

Energías renovables para todos

Hidrógeno

y pila de combustible



Energías
renOVables



Fundación de
la Energía de
la Comunidad
de Madrid

EM 2007
La Suma de Todos
Comunidad de Madrid

Hidrógeno y pila de combustible

Paloma Asensio



HIDRÓGENO, ¿EL SUSTITUTO DEL PETRÓLEO?

"Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la que el carbón no es capaz [...]
El agua será el carbón del futuro"

Julio Verne, "La isla misteriosa" (1874)

De esta manera respondía el ingeniero Cyrus Harding, personaje de la novela de Julio Verne *La isla misteriosa*, a la pregunta sobre lo que ocurriría si se agotara el carbón. De esto hace ya más de un siglo, pero parece que, como en otras ocasiones, el tiempo acabará dando la razón al escritor; tan amigo de imaginar el futuro. Tema de incontables artículos en revistas científicas, protagonista de congresos internacionales y noticia cada vez más habitual en periódicos de medio mundo, el hidrógeno ha seducido, entre otros muchos, a investigadores, presidentes de grandes multinacionales y hasta líderes políticos como George Bush o Romano Prodi, que ven en él al sustituto del petróleo, el carbón de nuestros días.

Los científicos, sin embargo, advierten que el agua no puede ser el carbón del futuro. Por algo que debería ser obvio y, aun así, parece que no lo es tanto: que el agua no es un combustible que pueda quemarse directamente en un motor o alimentar una pila de combustible, sino sólo la materia prima de la que, con un aporte de energía, puede extraerse el hidrógeno; y que, por tanto, el hidrógeno, que sí es un combustible, no es una fuente primaria de

© Hubble Heritage Team/NASA

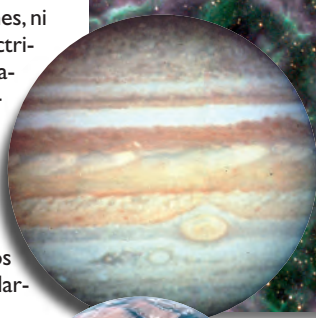
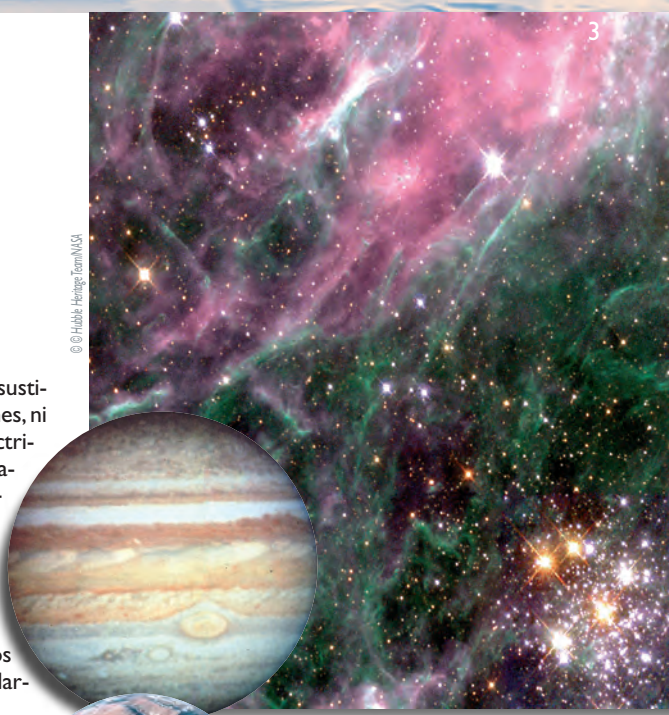
energía. Por eso el hidrógeno nunca podrá sustituir ni al petróleo que mueve nuestros coches, ni al carbón que quemamos para producir electricidad, ni al gas natural que nos calienta, ni a nada. Por no mencionar que, hoy por hoy, el hidrógeno se produce fundamentalmente a partir de los mismos recursos naturales y fuentes de energía de los que se supone sustituto. Aun así, la pareja formada por el hidrógeno y la pila de combustible se perfila como parte importante de la solución a los problemas energéticos del mundo a medio-largo plazo. Pero sólo parte.

¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO?

Incoloro, inodoro y no tóxico, el gas hidrógeno es el más sencillo de todos los elementos. El átomo de hidrógeno común está formado sólo por un protón y un electrón. Como no tiene neutrones —las partículas sin carga pero con masa que mantienen unidos los protones en el núcleo— es también el elemento más ligero de todos, casi 15 veces más que el aire.

Responsable del brillo de las estrellas y fuente de la energía que recibimos de la que tenemos más cerca, el Sol, el hidrógeno es, además, el elemento más abundante del Universo: las tres cuartas partes de la materia cósmica son hidrógeno, que podríamos utilizar como combustible si estuvieran a nuestro alcance. Pero no lo están. Júpiter, la acumulación de hidrógeno que tenemos más cerca, se halla a millones de kilómetros de la Tierra, demasiado lejos para un planeta que todavía está intentando viajar a Marte.

Afortunadamente para los que la habitamos, el elemento más abundante de la corteza terres-



El hidrógeno es el elemento más abundante del Universo.
Júpiter es básicamente hidrógeno.
En la Tierra el hidrógeno aparece formando parte de muchos compuestos, entre ellos el agua, que constituye más del 70% de nuestro planeta.

En la página anterior, el Nebus, precursor de los autobuses de hidrógeno que circulan por Madrid y Barcelona. Presentado en 1997, demostró su viabilidad en las ciudades de Oslo, Hamburgo, Perth, Melbourne, Ciudad de México y Sacramento.

El hidrógeno en números

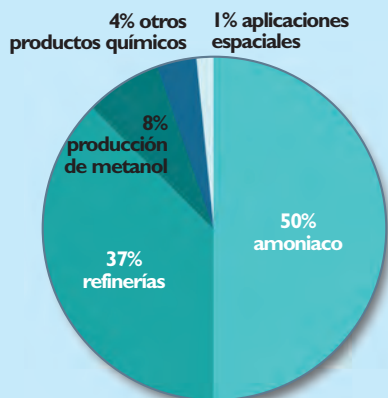
■ Densidad:	0,0899 kg/Nm ³ (gas) 0,0708 kg/l (líquido)
■ Poder calorífico:	inferior: 120 MJ/kg superior: 141,86 MJ/kg
■ Límites de inflamabilidad*:	4,0 - 75,0 %
■ Límites de detonación:	18,3 - 59,0 %
■ Coeficiente de difusión:	0,61 cm ² /s

* concentración de H₂ en aire

Fuente: ARIEMA Energía y Medio Ambiente (www.ariema.com)

Un viejo conocido de la industria química

En el mundo se producen cada año alrededor de 50 millones de toneladas de hidrógeno. Sin embargo, sólo una mínima parte de ese hidrógeno se utiliza para producir energía, principalmente en aplicaciones espaciales. Casi la mitad se emplea para elaborar fertilizantes basados en amoníaco. También se utiliza hidrógeno en la fabricación de metanol y el agua oxigenada, así como para "hidrogenar" los aceites orgánicos comestibles derivados de la soja, los cacahuetes, los cereales y el pescado, además de para refrigerar motores y generadores. Pero quien conoce bien al hidrógeno es la industria petroquímica, que lleva años utilizándolo como materia prima de una amplia gama de productos derivados del petróleo y para reducir la cantidad de partículas, aromáticos y sobre todo azufre presentes en la gasolina y el gasóleo. La utilización del hidrógeno como combustible abre a la industria del petróleo las puertas de un nuevo mercado, en el que, junto a las empresas especializadas en la producción y el suministro de gases, ocuparán un lugar privilegiado, por lo menos al principio.



Fuente: Fundación Bellona/AIE



© NASA

tre no es el hidrógeno, sino el oxígeno, seguido por el silicio, el aluminio, el hierro y el calcio. Y, lo más importante, en la Tierra prácticamente no existe hidrógeno en estado libre. Y es que es tan ligero que casi podríamos decir que no pesa: la fuerza de gravedad de nuestro planeta no puede retener un elemento con una masa tan insignificante y el poco hidrógeno que se produce de manera natural —por ejemplo, el que contienen los gases volcánicos— se escapa rápidamente hacia la atmósfera. Eso no quiere decir que en la Tierra no haya hidrógeno, como sabemos.

¿DE DÓNDE SE OBTIENE?

Además de en el agua —de la que forma parte en una proporción del 11,19 % en peso— y de otros muchos compuestos químicos, como los ácidos o los alcoholes, el hidrógeno, esencial para la vida, forma parte de toda la materia orgánica, incluidas las personas, que somos un 10% hidrógeno. Hay hidrógeno, por tanto, en la biomasa y el biogás; pero, sobre todo, en la biomasa y el biogás de hace millones de años, que hoy quemamos en forma de carbón, petróleo y gas natural. Rompiendo los enlaces de las moléculas que lo contienen mediante diferentes tecnologías, se consigue producir hidrógeno y, una vez almacenado y transportado, utilizarlo como combustible o en otras aplicaciones.

¿CÓMO SE PRODUCE?

Desde el siglo XIX el hombre sabe cómo separar el hidrógeno y el oxígeno que forman el agua aplicando una corriente eléctrica. El proceso se llama,

Los transbordadores espaciales almacenan 1.991.071 l de combustible en un enorme tanque externo desechable, que suministra H_2 y O_2 líquidos a presión a los tres motores principales de la nave durante los 8,5 primeros minutos de vuelo. En el lanzamiento se queman más de 240.000 l de H_2 y O_2 por minuto.

Un poco de historia



En 1766 el científico británico Henry Cavendish identifica el hidrógeno como algo diferente del oxígeno y describe el agua como un compuesto de estos dos gases. En 1785, Antoine Lavoisier repite el experimento y da al "aire inflamable" de Cavendish el nombre por el que le conocemos hoy: hidrógeno, que significa en griego "generador de agua".



Menos de 10 años después los militares franceses construirían el primer generador de hidrógeno con el fin de utilizar el gas en globos de reconocimiento.

El hidrógeno comenzó a ser utilizado por la aviación en los años 20, cuando los alemanes decidieron utilizarlo como combustible secundario de los zeppelin que cruzaban el Atlántico. Hasta entonces el hidrógeno servía sólo para mantener la fuerza de ascensión de dirigibles y globos. La historia acabó en 1937, cuando el tristemente célebre Hindenburg se incendió justo antes de aterrizar en Nueva Jersey (EEUU), en medio de una tormenta eléctrica, con un centenar de personas a bordo. Aunque 34 de los 36 fallecidos murieron al arrojarlos por la borda aterrorizados y no



En 1997 Addison Bain, un científico de la NASA jubilado, hizo publicas las conclusiones de varios años de investigación sobre el accidente del Hindenburg: para aumentar la resistencia de la lona de algodón del zeppelin se había aplicado a ésta un compuesto que contenía, entre otras sustancias, polvo de aluminio, un material altamente inflamable e inextinguible. Las conclusiones de Bain exculpan definitivamente al hidrógeno, pero el daño a su imagen, causado por 60 años de asociación a la tragedia, todavía no se ha reparado. Conseguir que la población conozca mejor a un gas inflamable, como todos los combustibles, pero no más peligroso que el resto y trasladar los protocolos de seguridad que han funcionado en la industria durante años a las nuevas aplicaciones del hidrógeno son dos de los principales retos a los que se enfrentan los expertos.

quemados, aunque en los primeros momentos las llamas eran anaranjadas y no de un tenue azul como son las del hidrógeno, aunque ni uno solo de los supervivientes había percibido el olor a ajo que se utilizaba para poder detectar un escape de hidrógeno, el mundo culpó de la tragedia al inflamable hidrógeno.

Hasta los 50 ingleses y alemanes experimentaron con su uso en los motores de explosión de coches, camiones, locomotoras y hasta submarinos... Pero el hidrógeno ya tenía su leyenda negra. La segunda oportunidad llegó en 1973, con la crisis del petróleo, época en que los gobiernos dedicaron millones a la investigación en el potencial "sustituto del petróleo". Pero la crisis pasó.... Afortunadamente, en países como Canadá, EEUU, Alemania o Japón la industria —y en especial dos sectores, el aeronáutico y el de la automoción— nunca se detuvo. Y, cuando en 1992 el mundo empezó a preocuparse por un nuevo problema ligado al petróleo, el cambio climático, ya teníamos mucho camino andado. Gracias a ellos hoy no partimos de cero.



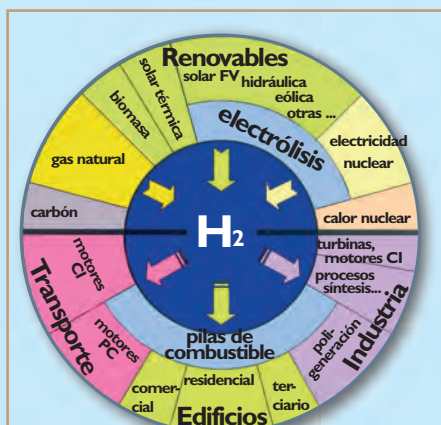


La primera planta comercial de producción de hidrógeno a partir de gas natural se inauguró en 1931. En la foto, una planta de reformado moderna en la ciudad alemana de Brunsbüttel.

como saben hasta los niños, electrólisis y se trata de una tecnología conocida y tan sencilla que forma parte de los experimentos que se realizan en los colegios. La electrólisis, además, es limpia y produce un hidrógeno de gran pureza. Aun así, hoy por hoy sólo el 4% de los 45 millones de toneladas de hidrógeno que se consumen en el mundo cada año se produce a partir del agua, la gran reserva de hidrógeno de la Tierra. El problema es que la electrólisis requiere un aporte considerable de electricidad. Y la electricidad es cara. Sobre todo si procede de una fuente de energía renovable, que es la única manera de garantizar la limpieza del proceso de principio a fin.

La opción más barata a día de hoy es producir hidrógeno a partir de gas natural mediante la igualmente bien conocida tecnología del reformado con vapor, que consiste en romper las moléculas de gas con vapor de agua en presencia de un catalizador. Por eso es el método más utilizado: el 48% del hidrógeno se produce hoy de esta manera. Como, además, es también la opción menos contaminante a partir de combustibles fósiles con la tecnología actual, el gas natural parece el candidato en mejor posición para liderar la producción de hidrógeno en un futuro próximo. Convertir el carbón en gas calentándolo hasta 900°C es la forma más antigua de producir hidrógeno: así es como se obtenía el gas ciudad, que contenía hasta un 60% de hidrógeno. La gasificación de carbón representa hoy el 18% de la producción mundial; y, como el carbón es un recurso abundante en muchas partes del mundo, podría seguir siendo una alternativa si se desarrollan tecnologías limpias. Y, en general, el reformado de todos los hidrocarburos y alcoholes: el 30% del hidrógeno que se consume en el mundo procede de la gasolina. Pero el hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles será siempre poco limpio —en su elaboración se emitirá, cuando menos, CO₂— y nada renovable, por lo que todos los sistemas basados en ellas serán, como mucho, tecnologías de transición.

Sistemas de producción, conversores y aplicaciones



Fuente:
High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells, Comisión Europea

Como las otras ocho ciudades participantes en el programa europeo CUTEJECTOS, Madrid y Barcelona han probado durante dos años tres unidades del autobús Citaro de Mercedes-Benz. El hidrógeno que alimenta la pila de combustible de los autobuses madrileños se produce en la miniplanta de reformado de gas natural que el consorcio esH₂ ha construido en las cocheras de la EMT (foto superior). La hidrogenera que BP ha construido en las instalaciones de TMB en Barcelona (en el centro) cuenta con una marquesina fotovoltaica capaz de generar una pequeña parte de la electricidad que se necesita para llevar a cabo la electrólisis del agua.

¿CÓMO SE PRODUCIRÁ?

Con agua y electricidad de origen renovable, coinciden los expertos. Pero también se investigan otras alternativas. Una posibilidad es la fotoelectrólisis, que básicamente consiste en sumergir en el agua una célula fotovoltaica fabricada con un material semiconductor que hace las veces de electrolizador. Combinando en uno los dos pasos de la electrólisis tradicional, se eliminan costes y se consiguen eficiencias un poco mayores.

Existen, sin embargo, dos tecnologías de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables que no incluyen electricidad, cuyo coste y, por tanto, viabilidad podrían ser interesantes a medio plazo. La primera incluye la gasificación de biomasa, un poco más cara que el reformado de gas, pero rentable donde la biomasa sea abundante y barata; y diferentes tratamientos de los análogos "bio" de los hidrocarburos y alcoholes: biodiesel, biogás y bioetanol.

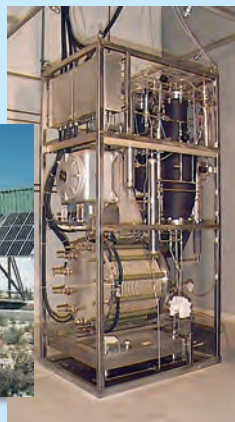


© EMT Madrid



Primera planta española de hidrógeno "solar"

Diseñada, construida, puesta en marcha y evaluada por Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) entre 1991 y 1993, la planta piloto de producción de hidrógeno de "El Arenosillo" (Huelva), utiliza un electrolizador alimentado por la electricidad que producen 144 placas fotovoltaicas de 36 células cada una. A finales de 1993 se instaló una pila de combustible de ácido fosfórico de 10kW, a cuyo sistema se añadió un reformador de metanol, con el fin de evaluar su comportamiento con este combustible. La planta de "El Arenosillo" lleva funcionando sin interrupción desde entonces como banco de pruebas de diferentes tecnologías relacionadas con el hidrógeno y la pila de combustible.



© INTA



La segunda opción es utilizar energía térmica de alta temperatura. Por eso también tiene muchas esperanzas puestas en el hidrógeno la industria nuclear, que trabaja en el desarrollo de nuevos reactores de alta temperatura con los que realizar lo que se conoce como hidrólisis térmica. Porque para separar el agua en hidrógeno y oxígeno sólo con calor hacen falta temperaturas de al menos 2.000 °C, difíciles de alcanzar con energía solar y casi imposibles de manejar. Sin embargo, insertando una cadena de reacciones intermedias, la temperatura se rebajaría a unos 850 °C. Puede que en futuro no tan lejano ésta sea la forma de obtener hidrógeno "bueno, verde y barato" a partir de la energía solar.

Se han propuesto otras formas de obtener hidrógeno más o menos exóticas, desde la producción biológica por medio de microorganismos hasta la llamada electrólisis gravitacional, pero de momento sus resultados son puramente anecdóticos.

¿POR QUÉ HIDRÓGENO?

Para empezar, porque es un buen combustible, capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que cualquier otro combustible conocido: 33,3 kWh por kg, frente a los 13,9 kWh del gas natural o los 12,4 kWh del petróleo, por ejemplo. Se trata también un combustible limpio

a nivel local, que, cuando se quema, lo único que produce, además de energía, es básicamente vapor de agua, librándonos, entre otras, de las emisiones de CO₂, el principal gas de efecto invernadero. Y gracias a la pila de combustible el hidrógeno es, además, un intermediario energético eficiente y tan versátil como la electricidad —que, conviene recordar, tampoco es una fuente de energía, sino un "vector energético", que es como llaman los expertos a estas formas intermedias de la energía, que permiten transportarla y convertirla después en otras formas de energía.

Como todo buen vector energético, el hidrógeno, al igual que la electricidad, puede obtenerse a partir de un amplio abanico de recursos naturales utilizando prácticamente cualquier fuente de energía, con lo que no haría falta importarlo (siempre y cuando en su fabricación se utilizaran recursos y fuentes primarias de energía autóctonas y renovables).

Pero, por encima de todo, el hidrógeno puede almacenarse. Y esta capacidad de servir de almacén de energía, que no tiene la electricidad, es la que da sentido al "despilfarro" energético y económico que, según algunos, supone la transformación de energía eléctrica en hidrógeno cuyo fin es convertirse otra vez en (menos) energía eléctrica; y la que convierte al hidrógeno en el complemento ideal de las

A la izquierda: en el futuro el hidrógeno podría transportarse a través de los gasoductos de la red de gas natural, ligeramente modificados. En Europa ya hay 1.500 km de "hidrogenoductos": el más largo, de 400 km, atraviesa de Francia y Bélgica. En la foto, el usado por la empresa Linde en la planta de Brunsbüttel para suministrar H₂ y CO a Bayer.

La furgoneta Chevy S-10 fabrica el H₂ que alimenta su pila en un reformador interior a partir de gasolina baja en azufre. En abril de 2003 se inauguró en Reykjavik la primera estación comercial de H₂ de Europa. El H₂ es producido in situ a partir de agua y electricidad procedente de la central geotérmica de Nesjavellir (en la foto), situada a 30 km. Islandia espera convertirse en la primera sociedad del mundo basada en el H₂.

energías renovables, especialmente la eólica y la solar, que sólo funcionan cuando sopla el viento y hace sol: en las horas de baja demanda el viento y el sol se utilizarían no para cargar de energía unas aparatosas, contaminantes y siempre insuficientes baterías, sino para producir hidrógeno, que podríamos utilizar después en una pila de combustible para producir electricidad en casa o viajar en un coche "movido por el viento" sin necesidad de instalar un aerogenerador en el techo del vehículo. Con el apoyo del hidrógeno, las renovables se abrirán paso en el sector de la automoción y se convertirán en las (verdaderas) sustitutas del petróleo. Ésa es la idea.

UN ALMACÉN DE ENERGÍA DIFÍCIL DE ALMACENAR

Por las propiedades físicas del hidrógeno, almacenarlo supone todo un reto, sobre todo cuando se trata de hacerlo en un contenedor pequeño, ligero, seguro y barato, como tiene que



Equivalencias caudal de hidrógeno - producción eléctrica*

H ₂ (kg/h)	H ₂ gas (Nm ³ /h)	H ₂ líquido (l/h)	Energía (kWh)
1	11,12	14,12	33,33
0,0899	1	1,270	3,00
0,0708	0,788	1	2,359
0,0300	0,333	0,424	1

*Basadas en poder calorífico inferior

Fuente: ARIEMA

Comparativa hidrógeno - otros combustibles

HIDRÓGENO	GASOLINA	GASÓLEO	GAS NATURAL*	METANO	METANOL
1 kg	2,78 kg	2,80 kg	2,54 -3,14 kg	2,40 kg	6,09 kg
1 litro (líquido)	0,268 litros	0,236 litros	-----	-----	0,431 litros
1 litro (gas) **	0,0965 litros	0,0850 litros	0,3-0,35 litros	0,240 litros	0,191 litros

*dependiendo de la composición del GN ** todos los gases comprimidos a 350 bares

Fuente: ARIEMA



Almacén de energías renovables

El proyecto FIRST, coordinado por el INTA, es un buen ejemplo de las posibilidades del hidrógeno como complemento de la electricidad: ubicadas en lugares alejados de la red, las antenas de comunicación normalmente utilizan paneles fotovoltaicos y baterías, que funcionan un máximo de 4-5 días sin sol; usar la energía solar también para producir hidrógeno y utilizar éste en una pila de combustible cuando no brille el sol incrementa la disponibilidad de la antena a lo largo del año. Con idéntica filosofía, el proyecto RES2H2, pretende instalar en Gran Canaria una planta de producción de hidrógeno a partir de energía eólica, que alimentará después una pila de combustible. El hidrógeno es también una parte importante del plan eólico de Greenpeace, que defiende la instalación, en diferentes puntos de nuestra costa, de 25.000 MW eólicos de aquí al 2030. La instalación de estos miles de megavatios no colapsará la red ni exigirá un excesivo esfuerzo en nuevas infraestructuras eléctricas que den salida a toda esta energía "extra", ya que, como propone Greenpeace, una parte sustancial de la electricidad producida por estos aerogeneradores marinos podría emplearse en producir hidrógeno, que movería el 8% de los vehículos de la España de 2030.

ser el depósito de un coche. Puede parecer extraño, cuando se sabe que un kilo de hidrógeno genera la misma energía que casi tres de gasolina. Sin embargo, ese kilo ocupa mucho volumen, por lo que la cantidad de energía que aporta el hidrógeno por unidad de volumen —su densidad energética— es bajísima. Tan baja que, de utilizar hidrógeno sin "tratar", los coches serían "depósitos con ruedas" o se quedarían sin combustible casi antes de arrancar. Para almacenar 4 kg de hidrógeno, que es la cantidad que consume un coche a pila en una distancia de 400 km, se necesitaría un depósito equivalente a un globo ¡de más de 5 m de diámetro!

Naturalmente, la solución al problema pasa por reducir el volumen del hidrógeno como se reduce el volumen de todos los gases: comprimiéndolo, o enfriándolo hasta licuarlo. Técnica-mente, lo más sencillo es comprimirlo a una presión de 200-350 bares, pero el hidrógeno sigue ocupando muchísimo: a 200 bares, almacenar los 4 kg exigiría un depósito de 250 l. El desarrollo de nuevos materiales —composites de fibras de carbono con polímeros o aluminio, por ejemplo— está permitiendo almacenarlo a presiones de hasta 700 bares, que permiten embarcar mayor cantidad con menos volumen.

En estado líquido, el hidrógeno ocupa 700 veces menos que a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero se necesita frío, mucho frío, para alcanzar los 253 °C bajo cero que

Los dos autobuses de MAN que, desde mayo de 1999, prestan servicio en el aeropuerto de Munich, queman en un motor de combustión interna el hidrógeno gaseoso que almacenan a 250 bares en los 15 depósitos situados en el techo de cada autobús. A la derecha, vista del techo de autobús Citaro con sus 9 tanques de H₂ y del maletero de un coche "ocupado" por los depósitos.

necesita el hidrógeno para cambiar a este estado. Y para generar tanto frío hace falta, cómo no, energía: el 30-40% de la que obtendríamos de ese hidrógeno. Aún así, un coche típico necesitaría un depósito de más de 100 l de capacidad para mantener iguales prestaciones que uno de gasolina y añadiríamos el problema que supone mantener líquido el hidrógeno a pesar de la temperatura ambiente exterior.

En los últimos años se está investigando mucho en sistemas más eficientes. Hasta la fecha, las dos alternativas que más convienen son el almacenamiento del hidrógeno en hidruros metálicos y en nanotubos de carbono. Los hidruros metálicos son combinaciones del hidrógeno con ciertos metales o mezclas de metales, que se obtienen enfriando la mezcla metálica e introduciendo hidrógeno a presión. El atractivo de este sistema radica en que la reacción es reversible: calentando el hidruro y disminuyendo la presión, el hidrógeno se libera y puede ser utilizado como combustible. Es una forma de almacenamiento estable y segura, pero tiene el inconveniente de que los hidruros que operan a baja temperatura —que pueden liberar el hidrógeno a sólo 40-90 °C y tienen mayor capacidad de almacenamiento— son muy lentos y pesados, por lo que resulta más adecuada para otras aplicaciones.

Los nanotubos de carbono, que almacenan hidrógeno con mejor eficiencia y pueden operar a temperatura ambiente, pueden llegar a ser la solución. Pero aún queda mucho por hacer en este aspecto, puede que menos apasionante, pero fundamental si realmente pretendemos que en el futuro el hidrógeno mueva nuestros coches. De momento, algunas marcas han optado, como solución transitoria, por incorporar en el vehículo un reformador que convierte en hidrógeno otro combustible primario que ocupe menos —metanol o gasolina, por ejemplo— mientras el coche anda.



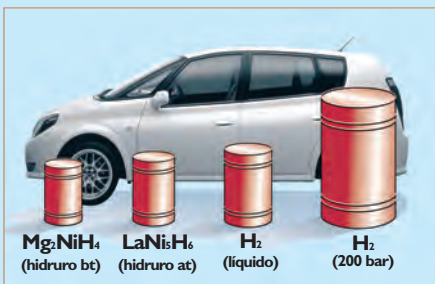
©DaimlerChrysler



©Ford

El volumen de 4 kg de H₂

Según el método de compactación y en relación con el tamaño de un coche



©Ignat Press/Nature



Interior del prototipo Necar.

Above, the CityClass Fuel-Cell, first Spanish fuel cell bus. It is a hybrid vehicle that, in addition to a 60 kW fuel cell stack, also has conventional batteries that also provide energy to the electric motor.

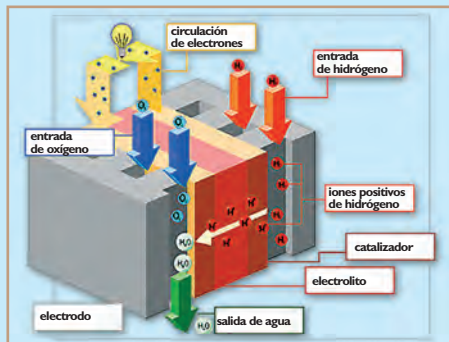
LA PILA DE COMBUSTIBLE

¿QUÉ ES UNA PILA DE COMBUSTIBLE?

Una pila de combustible es una especie de batería de alta tecnología que convierte la energía química del combustible que la alimenta en energía eléctrica. Pero hay una gran diferencia: una batería almacena en su interior la energía química que convierte en electricidad; cuando se termina esa energía química, la batería se tira; o, en el mejor de los casos, se recarga en un largo y tedioso proceso. La pila de combustible, en cambio, convierte en electricidad la energía química de un combustible que recibe del exterior y es capaz de suministrar energía eléctrica de forma continua mientras se mantenga el aporte de este combustible. Uno de los reactivos de la pila es siempre el oxígeno, que actúa como oxidante en el cátodo y que, dada su disponibilidad en el aire, generalmente no es necesario almacenar. El combustible propiamente dicho es habitualmente el hidrógeno, que –suministrado de forma directa o a partir del reformado de un primer combustible (metanol o etanol, por ejemplo)– alimenta la pila.



Cómo funciona una pila de combustible



¿CÓMO FUNCIONA?

Las mayoría de las pilas de combustible son, en realidad, una suma de pilas individuales, que reciben el nombre de células o celdas de combustible. Una célula de combustible consta de dos electrodos, ánodo (-) y cátodo (+) –ambos con cierto contenido de platino– separados por un electrolito sólido o líquido. En uno de los tipos más conocidos y sencillo de pila, al que corresponde este esquema, el electrolito es una membrana. En el ánodo se produce la reacción del hidrógeno, que se disocia en 2 protones y 2 electrones. Los protones o iones positivos de hidrógeno circulan a través de la membrana hasta el cátodo, mientras los electrones, que no pueden atravesar la membrana, se escapan por un circuito eléctrico que conecta los dos electrodos. Este flujo de electro-

El sistema de pila del Necar 4 está alojado en los bajos del vehículo. Equipado con una pila de combustible de 70 kW alimentada por hidrógeno líquido, el Necar 4, presentado en 1999, alcanzaba una velocidad de 145 km/h y tenía una autonomía de 450 km.



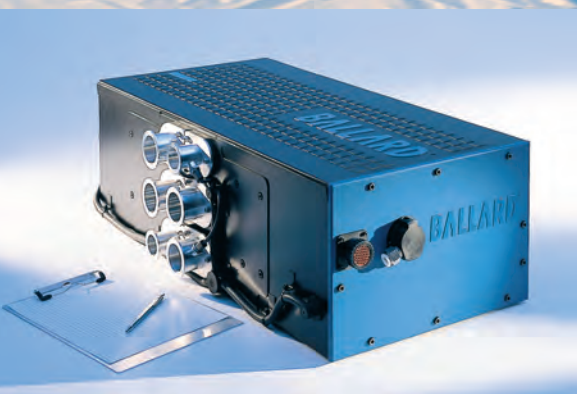
Tipos de pilas

Tipo	Electrolito*	Ion de transporte**	Temperatura de operación (°C)
■ Membrana polimérica (PEM)	Polímero sólido	H ⁺	60-100
■ Alcalina (AFC)	Solución acuosa de (KOH)	OH ⁻	90-100
■ Ácido fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₄ líquido	H ⁺	175-200
■ Carbonatos fundidos (MFCF)	Solución líquida de LiKCO ₃	CO ₃ ²⁻	600-1000
■ Óxidos sólidos (SOFC)	Y-ZrO ₂	O ²⁻	600-1000

* La membrana más utilizada en el tipo PEM es el nafión; KOH: hidróxido de potasio (potasa); H₃PO₄: ácido (orto)fosfórico; LiKCO₃: carbonatos de litio y potasio, aunque son posibles otras combinaciones de carbonatos alcalinos; Y-ZrO₂: óxido de zirconio (zirconia) estabilizado con una pequeña cantidad de itrio; un material cerámico.

** ion que se desplaza de un electrodo a otro. En las de los tipos PEM y PAFC las cargas positivas que se han formado en el ánodo se desplazan hasta el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno; en el resto de los tipos ocurre lo contrario: son los iones negativos los que atraviesan el electrolito para combinarse con el hidrógeno.

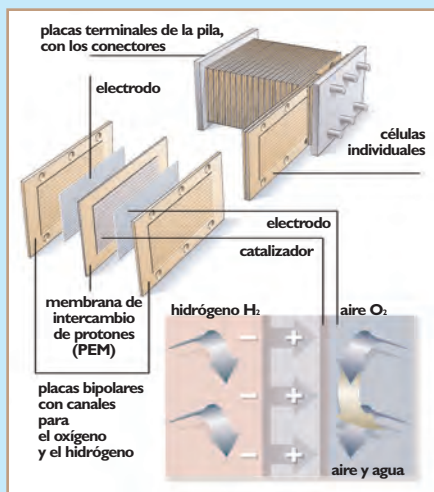
Fuente: Los Alamos National Laboratory



A la izquierda, pila de combustible de los autobuses de Madrid y Barcelona. En la página siguiente, empleados de la mensajería FedEx en Tokio descargan paquetes del HydroGen 3, coche a pila basado en el Opel Zafira, que utiliza como combustible H₂ líquido.

La pila por dentro

Las mayoría de las pilas de combustible son, en realidad, una suma de pilas individuales, que reciben el nombre de células o celdas de combustible (fuel cell, en inglés). El corazón de cada célula, la unidad formada por el electrolito y los dos electrodos (Membrane Electrode Assembly, MEA) está comprimido entre dos placas (plates) que, además de protegerla, canalizan y distribuyen los gases en los electrodos, conducen los electrones y, en muchos casos, facilitan la conexión de las células individuales en serie. El conjunto de células conectadas en serie por medio de estas placas bipolares (bipolar plates) constituye la pila de combustible (stack), en cuyos extremos se sitúan dos placas terminales (end plates), que actúan de terminales eléctricos.



UN MISMO PRINCIPIO, CINCO TIPOS DE PILAS

Aunque el funcionamiento de todas las pilas de combustible responde al mismo principio fundamental, entre ellas existen notables diferencias de diseño, características de operación y potencia. Así, se pueden encontrar desde pilas de 1 w que funcionan a temperatura ambiente hasta módulos de 250 kW que operan a 1.000 °C de temperatura. La clasificación habitual de las pilas de combustible está basada en el tipo de electrolito que utilizan, ya que éste determina características fundamentales de la pila, y, en consecuencia, sus posibles campos de aplicación. Las pilas tipo PEM son las que ofrecen mayor flexibilidad y versatilidad. Sus aplicaciones van desde la alimentación de pequeños aparatos portátiles, como radios y ordenadores, con potencias de 1 a 100 w, hasta sistemas de generación doméstica (1 a 5 kW) o residencial (200 kW), pasando por la alimentación del vehículo eléctrico. Las MCFC y SOFC tienen un enorme futuro como generadores de electricidad o de electricidad y calor; aunque su nivel de desarrollo, especialmente el de estas últimas, es mucho menor.

COCHES Y AUTOBUSES A PILA

Los autobuses que ya circulan por Madrid y Barcelona son un ejemplo de las ventajas de una tecnología que se presenta como una alternativa real, limpia y silenciosa a los actuales motores de combustión interna. Así se moverán también algún día las motos, los camiones, los submarinos y hasta los aviones; pero, sobre todo, los coches. En los últimos diez años DaimlerChrysler, Ford, General Motors/Opel, Honda, Hyundai,



Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot-Citroen, Renault, Honda, Toyota y Volkswagen han desarrollado al menos un prototipo de coche a pila cada uno. Alimentados por diferentes combustibles (hidrógeno frente a metanol o gasolina con bajo contenido en azufre reformados) y con sistemas de almacenamiento diversos (hidrógeno gaseoso, líquido e incluso combinado en hidruros metálicos), todos ellos se mueven parcial o totalmente gracias a la electricidad que genera una pila tipo PEM, que es la más utilizada en automoción. Además de por su tamaño y una buena relación potencia/volumen, porque la baja temperatura a la que funciona permite que el coche arranque rápidamente y que responda de forma inmediata a las variaciones de demanda energética del motor, habituales durante la conducción. El objetivo de la Unión Europea es que

Tipos de pilas, combustibles posibles y aplicaciones



en 2020 se muevan con pilas de combustible alimentadas por hidrógeno el 2% de los coches europeos. Aunque para eso hace falta, entre otras cosas, una red de hidrogeneras donde puedan repostar hasta llegar a su destino. Pero ésta es sólo una de las muchas posibilidades de esta tecnología.

UN ABANICO DE APLICACIONES

Los dispositivos electrónicos portátiles son otro de los posibles campos de aplicación de las pilas de combustible. Como sus requerimientos de potencia y energía son mínimos, las micro-pilas PEM y las alimentadas por metanol directamente se perfilan como la mejor alternativa. Ordenadores portátiles, cámaras, teléfonos móviles o PDAs mejoran ostensiblemente si son alimentados con



Hasta miles de células y un complicado sistema

La electricidad producida por una sola célula de combustible depende de factores como tipo, tamaño, temperatura de funcionamiento o presión a la que se suministran los gases. Una célula tipo PEM genera poco más de medio vatio por cm^2 a una tensión de 0,5-0,7 voltios, suficientes sólo para las aplicaciones móviles más pequeñas. Para conseguir la energía necesaria en el resto de las aplicaciones, suele ser necesario conectar en serie hasta cientos de células individuales.

El número de células de la pila determina el voltaje total de la pila y la superficie de cada celda, la intensidad de la corriente. Multiplicando el voltaje por la intensidad se obtiene la potencia total de la pila. Algunas pilas del alta temperatura están formadas por más de 5.000 células.

Las pilas de más de 100 vatios necesitan para "funcionar" cierto equipamiento extra, más o menos complejo según los casos. Reformador de combustible, alternador de corriente, regulador de potencia, bomba de aire, compresor y mecanismos de refrigeración y recuperación de calor determinan en gran medida el buen o mal funcionamiento de todo el sistema.



una pila de este tipo, ya que éstas duran más que las baterías convencionales. Por eso grandes empresas como Motorola, NEC o Toshiba están apostando fuertemente por esta tecnología.

En 2002, Panasonic ha anunciado el lanzamiento para 2004 de un "nuevo tipo de electrodoméstico" que produciría energía eléctrica y agua caliente. El aparato, capaz de generar permanentemente 1,5 kWh y calentar 300 l de agua a 70 °C no es sino una pila de combustible de membrana polimérica diseñada para el consumo doméstico, sector en el que ya trabajan empresas como Ballard, Fuji, Idtech, Nuvera, Toyota o UTC.

Pero hay más. La alta eficiencia de las pilas de combustible, su funcionamiento silencioso y sus nulas o bajas emisiones permiten que se puedan instalar minicentrales cerca e incluso



dentro de los núcleos de población, de manera que cada barrio podría generar su propia energía y desconectarse de la red eléctrica. Una buena noticia también para poblaciones aisladas y grandes superficies como fábricas, hospitales, edificios públicos, hoteles o urbanizaciones, que contarían con un suministro continuo y seguro de energía y calefacción. De hecho, la generación de electricidad estacionaria es la aplicación que mayor atención ha recibido y está comercialmente más desarrollada: desde 1970 se han instalado en todo el mundo unos 650 sistemas de más de 10 kW, la mayoría basados en pilas de ácido fosfórico de 250 kW. En esta dirección trabajan también empresas como la alemana MTU o Siemens, que, después de años de investigación e inversiones, han desarrollado módulos de 250 kW con las tecnologías de carbonatos fundidos y óxidos sólidos, respectivamente.

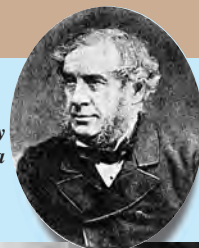
Las pilas de combustible pueden suministrar energía a pequeña y a gran escala. En las fotos, una pila doméstica de GM y la oficina de Correos de Alaska, que cuenta con 5 PAFC de 200 kW cada una.

A su izquierda, pila MCFC de 250 kW en la planta de Izar en Cartagena.

Una historia de más de 150 años

En 1838, Christian F. Schoenbein, catedrático en la Universidad de Basilea, enviaba a Michael Faraday una carta comunicándole que había descubierto que un electrolito ácido era capaz de generar corriente eléctrica a partir de hidrógeno y oxígeno o cloro sin que los electrodos de platino sufriesen cambios químicos. No obstante, la primera pila de combustible fue inventada en 1839 por William R. Grove, juez y científico galés, quien se dio cuenta de que el "efecto Schoenbein" no era más que el proceso inverso de la electrólisis del agua, y reconocía su potencialidad como generador electroquímico continuo.

Casi un siglo más tarde, en 1932, Francis Thomas Bacon "resucitaba" el invento de Grove, con ligeros cambios, que incluían la sustitución del platino de los catalizadores por níquel y del ácido sulfúrico por potasa: en 1959 consiguió que su pila alcalina produjera 5 kW. El interés por las pilas de combustible llegó definitivamente a principios de los años 60, cuando la NASA promovió el desarrollo de éstas para abastecer de electricidad y agua a las naves de los programas espaciales Géminis y Apolo. Una década más tarde la crisis del petróleo haría despegar definitivamente la investigación y el desarrollo de esta nueva tecnología.



Pilas de combustible utilizadas en el programa espacial Apolo.

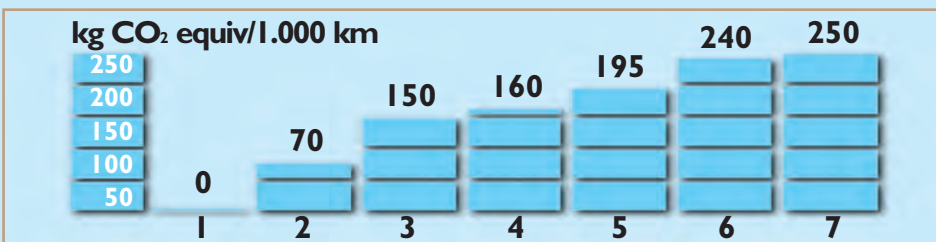
Las tres pilas alcalinas, de 1,4 kW cada una, estaban conectadas en paralelo: una sola bastaba para volver a la Tierra. Funcionaron sin incidentes durante 10.000 h en 18 misiones.



VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES

La pareja hidrógeno-pila de combustible es una gran aliada de la naturaleza. La oxidación del hidrógeno –sea en un motor de explosión, sea a través de una pila– no genera emisiones de SO_2 , hidrocarburos no quemados y, sobre todo, CO_2 . Por el tubo de escape de un coche a pila sólo sale vapor de agua. Las altas temperaturas que se generan en el interior de un motor térmico provocan la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x), que, sin embargo, pueden reducirse con ayuda de catalizadores que disminuyan la temperatura del proceso. BMW (en la foto), MAN y recientemente Ford han apostado por los motores de combustión de hidrógeno, una techno-

Emisiones de CO_2 según tecnología y combustible



- 1 H_2 por electrólisis de fuente renovable
- 2 H_2 reformado de gas natural
- 3 Motor híbrido PC-gasolina
- 4 PC metanol

- 5 PC gasolina
- 6 H_2 por electrólisis de fuente no renovable
- 7 Motor de combustión interna gasolina

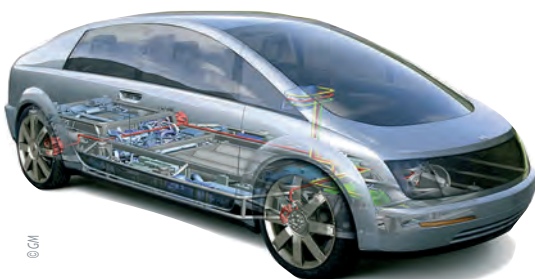
Fuente: National Renewable Energy Laboratory (NREL)/APFICE



logía limpia y mucho más barata hoy que la pila de combustible.

El proceso que se produce en los dos casos es básicamente el mismo, una oxidación, pero el camino es diferente: mientras que una pila transforma la energía química del combustible directamente en energía eléctrica, en un motor de explosión la energía química se convierte primero en energía térmica, que se transforma, a su vez, en energía mecánica. Y en este paso intermedio se pierde mucha energía, algo que siempre será así por mucho que se mejoren los motores tradicionales: lo dicen las leyes de la termodinámica, contra las que no se puede luchar.

La eficiencia de la pila permite también reducir el número de emisiones de CO₂ y otras sustancias aunque se empleen combustibles menos limpios que el hidrógeno: como, para el mismo número de kilómetros, un coche a pila necesita menos combustible que uno con un motor tradicional, en su recorrido habrá emitido menos contaminantes.



Más información

- **Asociación Española del Hidrógeno:**
www.aeh2.org
- **Asociación Española de Pilas de Combustible:**
www.appice.es
- **Ciemat:** www.ciemat.es/proyectos/pdcfpilas.html
- **CSIC:** www.csic.es/redes/pilas/principal.html
- **INTA:** www.inta.es
- **Pilas de combustible:**
www.pilasde.com
- **Fundación Bellona:**
www.bellona.org
- **Agencia Internacional de la Energía:**
www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/iea
- **Departamento de Energía de EEUU:**
www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells
- **Los Álamos National Laboratory:**
www.lanl.gov
- **Fuel Cells 2000:**
www.fuelcells.org
- **Listado de LBST:**
www.h2cars.de

Créditos

“Energías Renovables para todos”
es una colección elaborada por
Haya Comunicación, editora de la revista
“Energías Renovables”,
(www.energias-renovables.com)
con el patrocinio de Iberdrola.

- **Dirección de la colección:**
Luis Merino / Pepa Mosquera
- **Asesoramiento:**
Iberdrola. Gonzalo Sáenz de Miera
- **Diseño y maquetación:**
Fernando de Miguel
- **Redacción de este cuaderno:**
Paloma Asensio
- **Agradecimientos:** ARIEMA, Rafael Luque, CSIC, Miguel A. Peña, APPICE, Juan de Blas
- **Impresión:** Sacal

Energías renovables para todos

El hidrógeno se ha convertido en el combustible de moda gracias a la llegada a Madrid y Barcelona de los primeros autobuses "a pila" y a la puesta en marcha de las "hidrogeneras" que les suministran energía. Sinónimos, respectivamente, de combustible limpio y eficiencia energética, la pareja formada por el hidrógeno y la pila de combustible se perfila como parte importante de la solución a los problemas energéticos del mundo a medio-largo plazo.

