

Ferdi Schüth es director del Instituto Max Planck para la Investigación del Carbón. Trabaja en procesos de catálisis relevantes para el suministro energético, como la activación del metano, la transformación de biomasa o el almacenamiento de hidrógeno.



ENERGÍA

# Sistemas de almacenamiento energético

Los combustibles fósiles no solo generan electricidad, sino que constituyen excelentes reservas químicas de energía. La red del futuro deberá suplir esa capacidad de acopio con otros medios

*Ferdi Schüth*

**E**L CAMBIO DE MODELO ENERGÉTICO PUEDE CONSIDERARSE una realidad en marcha. Cabe esperar que gran parte del suministro eléctrico del futuro proceda de fuentes renovables, ya se trate del viento, el agua o la irradiación directa del sol. Sin embargo, el rendimiento de estas formas de generación de electricidad queda a merced de las variaciones meteorológicas, motivo por el que presenta grandes oscilaciones temporales. Por tanto, en el futuro habremos de apostar por sistemas de almacenamiento que nos permitan acumular los excedentes obtenidos durante los picos de producción, a fin de suministrar esa energía a la red cuando no sople el viento, no corra el agua o no brille el sol.

## EN SÍNTESIS

**Un suministro energético** basado en fuentes renovables deberá hacer frente a grandes fluctuaciones en la generación de electricidad. Ello requerirá sistemas de almacenamiento que estabilicen la red y permitan aprovechar los excedentes de producción.

**Existen diversas técnicas de almacenaje:** mecánicas, térmicas, electroquímicas y químicas. Algunas son de eficacia probada, como el hidrobombeo, mientras que otras se encuentran en fase de desarrollo. Cada método presenta sus propias ventajas e inconvenientes.

**Cabe esperar que la red eléctrica del futuro** funcione con una mezcla coordinada de diferentes depósitos energéticos según deban propulsar vehículos, compensar los picos ocasionales o cubrir las variaciones estacionales de producción y demanda energéticas.

El problema del almacenamiento apenas se había planteado hasta ahora debido a que el petróleo, el gas natural o el carbón no solo son combustibles de muy elevado rendimiento, sino también excelentes reservas energéticas. El poder calorífico del gas natural o el diésel asciende a entre 10 y 14 kilovatios hora por kilogramo, frente a los 0,2 que almacena una batería de iones de litio. La mayoría de las fuentes renovables de energía, sin embargo, proporcionan energía eléctrica, pero ningún compuesto químico que haga las veces de almacén. Los rotores eólicos y las turbinas hidráulicas accionan generadores eléctricos; las placas fotovoltaicas crean una diferencia de potencial que permite establecer una corriente, y las centrales termosolares calientan un medio a altas temperaturas que, después, se emplea para propulsar una turbina. Dadas las dificultades para almacenar energía, el constante aumento de la proporción de renovables en la mezcla de generación eléctrica plantea un desafío de enormes proporciones, pues producción y demanda deben hallarse siempre en equilibrio a fin de evitar daños en la red.

Como ejemplo, consideremos la cantidad de electricidad que los aerogeneradores alemanes suministraron en abril de 2011 a

la compañía 50Hertz: en el espacio de unos días, la potencia llegó a oscilar en hasta ocho gigavatios, el equivalente a la potencia nominal de seis centrales nucleares de gran tamaño. En varias ocasiones, el exceso en la producción eólica ha llegado a provocar que el precio de la electricidad alcance valores negativos, puesto que otras centrales no pudieron desconectarse a tiempo para compensar el pico de generación.

Tales oscilaciones deberían poder amortiguarse con un sistema de almacenamiento adecuado. No obstante, para operar con eficacia, dicho sistema habría de satisfacer un abanico de requisitos muy amplio. Por un lado, los picos de corta duración —ya sean en la producción o en la demanda— no suelen prolongarse durante más de unos días. En un país como Alemania, podría hacerseles frente con una capacidad de almacenamiento de algunos cientos de gigavatios hora.

Sin embargo, la mayor parte de las zonas del mundo se enfrentan también a grandes variaciones estacionales: debido al uso de la calefacción, el consumo eléctrico en Alemania aumenta en invierno en torno a un 10 por ciento, lo que obliga al país a quemar más del doble de gas natural que en verano. En cam-



**Central de hidrobombeo** en las inmediaciones del municipio alemán de Goldisthal. Estos sistemas de almacenamiento gozan de una eficiencia elevada, pero su aplicabilidad a gran escala se ve limitada por la dificultad para encontrar emplazamientos adecuados.

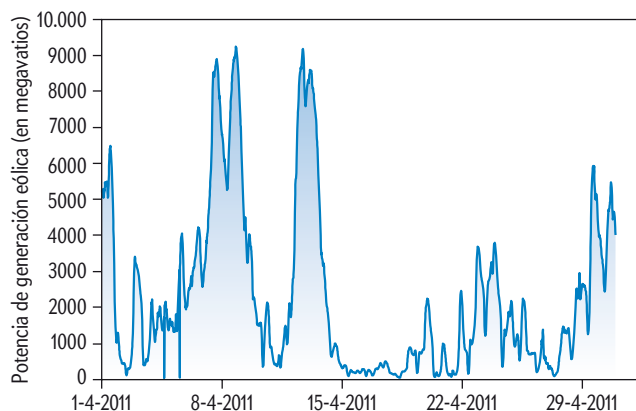
bio, en EE.UU. ocurre a la inversa: como consecuencia del uso generalizado de aire acondicionado, la demanda energética durante el estío supera en un 20 por ciento a la de los meses de invierno. Pero la generación con renovables no se ajusta a los vaivenes estacionales que experimenta el consumo, por lo que las compañías se ven obligadas a contar con centrales de apoyo, a fin de suministrar la energía necesaria durante las épocas de mayor demanda. Si tales diferencias hubiesen de cubrirse con sistemas de almacenamiento, estos deberían acumular cantidades descomunales de energía, del orden de cientos de miles de gigavatios hora. A tal efecto, casi la única posibilidad que cabe considerar hoy en día son los sistemas de almacenamiento químicos, ya que la capacidad de los almacenes electroquímicos (baterías) o los mecánicos (hidrobombeo o aire comprimido) resulta muy inferior.

En otro orden de necesidades, los futuros vehículos eléctricos necesitarán dispositivos de almacenamiento pequeños, transportables y con una capacidad del orden de diez o cien kilovatios hora: millones de veces menor que la de los sistemas requeridos para alimentar la red. El reto que plantean es, por tanto, completamente distinto. Aquí el obstáculo principal reside en que la densidad energética de la que gozan los enlaces químicos de los hidrocarburos (las moléculas que componen la gasolina o el diésel) apenas puede alcanzarse con ninguna otra técnica. Ello explica la poca autonomía de los automóviles eléctricos modernos en comparación con la de los vehículos de combustión.

### ALMACENAMIENTO MECÁNICO

La energía eléctrica puede transformarse con relativa facilidad en energía mecánica, y viceversa. Las centrales hidroeléctricas reversibles, o de hidrobombeo, se basan en este principio. Los excedentes de energía se emplean en bombear agua desde una reserva situada a un nivel bajo hasta otra más elevada. Después, esa agua se deja caer y, en su recorrido de descenso, acciona turbinas que generan corriente eléctrica.

La cantidad de energía almacenada en la reserva de agua viene dada por su energía potencial, la cual depende de la diferencia de altura  $h$  entre ambos depósitos y de la masa de agua  $m$  de acuerdo con la expresión  $E = mgh$ , donde  $g$  denota la aceleración de la gravedad sobre la superficie terrestre (unos 10 me-



**Fluctuaciones de generación eólica** de la compañía eléctrica alemana 50Hertz durante el mes de abril de 2011. En apenas unos días, las oscilaciones llegaron a los 8000 megavatios, el equivalente a la potencia de seis centrales nucleares.

tros por segundo al cuadrado). Para una diferencia de altura de 300 metros, un metro cúbico de agua almacenará por tanto unos 3 millones de julios; es decir, 0,8 kilovatios hora. En Alemania, las centrales de hidrobombeo suman una capacidad conjunta de 38 gigavatios hora. Si lo comparamos con el consumo del país, unos 600.000 gigavatios hora al año, comprobaremos que todas esas instalaciones apenas proporcionarían energía a la nación durante media hora. Por tanto, jamás bastarán para acompañar oferta y demanda durante un desfase de varios días.

El problema con el hidrobombeo radica en sus dificultades para aplicarlo a gran escala, dada la dificultad para encontrar emplazamientos adecuados en los que levantar este tipo de centrales [véase «Centrales eléctricas reversibles de muro circular», por Matthias Popp; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2012]. No obstante, presentan una eficiencia muy elevada, ya que por lo general recuperan entre el 75 y el 80 por ciento de la energía invertida. Además, forman parte de las técnicas de almacenaje más económicas.

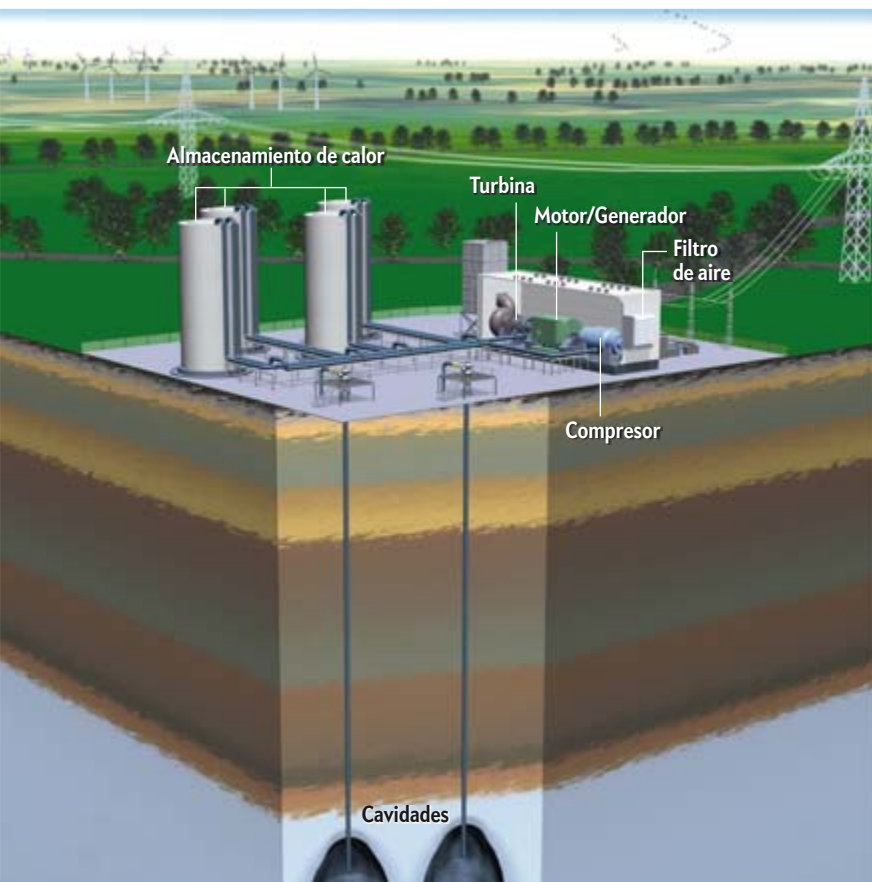
Otro método mecánico de almacenamiento lo proporcionan los depósitos de aire comprimido. En estas instalaciones, la electricidad sobrante se emplea para introducir aire en cavidades herméticas subterráneas y elevar su presión hasta los 70 bares. Después, el depósito se abre, el gas escapa a gran velocidad y, a su paso, acciona una turbina de gas. En todo el mundo, existen dos grandes instalaciones de este tipo en funcionamiento: una en la ciudad alemana de Huntorf y otra en Alabama. La cantidad de energía almacenada depende del tamaño de las cavidades subterráneas y de la presión del aire. En un depósito de cientos de miles de metros cúbicos de volumen pueden almacenarse varios gigavatios hora.

Si el calor generado durante la compresión no se almacena para calentar después el aire en expansión (a fin de que este no se enfríe demasiado en el proceso), el rendimiento de la técnica se ve mermado de manera considerable. Sin embargo, este modo de operación, denominado funcionamiento adiabático, resulta complicado de implementar. Las centrales de Huntorf y Alabama no lo incorporan, por lo que su eficiencia se limita al 40 y al 54 por ciento, respectivamente. Para un depósito adiabático, los expertos calculan un rendimiento teórico del 70 por ciento, si bien subsisten dudas sobre las posibilidades de llevarlo a la práctica.

En comparación con las centrales hidroeléctricas reversibles, las de aire comprimido presentan una gran ventaja: apenas perturban el paisaje, pues tan solo el edificio de turbinas y, en su caso, el sistema de almacenamiento de calor, asoman a la superficie. Cabe esperar que las futuras instalaciones de este tipo sufran menos problemas de autorización que las grandes instalaciones de hidrobombeo. Existen otros sistemas de almacenamiento mecánicos, como los volantes de inercia. Estos, sin embargo, solo acumulan pequeñas cantidades de energía y arrostran pérdidas considerables a causa de la fricción, por lo que su uso se limita a estabilizar la red.

### ALMACENAMIENTO TÉRMICO

En general, transformar el calor en otras formas de energía implica pérdidas notables. El ciclo de Carnot impone un límite máximo a la eficiencia de cualquier máquina térmica que tome calor de un foco caliente y lo ceda a uno frío. Ese rendimiento óptimo viene dado por  $\eta = 1 - T_f/T_c$ , donde  $T_f$  denota la temperatura del foco frío y  $T_c$ , la del caliente (ambas en grados Kelvin). Así, cuanto menor sea la diferencia de temperaturas, menos eficiente será la transformación de calor en cualquier otra



**Esquema de una central de aire comprimido.** Los excedentes de producción energética se usan para bombear aire hacia cavidades subterráneas. Durante los picos de demanda, el aire se evacua y, en su camino de salida, acciona generadores. La eficiencia del sistema aumenta si el calor liberado durante la compresión se almacena temporalmente y se reinyecta durante la descarga.

metros cúbicos que suministra calor a unos 300 hogares y que, durante el verano, se calienta gracias a 2900 metros cuadrados de paneles solares. También en viviendas unifamiliares podría aplicarse este principio: un aljibe de agua bien aislado y de unos 150 metros cúbicos bastaría para satisfacer las necesidades de una casa construida de acuerdo con los estándares modernos de aprovechamiento energético.

Un método alternativo lo proporciona la hidrogenación y deshidrogenación de zeolitas, silicatos porosos que, entre otras aplicaciones, se emplean en los intercambiadores iónicos, en los procesos de desecación y como catalizadores. Estos materiales se deshidratan a temperaturas elevadas, las cuales pueden alcanzarse con paneles solares. Si, más tarde, entran en contacto con aire húmedo, vuelven a absorber agua y liberan calor. Su capacidad de almacenamiento asciende a unos 0,3 kilovatios hora por kilogramo. Para calentar una vivienda se necesitarían unos 20 metros cúbicos de zeolita. Dado que se trata de un sistema de almacenamiento que

opera con calor latente —y, por tanto, a temperatura constante—, podría prescindirse de los costosos sistemas de aislamiento térmico.

Las grandes instalaciones de almacenamiento térmico, con una capacidad de varios gigavatios hora, han hecho posible que las centrales solares contribuyan a la carga base de la red (la cantidad mínima de energía que las compañías deben suministrar). En la central granadina de Andasol, que opera con espejos cilindroparabólicos, la luz solar se focaliza para calentar 28.500 toneladas de sal fundida (una mezcla de nitrato sódico y potásico) a unos 400 grados Celsius. Durante la noche, la sal se deja enfriar hasta los 300 grados; el calor liberado en el proceso se usa para vaporizar agua y propulsar turbinas generadoras de electricidad. La cantidad de energía térmica almacenada en la sal fundida asciende al gigavatio hora. En torno al 37 por ciento de dicha cifra puede transformarse en electricidad.

En principio, las instalaciones termosolares podrían emplear también almacenes de calor latente. Una posibilidad adecuada para operar a temperaturas de entre 300 y 500 grados Celsius (las alcanzadas en las centrales cilindroparabólicas) nos la proporciona la hidrogenación y deshidrogenación de magnesio, un proceso investigado hace ya varios años por nuestro grupo del Instituto Max Planck para la Investigación del Carbón. Al reaccionar con el hidrógeno, el magnesio libera calor. Por su parte, el hidruro correspondiente se disocia en magnesio e hidrógeno a temperaturas de entre 300 y 500 grados Celsius (la temperatura exacta depende de la presión del hidrógeno).

Esa reacción permite almacenar 0,9 kilovatios hora por kilogramo de magnesio. Para alcanzar una capacidad térmica equiparable a la de la central de Andasol bastarían, en lugar de

forma de energía. Además, el rendimiento de una máquina real suele resultar considerablemente menor que el límite teórico impuesto por el ciclo de Carnot. Por ello, la energía calorífica que más tarde deba usarse como tal también debería almacenarse, a fin de evitar las pérdidas asociadas a todo proceso de transformación.

Un almacén calorífico puede operar con calor sensible o con calor latente. En el primer caso, la entrega de calor se invierte en elevar la temperatura del material de almacenamiento, como ocurre cuando ponemos un recipiente con agua líquida al fuego. Tales almacenes se benefician de una constitución muy simple, pero necesitan un buen aislamiento térmico para limitar las pérdidas. Por otro lado, cuando se suministra calor a un cuerpo y este se incorpora en forma de calor latente, la energía aportada induce un cambio de fase o una reacción química en el medio, pero la temperatura de este permanece constante. La fusión del hielo de agua o la hidrogenación del magnesio aportan ejemplos de este tipo de proceso. El inconveniente de estos almacenes reside en que suelen resultar más difíciles de manejar y controlar.

Un buen material para el almacenamiento térmico es el agua, debido a su elevada capacidad calorífica (4,2 julios por gramo y grado Kelvin, frente a los 0,9 del hormigón o los 2,1 de un aceite térmico típico). Ello implica que, con cambios de temperatura modestos, pueden almacenarse cantidades considerables de energía. Cabe citar el ejemplo del Parlamento Federal alemán, cuyo sistema de calefacción aprovecha el calor sobrante de una central térmica, transportado por conductos de agua emplazados a 300 metros de profundidad. La urbanización muniquesa de Ackermannbogen cuenta con un depósito de agua de 5700

28.500 toneladas de sal fundida, unas 1100 toneladas de magnesio, lo que implicaría un coste cinco veces menor. Sin embargo, se necesitaría infraestructura adicional para el hidrógeno. Ello podría lograrse incorporando a la central otra instalación solar que, por medio de un proceso termoquímico, proporcionase directamente el hidrógeno.

#### ALMACENAMIENTO ELECTROQUÍMICO

Los dispositivos electroquímicos pertenecen a los sistemas de almacenamiento más conocidos. Las baterías de iones de litio son hoy comunes en teléfonos móviles, ordenadores portátiles e incluso vehículos eléctricos, y cabe esperar que su presencia continúe aumentando durante los próximos diez años. Una gran ventaja de estos dispositivos reside en su alta eficiencia: en función de las corrientes de carga y descarga (las corrientes pequeñas resultan muy eficientes, pero conllevan largos períodos de carga) puede recuperarse más de un 90 por ciento de la energía almacenada.

Una batería típica de iones de litio posee un ánodo de grafito, entre cuyas capas se almacena el litio, y un cátodo de óxido de cobalto. El primero desprende iones de litio que, dotados de carga positiva, circulan por el líquido de la batería hasta el cátodo. El electrón liberado permanece en el ánodo, por lo que, si este se conecta al cátodo mediante un circuito externo, se crea

una corriente eléctrica. Cuando los electrones que la componen llegan al cátodo, cada uno de ellos se incorpora a un ion de cobalto con cuatro cargas de signo positivo, el cual se combina después con el litio para formar óxido de litio y cobalto. Si se aplica un voltaje externo, este proceso se invierte y la batería se recarga. El voltaje de estos dispositivos asciende a 3,6 voltios.

Una batería de iones de litio almacena 0,2 kilovatios hora por kilogramo, la mayor densidad energética de todas las baterías recargables. En el caso de las células interconectadas empleadas en los coches eléctricos la densidad de almacenamiento resulta algo más baja. Estos vehículos consumen unos 0,15 kilovatios hora por kilómetro, por lo que, para obtener una autonomía de 500 kilómetros (el límite inferior para un motor de combustión con el depósito lleno), se necesitaría una batería de media tonelada incluyendo los componentes necesarios. La única manera de reducir este peso de manera apreciable implicaría aumentar la densidad energética de las baterías, algo que por el momento no parece posible. Más de la mitad de la masa de la batería reside en el cátodo, el cual se compone de óxidos de metales de transición u otras sustancias de peso elevado. No se prevé que aparezcan materiales mucho más ligeros que puedan desempeñar esa función. Por otro lado, las pilas de metal y aire poseen densidades de almacenamiento mayores, pero no pueden recargarse. En la actualidad se está investigan-

SOLAR MILLENNIUM AG



**El complejo termosolar de Andasol**, en Granada, almacena el calor generado durante las horas de luz en depósitos de sal fundida (*marrón*). Durante la noche, esta se emplea para generar energía eléctrica.

**Los vehículos eléctricos** podrían servir a modo de almacenes móviles de la red y contribuir así a amortiguar los picos en la generación de electricidad.



do de manera intensiva la posibilidad de recargar estas y otras pilas, como las de litio y azufre. Es cuestionable que tales sistemas lleguen a resultar prácticos; en su caso, aún harán falta años de investigación, si no décadas.

Aunque los vehículos eléctricos tienen sus limitaciones, ofrecen nuevas posibilidades no solo como reemplazo de los coches de combustión, sino también como almacenes móviles descentralizados de la red eléctrica. En Alemania hay unos 42 millones de vehículos que, durante la mayor parte del día, permanecen aparcados. Si cada uno dispusiese de una batería eléctrica con una capacidad de 75 kilovatios hora, en conjunto sumarían 3150 gigavatios hora, unas 80 veces más que todas las centrales de hidrobombeo del país. Por supuesto, no toda esa capacidad podría emplearse como almacén energético de la red, puesto que la función primordial de un automóvil es servir al transporte. Dado que tampoco se conoce a ciencia cierta hasta qué punto los ciclos reiterados de carga y descarga disminuyen la vida útil de las baterías, estas solo se cargarían durante los excedentes de producción, pero no se conectarían a la red en los momentos de déficit. Con todo, un buen número de vehículos eléctricos podría contribuir de manera significativa a suavizar los picos de producción y a estabilizar así la red de suministro.

También las grandes baterías estacionarias deberían ayudar a estabilizar la red. Las de iones de litio resultan aún demasiado caras, pero actualmente se trabaja en el desarrollo de técnicas más asequibles. Los sistemas de almacenamiento con una capacidad de varios cientos de megavatios hora podrían ayudar a superar las temporadas de calma en los parques eólicos, así como las épocas de mal tiempo en las instalaciones fotovoltaicas. En Japón y EE.UU. ya se usan baterías de sodio y azufre, así como baterías de flujo redox. En las primeras, el sodio y el azufre reaccionan para formar sulfuro de sodio. Para ello ambas sustancias deben estar fundidas, por lo que el dispositivo necesita operar a entre 300 y 350 grados Celsius. Mantener dicha temperatura requiere un aporte continuo de energía, razón por la que no resultan adecuadas para el almacenamiento de larga duración.

Las baterías de flujo redox se basan en procesos de oxidación-reducción en soluciones de electrolitos. Las más conocidas son las de zinc y bromo, así como las de vanadio, ambas disponibles en el mercado. Esta última cuenta con dos depósitos con soluciones de electrolitos: uno contiene iones de vanadio con dos cargas positivas ( $V^{2+}$ ); el otro, con cinco cargas positivas ( $V^{5+}$ ). Para obtener energía eléctrica, en un electrodo se oxida el  $V^{2+}$  a  $V^{3+}$ , mientras que en el otro el  $V^{5+}$  se reduce a  $V^{4+}$ , de manera que se crea una diferencia de potencial entre los electrodos. En el proceso de carga de la batería, tiene lugar la

reacción inversa. La superficie de los electrodos determina la potencia, mientras que la capacidad de almacenamiento depende del tamaño de los depósitos. Estos dispositivos se muestran relativamente robustos, si bien presentan una densidad de almacenamiento muy baja, del orden de decenas de vatios hora por kilogramo.

En conjunto, las baterías forman parte de las técnicas de almacenaje más investigadas y con un abanico de aplicaciones más amplio. Cabe esperar progresos notables en este campo durante los próximos años, tanto en lo que se refiere al rendimiento como al coste de estos dispositivos.

#### **DEL HIDRÓGENO A LA GASOLINA**

En sentido estricto, por «almacén químico» entendemos un compuesto cuyas moléculas encierran grandes cantidades de energía en sus enlaces. Dada su gran estabilidad, tales sustancias se muestran especialmente indicadas para almacenar energía durante largos períodos de tiempo, lo que abre las puertas a la posibilidad de emplearlos como depósitos estacionales. En estos momentos se investigan, sobre todo, cinco sustancias: hidrógeno, metano, metanol, etanol y mezclas de hidrocarburos líquidos, entre los que se encuentran la gasolina y el diésel.

El hidrógeno es considerado un vector (portador) energético muy prometedor, ya que presenta una densidad de almacenamiento enorme (33,3 kilovatios hora por kilogramo), no es tóxico y, como residuo de la combustión, deja agua pura. No obstante, adolece de inconvenientes: debido a su carácter gaseoso, incluso a altas presiones muestra una densidad energética moderada con relación a su volumen; además, no se obtiene como tal de la naturaleza, sino que debe generarse por medios artificiales, como la electrólisis (la descomposición del agua por medio de una corriente eléctrica). De momento, el ciclo completo de transformación de energía eléctrica en hidrógeno y este de nuevo en electricidad muestra unas pérdidas de hasta el 70 por ciento. Por otro lado, los sistemas de electrólisis resultan caros, por lo que aprovechar de esta manera los excedentes de producción acarrearía costes elevados.

El hidrógeno puede también obtenerse mediante otros procesos, si bien estos se encuentran aún en estado de desarrollo. En principio, las instalaciones solares de torre central podrían alcanzar temperaturas lo bastante elevadas como para descomponer el óxido de zinc en sus elementos constituyentes. Después, el zinc reaccionaría con agua para formar óxido de zinc e hidrógeno, con lo que se habría generado un ciclo cerrado de reacciones. También se están investigando algas que producen hidrógeno en su metabolismo, si bien las aplicaciones técnicas de estos procesos se muestran inciertas. También la descompo-

sición directa del agua por fotocatalisis se encuentra aún en la etapa de investigación básica.

Lo que sí parece viable es el almacenamiento de hidrógeno en grandes cantidades; por ejemplo, en almacenes subterráneos de alta presión. La cueva de Clemens Dome, en Texas, que forma parte de una unión de refinerías, cuenta con una capacidad de 580.000 metros cúbicos y puede almacenar hidrógeno a una presión de hasta 100 bares. En teoría, las pérdidas por fugas apenas llegan al 0,01 por ciento al año, por lo que la energía interna del depósito asciende a unos 170 millones de kilovatios hora, a partir de los cuales se podrían obtener 85 millones de kilovatios hora de energía eléctrica. Por el momento no existen ni las turbinas de gas para el funcionamiento con hidrógeno puro ni las células de combustible para su operación a gran escala, pero tales sistemas parecen factibles.

Más difíciles de llevar a la práctica resultan los depósitos de hidrógeno para automóviles. En su caso, estos podrían constituir, junto con las pilas de combustible, una alternativa a los motores de combustión. Los almacenes a 700 bares de presión ofrecen las mejores perspectivas, pero su densidad de almacenamiento se muestra aún insuficiente.

El metano, el componente principal del gas natural, presenta una densidad de almacenamiento por unidad de masa menor que la del hidrógeno. Sin embargo, en estado gaseoso su densidad por unidad de volumen resulta tres veces mayor. Además, la infraestructura no plantearía problemas, pues ya existen grandes redes de distribución de gas natural, así como almacenes subterráneos. El metano puede obtenerse a partir de la reacción del hidrógeno con el monóxido o el dióxido de carbono. Su eficiencia energética resulta menor que la del hidrógeno, pero sus defensores argumentan que parte de las emisio-

nes de dióxido de carbono actuales podrían tratarse con hidrógeno obtenido de manera regenerativa para producir metano, metanol o hidrocarburos líquidos. Sin embargo, cada uno de estos procesos muestra un balance de dióxido de carbono negativo, ya que el hidrógeno necesario siempre podría emplearse para generar energía eléctrica, sin las emisiones derivadas de la quema de los combustibles mencionados.

Más atractiva se muestra la conversión de biomasa en gas con contenido en metano, si bien ello requiere asegurarse de que el metano no escape de las instalaciones de biogás, ya que su efecto invernadero resulta 25 veces mayor que el del dióxido de carbono. Con turbinas de gas y vapor, el metano puede transformarse en electricidad con una eficiencia energética de hasta el 60 por ciento, con posibilidades para aprovechar el calor emitido en el proceso. También las pilas de combustible con electrolito sólido permiten obtener energía eléctrica a partir del metano; hoy por hoy, sin embargo, la eficiencia de estos dispositivos resulta inferior a la de las turbinas.

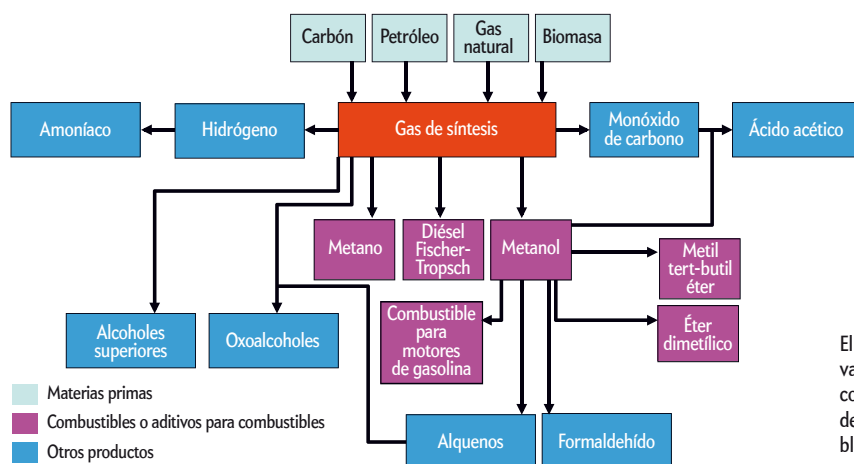
El metanol posee también cualidades prometedoras como almacén energético. Se trata de un líquido fácil de manejar y que puede producirse sin grandes complicaciones a partir de gas de síntesis. Este, a su vez, se obtiene a partir de combustibles fósiles o biomasa. El metanol puede usarse tanto en motores de combustión como en centrales eléctricas, si bien presenta ciertas desventajas con respecto a otros almacenes químicos. En primer lugar, para producirlo se requiere hidrógeno, el cual siempre podría emplearse como medio de almacenaje más eficiente. Por otro lado, casi no existe infraestructura para su distribución y aprovechamiento. En tercer lugar, su densidad de almacenamiento se muestra considerablemente menor que la de otros vectores energéticos líquidos, como los hidrocarburos

## GAS DE SÍNTESIS

# El «chico para todo» de la química del carbono

El gas de síntesis consta de una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. Se produce cuando el vapor de agua reacciona a altas temperaturas con compuestos químicos ricos en carbono, como carbón, petróleo, gas natural o biomasa. La proporción de hidrógeno depende de la sustancia empleada: con gas natural, la mezcla resultante contiene tres veces más hidrógeno que monóxido de carbono; con carbón, ambos compuestos se obtienen a partes iguales.

El gas de síntesis permite elaborar sustancias diversas, como metano (con ayuda de catalizadores de níquel), metanol (con catalizadores de cobre y óxido de zinc) o hidrocarburos superiores (con catalizadores de cobalto y hierro, en un proceso de Fischer-Tropsch). Con metanol pueden obtenerse alquenos, útiles en la fabricación de plásticos. El gas de síntesis sirve también como punto de partida para elaborar compuestos de elevado contenido energético, aptos para el almacenaje químico de larga duración.



El gas de síntesis, que se obtiene a partir de vapor de agua y compuestos ricos en carbono, constituye el punto de partida en la elaboración de diversas sustancias; entre otras, combustibles benignos con el clima.

que pueden obtenerse a partir de gas de síntesis. Por último, es venenoso.

El primer alcohol superior, el etanol, ya se emplea a gran escala como almacén químico de energía. Se obtiene con facilidad a partir de la fermentación de biomasa, si bien la plantación de cultivos para la fabricación de etanol compite con la producción alimentaria, una circunstancia que ha originado crudos conflictos por la explotación de la tierra [véase «Energía y producción alimentaria», por Duncan Graham-Rowe; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2012]. Otro tanto cabe decir del biodiésel obtenido mediante transesterificación o hidrogenación de aceites vegetales.

El etanol goza de una densidad energética un 30 por ciento mayor que la del metanol; además, puede agregarse sin problemas a la gasolina para motores de combustión. Para poder emplearlo en centrales eléctricas, sin embargo, estas deberían remodelar su infraestructura, por lo que probablemente acaben imponiéndose otras alternativas. Con todo, si el bioetanol pudiera obtenerse de manera sostenible y sin detrimento de la producción alimentaria, adquiriría un claro interés como combustible para el transporte.

Por último, existe la opción de conservar la infraestructura actual para gasolina y diésel, y producir estos hidrocarburos a partir de fuentes renovables. Gracias al proceso de Fischer-Tropsch, descubierto hace 90 años en el instituto Max Planck para la Investigación del Carbón, puede obtenerse diésel de alta calidad a partir de gas de síntesis. Existen otros métodos que también permiten generar mezclas de hidrocarburos similares a la gasolina a partir de gas de síntesis, pasando por la producción intermedia de metanol. Si el gas de síntesis procede de biomasa, los combustibles resultantes serían benignos para el clima, ya que el carbono que emitirían habría sido retirado previamente de la atmósfera durante la fotosíntesis de los cultivos de origen. Además, la técnica aprovecharía la parte leñosa (no comestible) de las plantas, por lo que no competiría con la industria alimentaria. El contenido energético de la biomasa que puede transformarse en combustible mediante la producción previa de gas de síntesis asciende a un 40 por ciento. Ya existen algunas plantas piloto en funcionamiento, como la del Instituto de Tecnología de Karlsruhe o la de la empresa Choren, de Friburgo.

Cabe esperar que los hidrocarburos líquidos continúen desempeñando un papel central debido a su elevada densidad energética. El tráfico aéreo y el de camiones pesados dependen de ellos. Para los próximos decenios aún hay suficientes materias primas fósiles, pero en un futuro más lejano los hidrocarburos generados a partir de biomasa irán ganando terreno. Las primeras pruebas de producción regenerativa de este tipo de combustibles ya se han llevado a cabo con éxito, tanto en la aviación militar como en la civil.

### UN MEDIO PARA CADA FIN

El suministro energético del futuro dependerá de varias técnicas de generación, por lo que igualmente variados deberán ser nuestros sistemas de almacenamiento. Parece probable que el sector del automóvil se decante por los hidrocarburos líquidos y las baterías eléctricas. Que las pilas de combustible de hidrógeno acaben imponiéndose a las anteriores dependerá de la eficiencia y coste del proceso de obtención del hidrógeno.

Los almacenes térmicos, en combinación con las centrales termosolares, podrían equilibrar las fluctuaciones de poca duración de la generación eólica y fotovoltaica. También las cen-

trales hidroeléctricas reversibles, los depósitos de aire comprimido y las grandes baterías estacionarias se acomodan bien a tal fin: pueden mantener sus reservas de energía durante el plazo de varios días o incluso semanas, con una capacidad del orden del megavatio o el gigavatio hora.

En lo que se refiere al almacenamiento estacional de energía, por el momento solo cabe considerar, aparte de grandes embalses, los almacenes químicos. Hoy por hoy, el hidrógeno y el metano se erigen como los candidatos más prometedores. El metano puede obtenerse de manera eficiente a partir de biomasa, siempre que esta no se necesite para la producción de combustible líquido. Puede que el etanol cobre protagonismo en algunas zonas. Si resultase viable descomponer la lignocelulosa a bajo coste y aprovechar así la parte leñosa de las plantas, el metano y el etanol podrían obtenerse en grandes cantidades [véase «Biocombustibles de segunda generación», por Katharine Sanderson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2012]. Algunos ámbitos, como el tráfico aéreo y el de vehículos pesados, seguirán necesitando hidrocarburos semejantes a la gasolina o el diésel. El proceso Fischer-Tropsch permite obtenerlos de manera regenerativa a partir de biomasa.

Los sistemas de calefacción seguirán su propio curso. En las construcciones nuevas el problema será cada vez menor, puesto que las continuas mejoras en el aislamiento térmico de los edificios harán que cada vez se requiera menos energía para calentarlos. En un futuro, la regulación de temperatura de los espacios interiores posiblemente se beneficie mucho más que hasta ahora de los almacenes térmicos que «repostan» durante el verano. Las bombas de calor o los calefactores eléctricos podrían cubrir picos de demanda ocasionales.

En general, podemos concluir que cualquier modelo energético futuro basado en fuentes renovables producirá, sobre todo, corriente eléctrica. Dado que en todo proceso de transformación se sufren pérdidas, la electricidad generada deberá usarse directamente en la mayor medida posible. Para ello harán falta redes de transporte eficientes que, en un caso ideal, abarquen extensiones continentales [véase «Por una red eléctrica intercontinental», entrevista a Gregor Czisch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2012]. Cuanto mayor sea la superficie cubierta por la red de transporte, con mayor facilidad podrán equilibrarse los déficits de una zona con los excedentes de otra sin necesidad de recurrir al almacenaje energético.

Con una mezcla de técnicas, redes de transporte y sistemas de almacenamiento bien coordinados, deberíamos poder abastecernos de electricidad incluso sin combustibles fósiles. En todo caso, la energía será más cara que hoy: al quemar carbón, petróleo y gas natural, estamos recuperando parte de la energía que el sol ha estado depositando sobre la biomasa del planeta durante millones de años. Una vez consumida esta herencia, el esfuerzo para obtener energía aumentará y, con ello, el precio que habremos de pagar.

© Spektrum der Wissenschaft

PARA SABER MÁS

Chemische und physikalische Lösungen für die Speicherung von Wasserstoff. U. Eberle et al. en *Angewandte Chemie*, vol. 121, págs. 6732-6757, 2009.

Hydrolysis of cellulose as the entry point into biorefinery schemes. R. Rinaldi y F. Schüth en *ChemSusChem*, vol. 2, págs. 1096-1107, 2009.

Chemical compounds for energy storage. F. Schüth en *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 83, págs. 1984-1993, 2011.

Atrapar el viento. Davide Castelvecchi en *Investigación y Ciencia*, n.º 427, abril de 2012.