mayor independencia energética. Asimismo, con estos procesos es posible la producción y el almacenamiento del principal combustible que permitirá reducir drásticamente la emisión de contaminantes a la atmósfera: el hidrógeno.

Actualmente, el desarrollo de muchos de estos procesos enfrenta grandes retos desde el punto de vista tecnológico para su implementación a gran escala. Muchos de estos retos se han superado parcialmente mediante el trabajo que se realiza actualmente en diversos centros de investigación y desarrollo en el mundo. Sin duda podrán ser utilizados a plenitud en el mediano plazo, ya que los consumos actuales de energía así lo demandan.

Hernando Romero Paredes Rubio es doctor en energía y trabaja en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Su línea de investigación es la termoquímica solar y el ahorro y uso eficiente de la energía. hrp@xanum.uam.mx

Juan José Ambriz García es doctor en energía. Trabaja en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Su línea de investigación es el ahorro y uso eficiente de la energía, la refrigeración y el aire acondicionado y la termoquímica solar. agj@xanum.uam.mx

Gilberto Espinosa Paredes es doctor en energía y trabaja en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Su línea de investigación son los fenómenos de transporte en sistemas energéticos y flujos multifásicos. gepe@xanum.uam.mx

Arturo Fernández Madrigal es doctor en ciencias (ciencia de materiales). Trabaja en el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Su línea de investigación es la producción y almacenamiento de hidrógeno. afm@cie.unam.mx

Lecturas recomendadas

Abanades S., P. Charvain, G. Flamant y N. Pierre (2006), "Screening of water splitting thermochemical cycles potentially attractive for hydrogen production by concentrated solar energy", *Energy* 31, 2805-2822.

Romero Paredes H., G. Flamant, S. Abanades, P. Charvin y J. J. Ambriz (2006), "Thermochemical storage of solar energy by means of sulfates: a review", *Proceedings of the 13th International Symposium on Concentrated and Chemical Energy Technologies*, Solar PACES 2006, Sevilla, España, junio 20-23 de 2006 (trabajo B2-S3).

Sociedad Mexicana del Hidrógeno, A. C. (2008), "Curso de actualización sobre Tecnologías del Hidrógeno", México, Sociedad Mexicana del Hidrógeno A.C.. Disponible en: www.smh.org