

PERSPECTIVA

AMBIENTAL 27

Hidrógeno solar



Abril 2003

P E R S P E C T I V A A M B I E N T A L 27

Edición:

Associació de Mestres Rosa Sensat
Drassanes , 3 • 08001 Barcelona
• Tel: 934 817 373 • Fax: 933 017 5 50
Fundació TERRA
Avinyó, 44 • 08002 Barcelona
• Tel: 936 011 636 • Fax: 936 011 632

<http://www.ecoterra.org>, alberga la colección entera de los cuadernos de educación ambiental PERSPECTIVA AMBIENTAL en formato PDF Acrobat de ADOBE que se publica desde 1995.

Redacción:

Lali Roca

Traducción:

Carme González Bello

Foto portada: el universo es hidrógeno en esencia

Cúmulo estelar NGC 1850 de la Nube de Magallanes realizada por el telescopio espacial Hubble.

Fotos interiores:

Hubblesite.org, Ballard Power Systems, Proton Motor, NASA, Honda i altres.

Ilustraciones

Equipo terra.org

Maquetado con Adobe Page Maker 7.0

Hidrogen solar

El final de la era del petróleo
Las propiedades del hidrógeno
Historia del hidrógeno
Los usos del hidrógeno
Fuentes de producción de hidrógeno
Las células de combustible
Historia de las células de combustible
Tipos de células de combustible
Aplicaciones de las pilas de combustible
El hidrógeno en los medios de transporte
Infraestructuras para el hidrógeno
Sistemas de transporte
Seguridad e información
La economía del hidrógeno
El impacto ambiental del hidrógeno

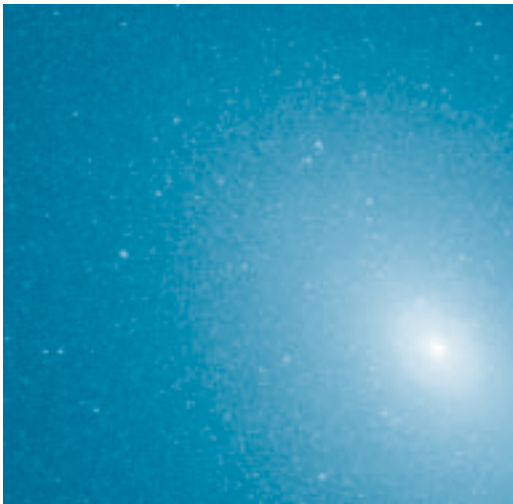
Hagamos hidrógeno

Electrólisis
Una visita obligada
Kits pedagógicos de hidrógeno
Construction 30 de Eitech
El coche de hidrógeno de KOSMOS

El hidrógeno es el elemento químico más sencillo, pero posiblemente es la solución a uno de los problemas más graves generados por la civilización humana: la dependencia de los combustibles fósiles. No se encuentra disponible de forma libre, pero dos tercios del universo contienen hidrógeno. No es una fuente de energía, pero la almacena. Entender las posibilidades energéticas del hidrógeno es uno de los retos a principios del siglo XXI.

Hidrógeno solar

*Fundació TERRA**



* La Fundación TIERRA es una fundación privada que tiene por objetivo canalizar y fomentar iniciativas que favorezcan una mayor responsabilidad de la sociedad en los temas ambientales.

El final de la era del petróleo

La dependencia del petróleo en nuestra civilización es enorme. Los Estados Unidos, por ejemplo, con un 5% de la población mundial consumen casi el 26% de todo el petróleo que se extrae del planeta. La producción de petróleo en los Estados Unidos es del 11% y tan sólo posee el 2% de las reservas globales. Las reservas de los Estados Unidos no superan los 3.700 millones de toneladas. Lo que quiere decir, que en unos 10 años se habrán acabado o, incluso antes, si no se tiran sobre los territorios de Alaska.

En el caso de la Unión Europea el consumo de energía también proviene mayoritariamente de combustibles fósiles (41% de petróleo, 22% de gas natural y 16% de carbón), las centrales nucleares aportan un 15% y las energías renovables sólo el 6%. Corregir esta dependencia no es fácil. En la Unión Europea el sector del transporte, que representa entre un 4% y un 10%

del Producto Interior Bruto (PIB), consume un 40% de la energía, y se prevé que el tráfico de pasajeros y mercaderías en los próximos veinte años aumente entre un 20% y un 30% respectivamente. El consumo en petróleo por cápita en el 2001 en España fue de 159 barriles (1 barril = 158,98 litros) casi la mitad que la de un ciudadano norteamericano. El consumo diario en toda Europa fue de 16 millones de barriles al día, mientras que en Estados Unidos de 19 millones. Una cantidad que no ha parado de crecer en las últimas décadas.

Irak dispone de unas reservas de 15.200 millones de toneladas (aproximadamente 112.000 millones de barriles). Estimando a 30 dólares el barril de petróleo el valor del petróleo iraquí es de unos 3,36 billones de dólares. Una guerra contra el Irak puede representar un coste no superior a los 100.000 millones de dólares, es decir 34 veces menos que los beneficios que pueden generar las reservas iraquianas.

Los expertos en petróleo afirman que las reservas del oro negro recuperable estimadas se sitúan entre 1,8 y 2,2 millones de barriles anuales. El mundo ha consumido ya más de 875.000 millones de barriles de este total. La demanda anual de petróleo se sitúa en unos 30.000 millones de barriles y podría llegar a los 45.000

millones antes de 2020 si continúa al ritmo actual. El 70% del petróleo que se suministra actualmente fue descubierto en los años setenta. Por cada barril de petróleo que se descubre en la actualidad consumimos cuatro.

Si la China y la India quieren conseguir el nivel de consumo de petróleo por cápita que tiene Corea del Sur se necesitarían unos 45.000 millones de barriles anuales. La demanda mundial de petróleo es actualmente de unos 24.000 millones de barriles al año, es decir, casi un 50% más que la demanda mundial del año 2000. Los expertos pueden ser optimistas en las reservas mundiales de petróleo, pero este producto es lo suficientemente valioso como para utilizarlo como combustible y volatilizarlo en gases tóxicos en la atmósfera que respiramos. Por otro lado, el riesgo que comporta la adición al petróleo cuando este deje de ser barato puede contribuir al hundimiento de la civilización actual si no ponemos remedio a la dependencia del crudo.

Nuestra sociedad dispone de más de 500.000 productos derivados del petróleo: fertilizantes (para hacer crecer alimentos), medicinas, plásticos, aislantes, ordenadores, pinturas, disolventes, detergentes; e incluso productos tan cotidianos como la aspirina, el CD rom, un pinta uñas o un chicle dependen del petróleo para existir.

Nuestra civilización del petróleo se fundamenta en el proceso de transformación de la energía más jerarquizada y centralizada de la historia de la humanidad. Tampoco debemos de olvidar los 6.000 millones de toneladas de dióxido de carbono liberadas en el año 2000, de las cuales el 75% se debe a la combustión de petróleo. Ciertamente, la economía fósil pide un relevo si queremos evadir el callejón sin salida de la humanidad. Sin embargo, cualquier otra fuente de energía exige asumir primeramente el concepto de eficiencia energética y de frugalidad, dos valores todavía poco asumidos por nuestra sociedad opulenta.



El hidrógeno almacena 2,6 veces más de energía por unidad de masa que la gasolina. Por esta razón los coches de hidrógeno pueden tener futuro.

Los combustibles fósiles aportan el 85% de las necesidades energéticas del mundo: un 40% corresponden al petróleo, el 22% al carbón y el 23% al gas natural. Hemos multiplicado por 70 el consumo mundial de energía.

Las propiedades del hidrógeno

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y no tóxico. Es el elemento más ligero y abundante de la naturaleza. Su densidad es de 0,0899 gr./l. Es decir 14,4 veces menos denso que el aire. Constituye aproximadamente el 80% de la masa de toda la materia del Universo y se encuentra en el 90% de las moléculas. El Sol, por ejemplo, es casi 100% hidrógeno puro y toda la energía que nos envía proviene de la fusión de los átomos de hidrógeno. A altas temperaturas y presiones, el hidrógeno se convierte en sólido: en un metal. A bajas temperaturas (alrededor de los -253°C) es un líquido. Este es el caso de algunos planetas como Júpiter, la superficie del cual es esencialmente hidrógeno líquido.

En relación a las características del hidrógeno como combustible, se debe destacar que se quema en el aire libre cuando hay concentraciones entre el 4 y 75% de su volumen (el gas natural lo hace entre 5,4 y 15%). La temperatura por combustión espontánea es de 585°C , mientras que para el gas natural es de 540°C . El gas natural es mucho más explosivo (lo hace en concentraciones de 6,3% a 14%) que el hidrógeno (necesita concentraciones de hidrógeno entre el 13% y el 64%).

En nuestro planeta, el hidrógeno raras veces se encuentra en forma libre. La mayor parte está unido al oxígeno formando agua. Por eso, las auténticas minas de hidrógeno son los océanos, el agua dulce y los glaciares. Sin embargo, los hidrocarburos también son una fuente importante de hidrógeno. Por ejemplo, el metano (CH_4) tiene cuatro átomos de hidrógeno por cada uno de carbono. La biomasa (los res-

tos de plantas y animales) también contienen hidrógeno.

Uno de los errores más comunes es pensar que el hidrógeno es una fuente de energía primaria (como el gas o el petróleo) que existe en forma libre en la natura. Se trata de un vector energético, una forma secundaria de energía que se debe transformar con otras fuentes primarias. El hidrógeno, pues, no se puede considerar un combustible de primera, si es que éste lo definimos como cualquier sustancia capaz de producir un balance limpio de calorías energéticas en un proceso económicamente razonable. El hidrógeno requiere una importante fuente de energía para extraerlo en una forma energéticamente aprovechable. A diferencia del petróleo, del gas o del isótopo radioactivo que se pueden considerar fuentes de energía, el hidrógeno es pues, un vector, un portador de energía que nos permite producir otra fuente de energía (por ejemplo, electricidad, y con ella obtener energía luminosa, calorífica, etc.). En cambio, el gas natural, por si mismo genera calor o luz.

De todos modos, el hidrógeno como combustible presenta algunas ventajas. Por ejemplo, la densidad respecto al volumen de hidrógeno (2,53 kWh./l.), es cuatro veces más baja que la de la gasolina (8,76 kWh./l.). Aunque si consideramos la cantidad de energía en rela-



Lanzamiento del transbordador espacial. Para poner en órbita este ingenio a 300 km. de altura se tarda unos 45 minutos y se queman unos 2 millones de litros de hidrógeno y oxígeno

ción con el peso, entonces la del hidrógeno es más alta. El hidrógeno líquido tiene un peso de 70,99 gr./l. Un quilo de hidrógeno genera la misma energía que 2,1 kg. de gas natural o 2,8 kg. de gasolina. Si lo comparamos con el gas natural, entonces el hidrógeno aporta entre 33,33 kWh/kg. y 39,41 kWh/kg. mientras que el gas natural menos de la mitad, es decir, entre 13,90 kWh/kg. y 15,42 kWh/kg. En cambio si lo medimos en volumen, entonces son 2,9 kWh/m³ y 3,51 kWh/m³ y el gas natural aporta entre 9,97 kWh/m³ y 11,06 kWh/m³. Metales como

el paladio (Pd) pueden absorber hasta 850 veces su volumen en hidrógeno y por eso se puede utilizar como reductor. Las disoluciones coloidales de paladio permiten absorber hasta 3.000 veces su volumen con hidrógeno. Esta propiedad de absorción del hidrógeno es la base de la conocida fusión fría.

Por su composición química no genera compuestos que puedan causar lluvia ácida, excepto los óxidos de nitrógeno, cuando se utiliza como combustible en un motor de combustión interna.

Historia del hidrógeno

Es curioso que el elemento más abundante del universo se esconda de nuestros sentidos. Parece que el primer experimento en el cual se produjo hidrógeno se debe al físico Teofrast Paracelsus (1493-1541), pero se pensó que eran gases inflamables. No fue intuido hasta el siglo XVII cuando en el 1697 el físico alemán Georg Ernst Stahl (1660-1734) definió el flogisto como una sustancia que desaparecía durante la combustión. El noble Henry Cavendish (1731-1810) fue el primero en descubrir y describir las calidades del hidrógeno pero no lo identificó como elemento, aunque afirmó que había dos tipos de aire: el aire fijo (CO₂) y el aire inflamable (hidrógeno) y que era 1/4 más pesado que el aire. El físico francés Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) a partir de las observaciones de Cavendish, en el año 1783 separó el oxígeno del hidrógeno del agua y a continuación los combinó produciendo 45 gr. de agua. Nombró al oxígeno “el aire que sustenta la vida” y al hidrógeno “el aire inflamable” (que en griego significa “productor del agua”).

En el 1874 Julio Verne, cien años antes que empezarse las investigaciones modernas con hidrógeno, escribió “La isla misteriosa” en la cual profetizaba en boca del ingeniero Cyrus Harding “creo que algún día se utilizará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que la componen, ya sean juntos o separados, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la cual el carbón no es capaz. El agua será el carbón del futuro”.

La producción de hidrógeno no empezaría hasta el 1920 que se construyeron los primeros electrolizadores para obtener hidrógeno y oxígeno. Pero, el hidrógeno se hizo famoso por el uso que hicieron los ingenieros de los zeplines alemanes al mezclarlo en una proporción de 10:1 en la mezcla que utilizaban como combustible. Esta mezcla les concedía un mayor rendimiento y, por lo tanto, más velocidad.

Entre el 1930 y los años cuarenta, uno de los principales entusiastas en el uso del hidrógeno fue el alemán Rudolf Erren que fabricó camiones, autobuses, submarinos que utilizaban el hidrógeno y otros combustibles en motores de combustión interna. Después de la Segunda Guerra Mundial el interés por las células de combustible anticipadas por William Grove (1811-1869) vendría de la mano del científico inglés Francis T. Bacon en los años cincuenta que desarrolló la primera célula de hidrógeno-aire y que tendría una gran importancia en el programa espacial americano.

Sin embargo, la visión de una “economía del hidrógeno” hecho con energía solar fue propuesto en el 1962 por el electroquímico australiano John Bockris. Este científico también asesoró la General Motors y auguró que “el hidrógeno sería el combustible de todos los medios de transporte”. La era del hidrógeno, primero de la mano de la industria del espacio y, posteriormente, de la automoción había empezado. Estamos en el abecé de una nueva era energética, pero la lucha contra la contaminación de los combustibles fósiles y la democratización de la energía dependen de cómo se desarrolle la tecnología del hidrógeno como vector energético.

Otro factor importante para apostar por el hidrógeno es que se puede almacenar a alta presión, mezclado con ciertos componentes como por ejemplo fibras microscópicas de carbono y en estado líquido. El hidrógeno líquido a baja temperatura es ideal para motores de combustión interna y podría ser un sustituto excelente para los reactores de los aviones. En forma de metal hidruro es un combustible muy seguro y que no tiene resistencia eléctrica, esto lo hace ser idóneo para el campo de la electrónica.

Los usos del hidrógeno

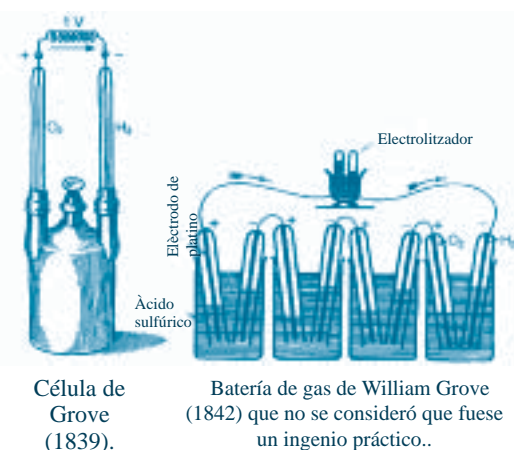
Anualmente, en el mundo ya se producen más de 500 mil millones de metros cúbicos de hidrógeno (45 millones de toneladas) que se almacenan, se transportan y se utilizan. La mayor parte de este hidrógeno lo utiliza la industria química para la obtención de productos como fertilizantes basados en amoníaco (un 50%) y para a la hidrogenación de aceites orgánicos comestibles. También se utiliza para producir el plástico prolipropileno (con el cual se elaboran entre otros tejidos, tuberías, etc.). Sin embargo, el interés del hidrógeno como combustible empezó a tener importancia con la crisis del petróleo de 1973. La mayor parte del hidrógeno se obtiene de la reformación del gas natural con vapor, aún siendo barato, deja

como subproducto el dióxido de carbono. La clave del hidrógeno es su producción con energía solar ya que la Tierra recibe en 40 minutos la misma energía que consumimos en todo un año. Saber interceptar la energía solar cuando hace Sol para almacenarla en hidrógeno es la clave del éxito para abandonar la economía fósil y entrar en la economía del hidrógeno. La primera planta de hidrógeno solar se inauguró el 26 de setiembre de 1995 en El Segundo (California, EEUU). Se han hecho otros experimentos; sólo hace falta empeñarse que con los combustibles fósiles no hay futuro.

Fuentes de producción de hidrógeno

Una de las preguntas más importantes que nos podemos hacer es: ¿De dónde proviene el hidrógeno? El método con el que obtendremos el hidrógeno será una decisión crítica ambientalmente hablando. Por ejemplo, si el hidrógeno proviene de la electrólisis del agua puede comportar un gran derroche de energía eléctrica. Si por el contrario se implanta la electrólisis gravitacional, la economía del hidrógeno podría ser un boom, como lo fue la tecnología del microchip para los ordenadores. También se puede generar en una central térmica quemando carbón o basuras. Aunque la cuestión más importante es que la producción de hidrógeno contribuya a la reducción de las emisiones de carbono.

La extracción de hidrógeno del metano de las basuras podría provocar un incremento de metales pesados, dioxinas y otros contaminantes y tóxicos para la atmósfera. Si la electrólisis se alimenta a partir de energías renovables, como por ejemplo placas solares, aerogeneradores o centrales minihidráulicas, entonces no se producirán emisiones a la atmósfera. He aquí, pues, que el método que escogamos para obtener hidrógeno puede ser decisivo para el cambio del sistema energético. Un nuevo sistema energético que evite las emi-



Célula de Grove (1839).

Batería de gas de William Grove (1842) que no se consideró que fuese un ingenio práctico..

siones de dióxido de carbono y permita cumplir con los compromisos internacionales de lucha contra el cambio climático. La elección de la metodología a utilizar para obtener hidrógeno se hará de acuerdo con el crecimiento o evolución de la industria de la pila de combustible.

Reformación de los hidrocarburos

En un término corto de tiempo, debido a la abundancia del gas natural, la disponibilidad de metanol y propano y la falta de infraestructuras para producir hidrógeno gas, se espera que los hidrocarburos sean los combustibles provisionales dominantes para producir hidrógeno. Actualmente, con los combustibles fósiles ya se producen unos 40 millones de toneladas de hidrógeno para fines comerciales. Esta producción mundial, aunque parezca elevada, si se convirtiera en energía sólo aportarían un 1% de la demanda energética

mundial. Sin embargo, actualmente este hidrógeno se utiliza mayoritariamente en otros procesos industriales.

El proceso más común de extracción de hidrógeno es la reformación de hidrocarburos. Uno de los sistemas es la modificación del gas natural, de fueles pesantes o del carbón con vapor de agua a altas temperaturas y presión elevada. En todos estos procesos se obtienen gases de carbono que se liberan a la atmósfera.

En el último lustro del siglo XX se consiguió extraer hidrógeno de los combustibles fósiles, especialmente del gas natural, con una eficiencia de casi el 100% en un proceso conocido como Kvaerner desarrollado en el 1994 por la empresa noruega Kvaerner Engineering. La descomposición se produce en un arco de plasma de unos 1.600°C sin generar ningún tipo de emisión, aunque necesita de una abundante fuente de energía eléctrica. Sin embargo, en el caso de Noruega, la electricidad se puede producir a bajo precio gracias a la energía hidráulica. Otros métodos experimentales utilizan vapor a una temperatura de 815 a 870°C con la ayuda de un catalizador de níquel. El CO₂ que se produce se puede convertir en hidrógeno gracias al proceso conocido como adsorción de presión oscilante.

El desarrollo de las pilas de combustible han hecho aparecer pequeños aparatos reformadores, especialmente, de gas natural o metanol para suministrar en un proceso continuo hidrógeno a las células. Actualmente, todavía no se comercializan, pero se incorporan en algunos modelos de pilas de combustible. Desgraciadamente, en los procesos convencionales de reformación de los hidrocarburos para obtener hidrógeno continua produciéndose una emisión de dióxido de carbono. El problema con la reformación de hidrocarburos como por ejemplo el gas natural o el carbón es que se trata de un proceso muy barato y competitivo. Sin embargo, estos métodos no permiten desligar nuestra dependencia de los combustibles



Célula de combustible de metanol que aprovecha el hidrógeno de este líquido para producir electricidad en una aplicación didáctica.

fósiles y los problemas geostratégicos que comportan.

El hidrógeno y las energías renovables.

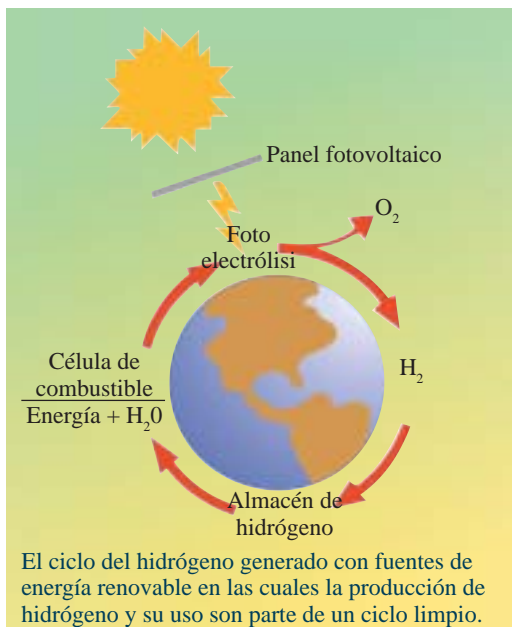
Las energías renovables, especialmente la eólica y la solar fotovoltaica, que generan electricidad de forma discontinua y que no siempre se puede almacenar o enviar a la red, tienen en el hidrógeno un vector para conservarla. Por eso, el hidrógeno complementa muy bien las limitaciones de la energía solar y viceversa, el elevado gasto de hidrolizar el agua tiene en la energía solar (fotovoltaica o eólica) una magnífica aliada. Por eso, podemos decir que la energía solar y el hidrógeno son un binomio fundamental en el desarrollo de la economía del hidrógeno solar. El hidrógeno y el Sol están unidos desde los inicios de los tiempos. El hidrógeno puede ser producido sin ninguna emisión de dióxido de carbono a partir de sistemas renovables de energía. En este caso la energía para disociar el agua en oxígeno e hidrógeno, aún y ser elevada, la proporciona un

sistema que no contamina y puede ser muy barato en el futuro.

El oxígeno y el hidrógeno separados se utilizan como combustible para obtener nuevamente electricidad a través de las células de combustible. La ventaja de las pilas de combustible que funcionan directamente con hidrógeno gas es que pueden ser útiles para almacenar el exceso de energía eléctrica producida en momentos de mucho viento, o para usar de noche en lugares con una fuerte radiación solar.

Un sistema que incorpore el hidrógeno a partir de fuentes renovables conjuntamente con una pila de hidrógeno es un sistema cerrado, en el cual ninguno de los productos o reactivos (agua, hidrógeno y oxígeno) se escapan hacia ambiente. El agua consumida por la “pila” se transforma en gases. A continuación los gases vuelven a transformarse en agua. La energía eléctrica producida por paneles solares es transferida a energía química en forma de gases. Los gases pueden ser almacenados y transportados, para reconvertirse otra vez en electricidad cuando ésta sea necesaria.

Este sistema de producción de hidrógeno con energía renovable es realmente sostenible, siempre y cuando se tenga energía solar, eólica o cualquier otra fuente renovable, para poder producir la energía eléctrica allí dónde haga falta y cuando sea necesaria.



Electrólisis del agua

La electrólisis alcalina del agua ha sido un método tradicional desde hace más de 80 años, pero, en general, asociada a centrales de energía hidráulica o geotérmica, a efecto del elevado coste energético que comporta. En estas últimas décadas, sólo un 0,2% de la producción mundial de hidrógeno se hace separando agua.

La separación electrolítica consiste en dos reacciones parciales en dos electrodos sumergidos en un recipiente con agua, a la cual se le

ha añadido un ácido o una sal. Cuando hacemos pasar una corriente eléctrica, burbujas de hidrógeno suben por el cátodo mientras que el oxígeno se dirige al ánodo. Para poder mantener separados estos dos gases en el recipiente o electrolizador hay un separador o diafragma, constituido de asbesto. La eficiencia de éste proceso es, en grandes plantas, del 65 - 70%. Se calcula que se necesitan 94 kWh. para generar unos 300 m³ de hidrógeno gas para los que se necesitan 79 kWh. de energía.

Existen otros métodos para electrolizar el agua, como por ejemplo los que realizan con vapor de agua a temperaturas de unos 1.000°C. Las investigaciones en este sistema han podido comprobar una reducción del consumo eléctrico respecto a la electrólisis convencional de un 30 - 45%. El corazón de este sistema es un electrólito sólido de cerámica, hecho de óxido de circonio recubierto de electrodos porosos con un elevado nivel de conductividad para el oxígeno a altas temperaturas, que permite, que sin la necesidad de ácido o sal, tanto el hidrógeno como el oxígeno se dirijan cada uno de ellos a su electrodo.

Finalmente, debe citarse la electrólisis con células de membrana (PEM) o la electrólisis de polímero sólido (SPE) en el cual el electrólito es una membrana de hojas sólidas de un material parecido al teflón. La conversión de agua a hidrógeno con este método alcanza casi el 100% de la eficiencia.

La electrólisis gravitacional

Esta tecnología ha sido desarrollada recientemente por la empresa americana Electro Hydrogen Generator (EHG). Se caracteriza en descomponer el agua en un electrólito que han patentado, y someterla a un fuerte campo de fuerzas inerciales. La menor cantidad de energía que se necesita respecto a la hidrólisis tradicional del agua es porque se aprovecha la fuente de calor generada por el propio campo inercial.

Esta compañía ha bautizado el proceso con el nombre de electrólisis gravitacional y asegura que consigue una eficiencia entre el 86 al 98% en la extracción de hidrógeno del agua. Tal es la eficiencia, que el proceso de electrólisis gravitacional permite obtener un metro cúbico de agua, 3,5 m³ de hidrógeno y 2,2 megajulios de electricidad por segundo. La producción de un metro cúbico de hidrógeno por el proceso de EGH se valora en 0,0038 \$ (alrededor de los 2\$ por los métodos de electrólisis convencionales) y resulta entre 2,5 y 3 veces más barato que el coste de producción y transporte del mismo volumen de gas natural. En otro orden de medida, este proceso permite que de el hidrógeno extraído de un litro de agua se obtenga la misma energía que permitiría correr un coche con un litro de gasolina. En definitiva, una tecnología emergente que puede revolucionar la economía del hidrógeno.

Métodos biológicos

Aunque todavía es un método muy experimental de obtención de energía con bioproducción de hidrógeno a partir de microorganismos se perfila como una posibilidad nada menospreciable. La producción biológica de hidrógeno presenta algunas ventajas importantes respecto a los métodos fotoeléctricos, químicos o termoquímicos. Para generar



Annabaena variabilis donde se observa la producción de nitrógeno en los heterocistos de las células según estudios del Dr. Thomas Happe de la Universidad de Bonn.

hidrógeno con organismos fotosintéticos sólo es necesario un simple reactor solar, como por ejemplo un recipiente transparente. La baja eficiencia de la conversión biológica (un 7%) se compensa con los pequeños requerimientos energéticos. Por ejemplo, las algas cianobacterias, como la *Spirulina*, genera hidrógeno en condiciones anaeróbicas y de oscuridad. Otros organismos como el cianobacterio *Anabaena cylindrica* genera hidrógeno y oxígeno en una atmósfera de gas argón y en ausencia de nitrógeno. Con socas de *Anabaena variabilis* hupSL modificadas genéticamente se ha conseguido que el encima nitrogenasa, responsable de reducir el nitrógeno a amonio, genere hasta cinco veces más de hidrógeno que la variedad silvestre. Investigaciones con la bacteria fotosintética *Rhodospirillum rubrum* han permitido comprobar que produce hidrógeno con el enzima hidrogenasa a partir del agua, e incluso con presencia de oxígeno. Los experimentos que se han hecho con una alga como la *Chlamydomonas reinhardti* demuestran que este organismo oxida el agua para liberar hidrógeno cuando en su hábitat natural rico en sulfuro estos disminuyen. Por otra parte, teniendo en cuenta que la producción de hidrógeno electrolizando el agua es muy baja (alrededor de un 10% a un 12%), se abren muchas esperanzas a la producción biológica a un bajo coste y a una gran facilidad. Estos mecanismos de producción de biohidrógeno pueden ser más bien una nueva fuente para obtener hidrógeno combustible.

Otras fuentes

Ultimamente, hay investigaciones encaminadas a extraer hidrógeno de dónde sea posible a medida que este elemento se configura como un sustituto real de los hidrocarburos. Así hay procesos experimentales muy recientes que demuestran que moléculas simples derivadas de la biomasa, como por ejemplo la glucosa o el glicerol, se pueden romper en fase acuosa

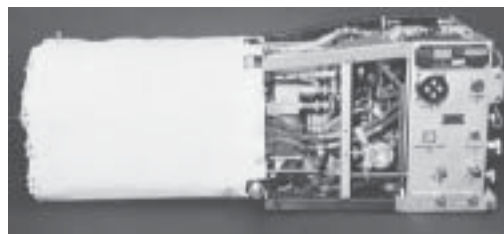
para obtener hidrógeno con una eficiencia razonable.

La producción de hidrógeno a partir de azúcares y alcoholes en un reactor de fase acuosa es un proceso con el cual, utilizando como catalizador el platino, se obtienen temperaturas de 225 - 265°C (si tenemos en cuenta que con las tecnologías tradicionales se necesitan temperaturas de hasta 800°C) y una presión de 27,54 bares (así se evita la formación de vapores). El mecanismo de formación se basa en la ruptura y reformación de los enlaces carbono-carbono y carbono-oxígeno, los cuales permiten crear diferentes partículas intermedias que producen hidrógeno al reaccionar con el agua en medio acuoso. Durante el proceso también se forman hidrocarburos simples y dióxido de carbono.

La cantidad de hidrógeno gas que se forma en proporción con el producto inicial de la reacción varía entre un 36 - 50% para la glucosa y a un 51 - 75% para el glicerol. Aunque es necesario pulir muchos detalles del proceso, la generación de gas rico en hidrógeno a partir de carbohidratos extraídos de biomasa renovable y otros gases de las basuras podría ser comercialmente rentable.

Las células de combustible

Una célula de combustible es un sistema químico que recibe hidrógeno para transformarlo en electricidad de manera indefinida, siem-



Célula alcalina de 12 kW. construida por International Fuel Cell (EUA) y utilizada en el transbordador espacial desde principios de los setenta.

pre y cuando se le aporte hidrógeno en presencia de oxígeno, para generar energía y agua. Una célula de combustible es una estructura sencilla que consiste en tres capas adosadas. La primera capa es el ánodo, la segunda el electrólito y la tercera el cátodo. El ánodo y el cátodo sirven de catalizador. La capa del medio hace la función de estructura de transporte, la cual absorbe el electrólito. El electrólito, que puede ser líquido o sólido, es el que distingue los diferentes tipos de pilas de combustible. Debido a que una célula genera un voltaje muy bajo, se pueden conectar muchas células en serie para incrementar la cantidad de corriente producida. Al conjunto de células de combustible se les llama pila de combustible.

Generalmente, el combustible de donde se extrae el voltaje es el hidrógeno ya sea en estado puro o bien previa transformación con un hidrocarburo rico en hidrógeno como el metano. La descomposición de un hidrocarburo generará agua y dióxido de carbono. Por esta razón el uso del hidrógeno como energía limpia debe provenir de la descomposición del agua. Una célula de combustible es silenciosa, eficientes y no genera sustancias contaminantes.

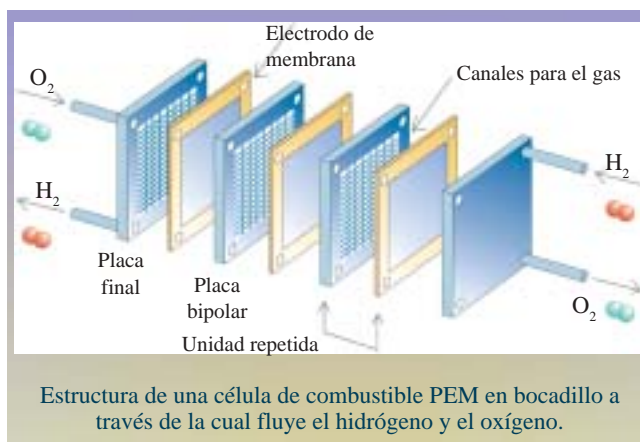
Historia de las células de combustible

La primera célula de combustible fue desarrollada por el científico inglés William Grove (1811-69) hacia el año 1839. El principio fue descubierto accidentalmente, mientras hacía un experimento de electrólisis. Cuando desconectó la batería de la electrólisis observó una corriente que fluía en dirección opuesta que consumía los gases de hidrógeno y oxígeno a la cual llamó "batería de gas". Esta batería de gas consistía en unos electrodos

de platino en un baño de ácido sulfúrico disuelto. En el 1842 conectó diferentes vasos en serie para hacer una cadena de gas. Hizo servir la electricidad generada en la cadena de gas para impulsar un electrolizador. Desgraciadamente, la corrosión de los electrodos y la inestabilidad de los materiales hizo creer que la célula de Grove no era práctica.

Casi un siglo más tarde el químico inglés Francis Bacon volvió a investigar sobre las células de combustible y hacia el 1950 produjo la primera, pero utilizando un electrólito alcalino como el hidróxido de potasio (KOH). El electrodo era un material sintético con polvo de níquel, el cual permitía que el gas en contacto con el electrodo pudiese estar en contacto con el electrólito acuoso al otro lado. Este incremento en el área de contacto entre los electrodos, los gases y el electrólito permitía mejorar la densidad de la célula de combustible. Por otro lado, el níquel era más barato que el platino.

En los años sesenta las misiones espaciales de la NASA impulsaron el desarrollo de una célula de combustible para las misiones del Apollo. Este ingenio tenía la ventaja, respecto a las baterías convencionales, por ofrecer más energía en menor peso y, a parte de la electricidad, suministraba el agua necesaria para los astronautas. La nave del Apollo que aterrizó



Estructura de una célula de combustible PEM en bocadillo a través de la cual fluye el hidrógeno y el oxígeno.

en la Luna iba equipada con una pila de combustible de 1,5 kW., la cual a lo largo de las 18 misiones del Apollo acumuló más de 10.000 horas de funcionamiento sin ningún incidente.

En los setenta se perfeccionó esta tecnología y se desarrolló una pila de combustible de 12 kW. alimentada con hidrógeno y oxígeno líquido, la cual se instaló en el transbordador espacial demostrando su eficacia después de 106 misiones y 82.000 horas de funcionamiento. Las pilas de combustible alcalinas, aún y sus grandes ventajas de producción energética en poco peso, no son útiles en el medio terrestre porque el dióxido de carbono contamina el electrolito y produce carbonato que reduce la concentración del ion hidróxido en el electrolito. Debido a la complejidad en el aislamiento del electrolito alcalino del dióxido de carbono se han tenido que utilizar nuevos electrolitos no alcalinos.

Las pilas de combustible alcalinas (AFC) no son ideales para usos demasiado intensos ya que pierden un poco de voltaje en razón de 15 a 50 mV. cada mil horas de funcionamiento.

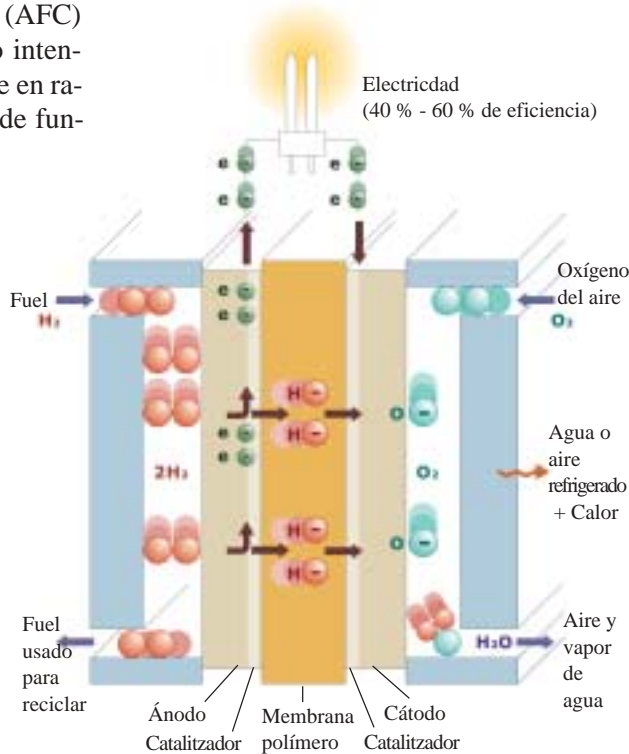
Tipos de células de combustible

A diferencia de los motores de combustión interna en los cuales según su tipología tenemos que escoger un combustible u otro, en las pilas de combustible éste es siempre el mismo y el rendimiento y las características están determinadas por el electrolito utilizado. Así, las diferentes tipologías de pilas de combustible describen el electrolito que las constituye. Entonces, existen pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC), de carbonato fundido (MCFC), de óxido sólido (SOFC) y de electrolito de polímero de mem-

brana (PEM). Estas últimas son las que aportan las ventajas más grandes para las aplicaciones domésticas e industriales, especialmente en el área del transporte.

Las células de polímero de membrana (PEM)

La primera célula de polímero de membrana fue creada a principios de los sesenta por General Electric (GE) a partir de los trabajos de los científicos Thomas Grubb y Leonard Niedrach. Se probaron para instalarlas en el programa espacial Gemini. Sin embargo, por causa de los problemas con la difusión del oxígeno a través de la membrana sólo se instalaron a las seis últimas misiones Gemini. Se trataba de una pila de combustible de 1.000 vatios. Sin embargo, las pilas PEM de GE tenían una gran limitación por la gran cantidad de platino



Detalle del funcionamiento de una célula PEM en la placa del electrodo para apreciar como fluyen los electrones.

que necesitaban como catalizador en los electrodos.

En el 1983 el geofísico canadiense, Geoffre Ballard, el químico Keith Prater y el ingeniero Paul Howard, fundaron la empresa Ballard Power. La Ballard tomó una patente de la célula de combustible que había caducado y empezaron a investigar para mejorarla con el objetivo que fuese más potente y barata. Gracias a un contrato con el ejército canadiense, la Ballard pudo desarrollar una célula de combustible con más densidad energética y con mucho menos platino. A la misma vez, redujeron su tamaño. Actualmente, la Ballard Power es la empresa líder en la fabricación de pilas de combustible PEM en un rango de potencia que va desde 1 kW. para aplicaciones domésticas hasta a 250 kW. para a usos comerciales e industriales. Una de las herramientas políticas que han contri-

buido a desarrollar las pilas de combustible ha sido el Programa de Vehículos de Baja Emisión del Gobierno de California surgido a partir de la Ley del Aire de California. Este programa establecía que a principios de 2003 el 10% de los coches vendidos en California no podían ser contaminantes (Zero Emissions Vehicles). Los coches eléctricos y con célula de hidrógeno eran los principales candidatos.

El funcionamiento de una célula de combustible de polímero de membrana

En una célula de combustible PEM se producen dos reacciones simultáneamente: una oxidación (pérdida de electrones) en el ánodo y una reducción (ganancia de electrones) en el cátodo. Estas dos reacciones llevan a cabo una reacción de oxidación-reducción (redox) total

Incertidumbres sobre las pilas de hidrógeno

- 1) La pila de hidrógeno deberá tener una aceptación en el mercado para tener éxito. Esta aceptación depende claramente del precio, la exactitud, la longevidad de la pila de hidrógeno y la accesibilidad al precio del combustible. Comparado con el precio de las actuales alternativas, como por ejemplo la ingeniería del diesel y las baterías, las pilas de hidrógeno son realmente caras. Para ser competitivas, las pilas de hidrógeno deben ser producidas con un bajo coste de material.
- 2) Desarrollo de infraestructuras para el mercado. Actualmente no existen infraestructuras en ningún sitio para este tipo de combustibles. Es por ello que nosotros debemos confiar en las actividades de las compañías petroleras y de gas para que ellos las introduzcan. Sólo si los conductores son capaces de obtener el combustible a un precio razonable, serán desarrolladas unas nuevas aplicaciones para el motor.
- 3) Actualmente una gran nombre de inversiones en pilas de combustible y en la tecnología del hidrógeno provienen de las industrias automovilísticas. Cabe decir que, si las pilas de hidrógeno no son necesarias para la industria automovilística, serán necesarias nuevas inversiones para la aplicación de la pila de hidrógeno.
- 4) Cambios en la política del gobierno podrán descarrilar el desarrollo de la pila de hidrógeno y de la tecnología del hidrógeno. Las actuales leyes y regulaciones ambientales extremadamente rigurosas, como por ejemplo el Programa de Reducción de Emisiones de Vehículos en California, ha reforzado este campo. El incumplimiento de las leyes por parte de la industria ha sido un gran impulso para el desarrollo de las estaciones generadoras de energía. Si estas leyes cambian, podría repercutir negativamente en el desarrollo.
- 5) Actualmente el platino es el componente clave de la pila de hidrógeno. El platino es un recurso natural escaso; la mayoría de sus fuentes de dónde proviene están en Sur-África, Rusia y Canadá. La escasez de platino no está prevista en el desarrollo de la pila de hidrógeno, aunque los cambios en las políticas del gobierno pueden afectar la fuente de estos elementos.

que permite la formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno en estado gaseoso.

Como si se tratase de un electrolizador, el ánodo y el cátodo se encuentran separados por un electrólito, el cual permite a los iones ser transferidos de un lado hacia el otro. El electrólito de una célula PEM es un ácido sólido incorporado en una membrana (polímero sulfonatado). El electrólito ácido sólido se encuentra saturado de agua para así facilitar el transporte de iones. Las células de combustible PEM son sensibles a la contaminación por monóxido de carbono, el cual hace perder efectividad al ánodo; por eso, para que la reacción de hidrógeno con el oxígeno del aire se produzca, éste se debe filtrar previamente. Actualmente, el coste de una célula de combustible es de unos 4.000 euros/kW. (como referencia, aproximadamente la energía eólica tiene un coste de unos 1.000 euros/kW. mientras que la energía solar fotovoltaica es de unos 6.000 euros/kW.).

La química de una pila

Las reacciones que se llevan a cabo en el interior de una pila de hidrógeno son:



En el ánodo, las moléculas de hidrógeno entran en contacto con un catalizador de platino que se encuentra en la superficie del electrodo. Las moléculas de hidrógeno se rompen y se enlazan débilmente con el platino de la superficie del electrodo (H-Pt), iniciándose así la reacción de oxidación. A continuación, el hidrógeno libera su único electrón, que viajará por el circuito exterior de la pila hacia el cátodo. El resto de protones libres presentes en la superficie del electrodo se unen con el agua para formar el ion hidronio (H_3O^+), que se desplazará hacia el cátodo a través de la membrana (electrólito), dejando libre el catalizador de pla-

Beneficios

- 1) Las pilas de hidrógeno son eficientes: ya que transforman el hidrógeno y el oxígeno directamente en electricidad y agua sin ninguna combustión durante el proceso. La eficiencia del proceso se sitúa entre el 50 y el 60%, que equivale aproximadamente al doble de la eficiencia del motor de explosión.
- 2) Las pilas de hidrógeno son limpias porque no producen ninguna emisión, sólo la producción de agua pura. Al contrario que el motor de explosión, la pila de hidrógeno no emite ni dióxido de azufre (que contribuye a la lluvia ácida), ni tampoco el óxido de nitrógeno (que contribuye a la creación del smog) ni ningún tipo de partícula contaminante.
- 3) Las pilas de hidrógeno son muy silenciosas, ya que no tiene ningún mecanismo móvil, aunque tiene un sistema de bomba y ventilador, así pues la producción de electricidad es bastante silenciosa. Muchas instalaciones, como por ejemplo los hoteles, pueden sustituir la ingeniería diesel por pilas de hidrógeno como suplemento al poder energético o bien como reservas de energía en caso de apagón.
- 4) Las pilas de combustible son modulares: esto es porque las pilas de hidrógeno de diferentes tamaños se pueden colocar juntas para conseguir la cantidad de energía necesaria. Como se ha dicho antes, la pila de hidrógeno puede producir energía en un amplio margen desde pocos vatios a unos cuantos megavatios.
- 5) Las pilas de hidrógeno no son peligrosas para el medio ambiente: esto es porque no produce productos tóxicos, ya que el único desecho del proceso es el agua (o bien agua y dióxido de carbono en el caso de las pilas de metanol).
- 6) Las pilas de hidrógeno nos dan la oportunidad de poder obtener una gran cantidad de energía a partir de una fuente sostenible.

tino para la próxima molécula de hidrógeno.

En el cátodo, las moléculas de oxígeno entran en contacto con el catalizador de platino en la superficie del electrodo. Las moléculas de oxígeno se rompen formando enlaces débiles de platino (O-Pt), iniciándose así la reacción de reducción. Cada oxígeno atómico se libera del platino para unirse con dos electrones (que han viajado a través del circuito externo) y dos protones (que han viajado a través de la membrana) para formar la molécula de agua. En este momento la reacción redox se ha completado. El catalizador de platino en el electrodo del cátodo está libre para la próxima molécula de oxígeno.

Esta reacción es exotérmica, mediante la formación de agua a través del hidrógeno y el oxígeno en estado gaseoso, tiene una entalpía de -286 kilojulios de energía por mol de agua formado. La energía que se ha generado es aprovechable para realizar trabajo y equivale aproximadamente a -237 kilojulios por mol. Esta energía es en forma de electricidad y calor.

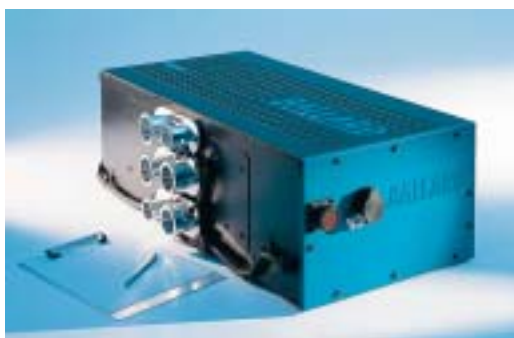
La Membrana Electrolita Polimérica (MEP)

El material utilizado como membrana o electrolito de una pila de hidrógeno es un

polímero. Las MEP son generalmente producidas en capas largas. La capa catalizadora del electrodo es aplicada en las dos caras, y recortada según las dimensiones necesarias. Una sola capa de MEP tiene un grosor de 50 a 175 micrómetros, aproximadamente igual al grosor de 2 a 7 hojas de papel.

El material más utilizado para elaborar las MEP es el nafión. Este material fue desarrollado en el 1970 por Dupont. El nafión se obtiene generando cambios al politetrafluoroetileno (PTFE), popularmente conocido como teflón, que es la base de la membrana. Estas modificaciones corresponden a cambios en el final de la cadena de teflón, a la cual se le añade un ion sulfúrico (HSO_3). Si observásemos esta molécula veríamos un conjunto de cadenas alargadas que tienen la propiedad de ser hidrofóbicas (es decir que repelen el agua) a la misma vez que tienen moléculas de sulfonados, que son altamente hidrófilas (que atraen el agua).

Para que la membrana sea realmente eficiente en el transporte de iones, es necesario que el sulfonado de la molécula absorba gran cantidad de agua. Gracias a estas regiones hidratadas, los iones de hidrógeno de los grupos del ácido sulfúrico pueden moverse libremente y otorgan a la membrana la capacidad de transferir



Pila de combustible Mark 902 de 4ª generación de Ballard Power Systems escalable de 10 kW. hasta 300 kW. Se puede apreciar los tubos por donde entra el hidrógeno y el oxígeno.



Pila de combustible de 5,5 kW. de Proton Motor Fuel Cell. Se puede apreciar los tubos por donde entra el hidrógeno y el oxígeno.

los iones hidronio desde un lado al otro de la membrana.

Pila directamente con metanol (DAFC)

Una pila de metanol también contiene una membrana de MEP. Con el objeto de poder romper los enlaces de metanol en la reacción de formación de dióxido de carbono, iones de hidrógeno y liberar electrones se añaden otros materiales al platino del ánodo. Así como sucede en la pila de hidrógeno, los electrones libres circulan del ánodo hacia el cátodo por un circuito externo y los protones son transferidos a través de la membrana electrolítica. En el cátodo los electrones libres, conjuntamente con los protones o hidronios, reaccionan con el oxígeno para formar agua.

Las reacciones que se dan en el interior de una pila de metanol son:

Reacciones d'oxidació:



Reacciones de reducció:



Reacció total:

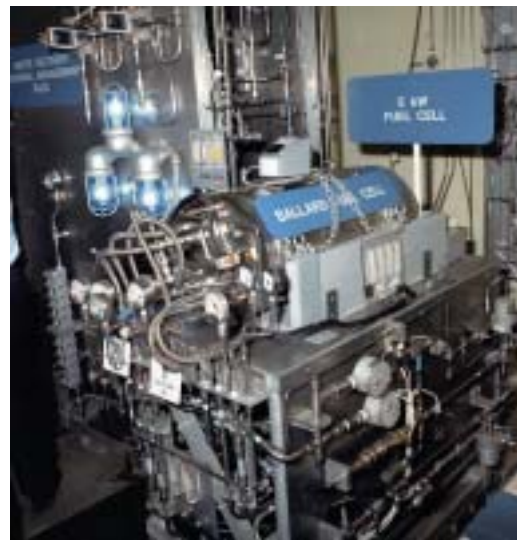


Las células de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

Aunque la experimentación con células de combustible con ácidos la hizo por primera vez William Grove en el 1842, estas células con ácidos no se consideraron una posibilidad energética. Sin embargo, en el 1961 los investigadores G.V. Elmore y H.A. Tanner describieron sus acertados experimentos con un electrólito formado en un 35% por ácido fosfórico. La crisis energética de los años setenta hizo que los investigadores del Laboratorio Nacional de Los Álamos (EUA) probasen células con ácido fosfórico. Se han instalado en autobuses con

pilas de combustible de unos 100 kW. Tienen el problema que primero se deben calentar y por ello no son idóneas para vehículos privados.

Uno de los inconvenientes para determinados usos, pero una ventaja para otros, es que las células de ácido fosfórico operan a temperaturas de entre 160 y 220°C y a la temperatura más alta toleran perfectamente hasta un 1,5% de concentración de monóxido de carbono que se puede producir como consecuencia de los electrodos. Normalmente, el hidrógeno para hacer funcionar la pila de combustible se obtiene de hidrocarburos y tiene una eficiencia del 40 al 50%, la cual se puede incrementar hasta el 80% cuando el calor disipado se utiliza en cogeneración. Las unidades experimentales que existen se utilizan con finalidades comerciales con potencias superiores a los 200 kW. Estas pilas de combustible son las que han tenido un éxito tecnológico más grande en aplicaciones comerciales y unidas a la cogeneración.



Una de las primeras células PEM de 5 kW. diseñadas por Ballard para hacer funcionar un autobús, actualmente en el museo de la NASA. Comparémosla con una de moderna (página 14).

Como en todas las células, los iones de hidrógeno emigran a través del electrolito de ácido fosfórico del ánodo hacia el cátodo. Los electrones generados en el ánodo viajan a través de un circuito externo aportando el poder eléctrico a lo largo de este camino antes de llegar al cátodo. Un catalizador de platino acelera las reacciones en los electrodos.

Célula de carbonato fundido (MCFC)

La principal ventaja de las células MCFC es que no necesita purificar el hidrógeno, debido a las altas temperaturas a las que trabaja, entre

580 y 660°C, la célula es insensible a la contaminación por monóxido de carbono. Fueron estudiadas ya en los años treinta en Suiza por Emil Baur y H. Preis.

El electrolito es de una combinación de sales alcalinas carbonatadas de litio (Li_2CO_3) y potasio (K_2CO_3) las cuales conducen los iones carbonatados (CO_3^{2-}) del cátodo al ánodo. En el ánodo de hidrógeno reacciona con los iones y producen agua, CO_2 y electrones. Los electrones viajan a través de un circuito externo aportando electricidad a lo largo de su camino hasta que no vuelven al cátodo. El oxígeno y el CO_2 se reciclan con los electrones del ánodo

El voltaje y la eficiencia de la pila

Si la pila de hidrógeno fuese totalmente perfecta para transferir la energía química en energía eléctrica, el voltaje ideal que se obtendría a 25°C y a 1 atmósfera de presión sería de 1,23 voltios. Debido a que la pila al funcionar se calienta y alcanza una temperatura de 80°C, el voltaje máximo que puede llegar a producir es de 1,18 voltios. Aún y así, existen otros factores limitantes que también reducen el voltaje que puede producir la pila. Medir el voltaje de una pila es una buena forma de valorar su eficiencia; cuando más bajo sea el voltaje, menor es la eficiencia eléctrica y más energía química se necesita para la formación de agua y transferir el calor.

Principales pérdidas que contribuyen a la disminución del voltaje de la pila

1. Pérdidas por activación: debido a la energía necesaria para iniciar la reacción como consecuencia del catalizador. Lo más positivo del catalizador es la disminución de la energía de activación necesaria para iniciar la reacción. Las formas de platino son excelentes catalizadores, aunque existen muchas investigaciones sobre materiales mejores. Un factor limitante para la potencia necesaria es la velocidad a la cual tienen lugar las reacciones. La reacción del cátodo (reducción del oxígeno) es aproximadamente 100 veces más lenta que la reacción del ánodo, entonces es la reacción del cátodo la que limita la obtención de energía.
2. El cruzamiento de combustible y las corrientes internas: es debido al combustible que cruza el electrolito, desde el ánodo hacia el cátodo sin liberar los electrones por el circuito externo, este hecho disminuye la eficiencia de la pila.
3. Pérdidas por resistencia como consecuencia de combinar resistencias de diferentes componentes de la pila. Esto incluye la resistencia de los materiales que componen los electrodos, la resistencia de la membrana del electrolito y la resistencia de las diferentes interconexiones.
4. Pérdidas de concentración (referido como «transporte de masa»): estas pérdidas son resultado de la reducción de la concentración del hidrógeno y el oxígeno en el electrodo; por ejemplo, al hacer una medida de la nueva concentración de gases cuando está inmediatamente disponible en el catalizador. Con una gran cantidad de agua en el cátodo, particularmente con corrientes altas, el catalizador se colapsa y restringe el acceso de oxígeno. Por eso es importante extraer este exceso de agua a fin de incrementar el transporte.

para formar iones CO_3^{2-} los cuales vuelven a llenar el electrolito y transfieren corriente hacia la célula de combustible. Pueden utilizarse cualquier tipo de combustible fósil como fuente de hidrógeno sin reformar, como por ejemplo el gas natural, carbón gasificado, biogás y gas sintético.

La elevada temperatura a la cual trabajan las células MCFC permite extraer el hidrógeno reformándolo tanto dentro como fuera. El catalizador más idóneo para estas células es el níquel, que es más barato que el platino. La eficiencia energética se sitúa alrededor del 60% y el 80% con cogeneración. Hay una demostración operativa de 2 MW. en California y otra de 250 kW. en la base aérea de Miramar en San Diego. El principal problema de esta tecnología es que requiere compensar la reacción del cátodo inyectando CO_2 y es más complejo trabajar con un electrolito líquido que no sólido. También se debe tener presente que los carbonatos fundidos son muy corrosivos y dificultan su durada.

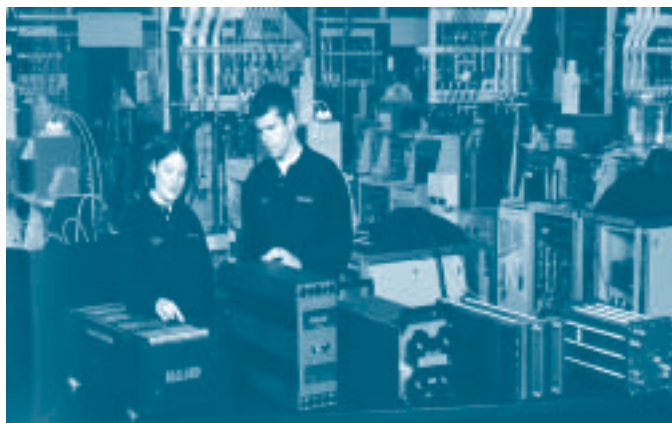
Célula de combustible de óxido sólido (SOFC)

Las células de combustible de óxido sólido se consideran una de las tecnologías más atractivas para generar electricidad a partir de combustibles fósiles. Son sencillas, muy eficientes y toleran bien las impurezas e incluso, internamente pueden extraer hidrógeno de los hidrocarburos. Por otra parte, el monóxido de carbono, que en otros tipos de células es un problema, en éstas es un combustible, este hecho las hace muy idóneas para utilizar combustibles como el gasoil, alcohol o carbono gasificado. Tampoco necesitamos un compresor

para inyectar el aire (oxígeno) por los efectos de la alta temperatura. En cambio, tienen la desventaja que necesita un tiempo para calentarse que además consume combustible y las hace poco interesantes para aplicaciones como los vehículos de transporte, salvo que estos funcionen continuamente.

El electrolito es una cerámica hecha de una mezcla de óxido de circonio y óxido de calcio que forma un retículo cristalino. La temperatura de trabajo es de 1.000°C y esto hace que los iones de oxígeno con carga negativa emigren a través del retículo cristalino. Existen dos diseños de células SOFC: uno hecho con discos cerámicos planos y otro con forma de tubos. Cuando inyectamos el hidrógeno a través del ánodo la corriente de cargas negativas de oxígeno se mueve a través del electrolito y oxida el fuel. En el diseño tubular del cátodo, el electrolito y el ánodo se encuentran dentro del tubo cerámico.

El electrolito sólido recubre las dos caras del que podría ser una especie de electrolito poroso. En estas altas temperaturas los iones de oxígeno (de carga negativa) atraviesan la rejilla cristalina. Cuando el fuel gasificado que contiene hidrógeno pasa a través del ánodo, un



El poder energético de las pilas de combustible no ha parado de crecer. De izquierda a derecha una muestra evolutiva de los modelos. El 1989 era de 100 vatios/litro de hidrógeno; el 1996 ya era de 1.100 vatios/litro y en la primavera de 2000 consiguió 1.300 vatios/litro.

flujo de cargas negativas de iones de oxígeno atraviesa el electrólito y oxida el fuel. La eficiencia es de un 60%, pero es recomendable aprovechar el vapor y producir electricidad en una turbina para así incrementar la eficiencia hasta el 80%.

El hecho de trabajar a esta elevada temperatura se puede utilizar cualquier combustible fósil gaseoso sin tener que reformar, pero se debe extraer el azufre. La contaminación que produce con dióxido de carbono es pequeña. El hecho de que las pilas SOFC, al igual que las MCFC, se puedan utilizar en sistemas de cogeneración las hace muy atractivas para instalaciones comerciales e industriales. Las pilas de cerámica permiten diseños muy compactos y de fácil mantenimiento.

Las unidades hasta ahora construidas son de potencia superior a los 100 kW. con una eficiencia del 55%. Destaca un proyecto conjunto de Siemens y Westinghouse con una planta de 1 MW. con cogeneración. Otras empresas como la Global Thermoelectric trabajan con una célula hecha de hojas cerámicas planas que permiten trabajar a temperaturas de menos de 800°C. Sin embargo, esta tecnología todavía no es lo suficientemente madura.



Autobús de hidrógeno equipado con una célula de combustible de Proton Motor Fuel Cell. En términos de energía 9,5 kg de hidrógeno equivalen a 25 kg. de gasolina. Para almacenar 25 kg de gasolina se necesita un depósito de un peso de 17 kg, mientras que los 9,5 kg necesita un depósito de 55 kg. El hidrógeno es 1,33 veces más eficiente que la gasolina y contiene 4 veces más energía por volumen que la gasolina.

Aplicaciones de las pilas de combustible

Una aplicación importante de las pilas de combustible son los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI). Estos sistemas son muy idóneos para hospitales, empresas e incluso, para suministrar electricidad en caso de un corte en el flujo eléctrico. Así por ejemplo, una pila de combustible de 250 kW de potencia puede suministrar energía a unos 50 hogares. Actualmente, estas unidades incorporan un procesador de gas natural que lo transforma en hidrógeno y libera dióxido de carbono. En un futuro cercano, las pilas de combustible podrán ser alimentadas directamente por hidrógeno sin necesidad de un precursor fósil. Una aplicación muy interesante son los sistemas de protección o SAI para los servidores informáticos. En estos momentos se comercializa una unidad de 1 kW. Una vez más se debe advertir que las pilas de combustible deben de ir asociadas a equipos o instalaciones diseñadas para que sean lo más eficiente posible.

Estos sistemas pueden incorporar la cogeneración de calor a parte de la electricidad. Entonces, su eficiencia energética puede sobrepasar el 85%. Si comparamos estos ingenios con las baterías convencionales debemos destacar que las pilas de combustible contienen por unidad de volumen una densidad energética de dos veces y media a la de una pila de ion de litio o hasta de tres veces la de una batería convencional de plomo-ácido. Si esta relación la comparamos con la densidad de energía respecto al peso, resulta que las pilas de combustible pesan 6 veces menos que una batería de plomo-ácido. En otras palabras, que duran mucho más que una batería convencional. Por otra parte, una pila de combustible suministra energía de manera ininterrumpida mientras se le aporte hidrógeno.

El hidrógeno en los medios de transporte

Las pilas de combustible son una alternativa segura, simple, silenciosa y no contaminante a la misma vez que económicas. Por eso se plantean como una alternativa viable para sustituir en los motores de combustión interna de gasolina y diesel. Se ha comprobado que las pilas de combustible actuales aplicadas a los vehículos domésticos pueden tener una durada para recorrer más de 400.000 km. o el equivalente a unas 10.000 horas o hasta un millón de kilómetros o 25.000 horas en autobuses, camiones, barcos y locomotoras. Así pues, en cuanto a la durada, las pilas de combustible son competitivas y no tienen ningún problema. Sin embargo, estas pilas necesitan convertir la energía eléctrica en energía mecánica, mientras que en los motores de combustión esta conversión es directa. En contrapartida no necesitan mantenimiento, son silenciosas, no emiten prácticamente contaminantes y tienen una alta eficiencia, de hasta el 35%, mientras que la de los motores de combustión interna no sobrepasa el 25%.

El Programa de Vehículos de Emisión Cero promovido por el Estado de California estableció que a partir de 2003 un 10% de los automóviles fuesen de emisión cero (ZEV). Los vehículos equipados con pilas de combustible de hidrógeno cumplen esta condición. En el caso de los coches, por ejemplo, compañías como Daimler-Chrysler con el modelo Ncar o Honda con el FCX con pila de hidrógeno no emiten óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono o partículas típicas de los modelos con motor de combustión interna. En estos mo-

mentos hay diferentes modelos de autobuses equipados con pilas de combustible PEM que ya se han empezado a introducir en diferentes ciudades europeas.

Infraestructuras para el hidrógeno

Una de las claves para el desarrollo de la economía del hidrógeno es la disponibilidad de infraestructuras para el almacenamiento, transporte y distribución. Actualmente, prácticamente en todo el planeta podemos hacer llegar combustibles fósiles ya sean en forma líquida o gaseosa. Así pues, el reto es si queremos invertir para renovar estas infraestructuras del petróleo dentro de una economía obsoleta (o que en todo caso tiene una fecha de caducidad) por las del hidrógeno, las cuales representan una nueva manera de entender la disponibilidad energética. La tecnología actual nos pone al alcance de la mano el poder implantar el hidrógeno como vector energético. Sólo hace falta comprender que posiblemente no habrá un futuro saludable si no es con fuentes de energías limpias.



Vehículo de hidrógeno de la casa Honda decido en el 2003 al gobierno californiano para demostrar la viabilidad de esta tecnología. Equipado con una pila de combustible Ballard de 78 kW, una autonomía de 355 km y un depósito de 3,75 kg de hidrógeno a 350 bares.

Sistemas de almacenamiento

El hidrógeno se puede almacenar en estado líquido y gaseoso y también incluido en determinados metales en la forma química de hidruro.

Hidrógeno comprimido o presurizado (CL₂)

Hablamos de hidrógeno presurizado cuando se almacena a presiones más grandes de las condiciones normales. Hoy, una de las formas más habituales es con tanques hechos de fibra de carbono rodeados con una capa de aluminio para soportar presiones de 700 bares (el aire comprimido se almacena a presiones de 300 bares). Actualmente, hay hidrogeneros que pueden suministrar a presiones de entre 250 o 400 bares y recargar los depósitos de un vehículo en menos de 4 minutos. Cuando hace falta almacenar grandes cantidades de hidrógeno se hace a presiones más bajas (unos 50 bares) en cavidades subterráneas. Este es el sistema más económico para grandes cantidades de millones de Nm³ (acrónimos de metros cúbicos normales, es decir a temperatura de 0°C y una presión de 1 atmósfera).

Hidrógeno líquido

El hidrógeno líquido es la forma que presenta una densidad energética más alta en proporción al volumen, unas 800 veces más denso que en estado gaseoso. La licuefacción se produce a -235°C. Es un sistema que requiere un importante gasto energético. Por eso se debe conservar en los llamados criotankes. El criotankes es un artefacto que parece más interesante para las aplicaciones móviles, ya que necesita menos espacio. Sin embargo, tiene el problema que presenta pérdidas por evaporación del orden de 0,4% en los tanques aislados al vacío y del 1 al 2% en los tanques más gran-

des. Un autobús con una capacidad de energía equivalente a unos 50 litros de gasolina o el equivalente a 450 kWh. necesita sólo de tres tanques de 190 litros. Para recargar los depósitos con hidrógeno líquido no es necesario más de 15 minutos. Este sistema es el que puede tener más éxito a pesar de su elevado coste de mantenimiento en criotankes. El prototipo de vehículos de BMW 745h va equipado con un motor de combustión interna que quema el hidrógeno líquido. El resultado es un vehículo que con hidrógeno pueda recorrer unos 300 km. y con gasolina 650 km. y puede quemar tanto gasolina como hidrógeno.

Almacenaje en hidruros metálicos

El hidrógeno tiene la propiedad de poder reaccionar con diferentes metales o compuestos intermetálicos formando el compuesto conocido como hidruro. En esta forma química puede almacenar más hidrógeno por unidad de volumen que el hidrógeno líquido. Debido a que en condiciones idóneas de temperatura y presión esta reacción es reversible, una determinada masa metálica puede ser cargada y descargada un número prácticamente ilimitado de veces y, por lo tanto, se puede utilizar como depósito de almacenamiento sólido de hidrógeno.

Esta forma de almacenamiento tiene la



Célula de combustible de 250 kWh. alimentada con gas natural en fase experimental instalada en Berlín, de la Ballard Power Systems. Una célula consume 0,025 litros de hidrógeno por kWh. generado.

ventaja que se puede hacer a bajas presiones (menores de 1,01 atmósferas) y que es un sistema muy seguro. En el caso de producirse una pérdida inesperada de oxígeno, el sistema reacciona inhibiendo la liberación adicional de gas. Esta forma de conservar el hidrógeno requiere un material absorbente que puede ser del 7% del peso de hidrógeno total. En general, se trata de un sistema pesado y que no es interesante para aplicaciones móviles. Se calcula que para disponer de unos 30 Nm³ (1Nm³ equivale a 0,34 litros de gasolina, es decir, el equivalente a 10 litros de gasolina o 90 kWh.) el peso puede ser de entre 230 y 460 kg. y volúmenes de 60 a 90 litros. Un sistema optimizado sólo permite un almacenamiento de alrededor del 1,8% del peso total.

El almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros es especialmente útil y conveniente en sistemas energéticos aislados y con la energía eléctrica se puede generar con el viento, el Sol o pequeñas centrales hidroeléctricas. Las pilas de hidruro son un sistema típico de los submarinos.

Los nanotubos de carbono

Hoy, una de las tecnologías más prometedoras es la de los nanotubos de carbono y uno piensa que podría ser la forma de al-



Sistema SAI para ordenadores de 1 kW. alimentada con bombonas de hidrógeno y comercializada con el nombre de AIRGEN.

macenar el hidrógeno en el futuro. El sistema, todavía en pruebas, se basa en el hecho que se puede almacenar el hidrógeno en tubos microscópicos, en nanotubos de carbono de poco más de un nanómetro de diámetro (0,000001 milímetros) hechos de estructuras de grafito. Este sistema puede permitir almacenar densidades del doble que las que actualmente se obtienen en tanques con hidrógeno líquido.

Sistemas de transporte

Actualmente, hay tres tecnologías para hacer llegar el hidrógeno al usuario. En el mundo ya hay diversas infraestructuras preparadas para distribuir el hidrógeno ya sea como líquido o como gas comprimido.

El transporte del hidrógeno líquido (LH₂)

Este sistema es el más utilizado para pequeñas cantidades. Se utilizan camiones con tanques de 5.000 litros. El principal problema de este tipo de transporte es que es rentable sólo en distancias medias a causa de la evaporación que sufre el hidrógeno líquido.

Transporte del hidrógeno comprimido (CGH₂)

El hidrógeno comprimido se transporta en camiones con tanques a una presión de 200 bares con capacidades de 2.400 a 3.600 Nm³. Sin embargo, mientras que con un camión se pueden transportar hasta 30.000 kg. de gasolina (el equivalente a 399 MWh.) lo máximo que coge de hidrógeno son 3.600 kg. (el equivalente a 120 MWh.).

Transporte a través de gasoductos

También se puede transportar a través de gasoductos preparados para ello. Debido a que

el hidrógeno tiene una densidad menor que el gas natural, se puede bombear 3 veces más flujo que si fuese gas natural. En Alemania ya hay 208 km. y 400 km. entre Francia y Bélgica.

Seguridad e información

Uno de los tópicos más extendidos es la peligrosidad del hidrógeno y se cita la explosión de 1937 del globo zepelín Hindenburg, que utilizaba hidrógeno como complemento del fuel, al aterrizar a Lakeshurst (EUA). Sin embargo, se sabe que la causa del incendio, en el cual murieron 36 personas, no fue la explosión del hidrógeno sino un incendio de la tela del globo por una chispa de electricidad estática. A finales de los años veinte la Zeppelin Company propuso mezclar 1 m³ de hidrógeno por cada kilo de fuel utilizado para producir más energía y, por lo tanto, otorgar más velocidad a sus aeronaves y así reducir la travesía atlántica a 2,5 días. Sin embargo, este accidente fue ridículo si lo comparamos con el choque e incendio de dos Boeings 747 en el aeropuerto de Los Rodeos (Tenerife) el 27 de marzo de 1977 que causó la muerte de 583 pasajeros. Curiosamente, el accidente del Hindenburg traumatizó la sociedad de la época sobre el uso del hidrógeno (sin ser el causante, tal y como han demostrado investigaciones actuales), cosa que no ha pasado con el petróleo, aún y las tragedias que han causado, algunas de las dantescas como el citado accidente del aeropuerto de Tenerife.

Actualmente, tenemos bastante conocimiento sobre el comportamiento de este gas como para que se pueda manipular, almacenar y transportar con absoluta seguridad. En el peor de los casos un accidente de coche con hidrógeno sólo causaría una liberación inofensiva de hidrógeno a la atmósfera.

La economía del hidrógeno

Por primera vez en la historia de la humani-



Comparación entre un incendio en un coche de hidrógeno en la izquierda y uno de gasolina en la derecha. Un minuto después del incendio en el de la izquierda el hidrógeno sale quemando y en el de la derecha la gasolina continua quemando. A los 100 segundos en el coche de hidrógeno el depósito está vacío y no se ha quemado, mientras que el de gasolina se incinera.

dad tenemos en nuestro alcance una forma de energía omnipresente. El tiempo que tardemos en conseguir este nuevo estado socioeconómico basado en una fuente de energía democrática dependerá de la firmeza para emanciparnos de los combustibles fósiles y de abandonar la creencia que el petróleo barato es todavía abundante. El hidrógeno puede llegar a ser tan barato como lo son ahora los teléfonos móviles o los ordenadores personales. Tenemos una oportunidad única para dar un cambio radical a la civilización humana.

Generación distribuida

La expresión generación distribuida hace referencia a la existencia de un conjunto de pequeñas instalaciones generadores de electricidad situadas cerca del usuario final y que pueden funcionar de manera autónoma y alimentar la red. Actualmente, la tecnología utilizada en la generación distribuida son las microturbinas de gas. Este sistema de librar la electricidad no es demasiado apreciado por las grandes compañías que continúan ancoradas en el modelo de grandes centrales energéticas

¹ Las ideas de este apartado se inspiran en los capítulos 8º y 9º del libro de Jeremy Riffkin *La economía del hidrógeno*.

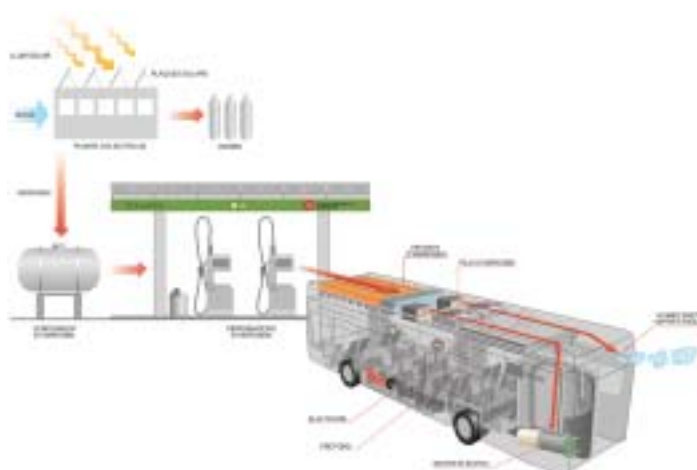
alejadas de los grandes núcleos consumidores y transportadas por una gran red de alta tensión. Este sistema centralizado tiene numerosas pérdidas en el transporte y mantiene la oligarquía de las grandes compañías.

Ahora bien, la dependencia de las fábricas y de la sociedad en general ha empezado a mostrar que la única fórmula para hacer frente a los cortes de suministro eléctrico es integrar centros productores dentro de la red y cercanos al consumidor. Las pilas de combustible se perfilan como la tecnología más idónea a medio término. La mejora de la calidad del suministro eléctrico tiene cada vez más un mercado mayor. La liberalización del mercado eléctrico en enero del 2003 podría acelerar generación distribuida. Las energías renovables y el hidrógeno pueden tener un papel importante. La cogeneración, es decir, aprovechar la producción de energía en forma de calor para fabricar electricidad hace aumentar enormemente la eficiencia de los sistemas energéticos. Así, mientras una planta de ciclo combinado puede alcanzar el 50% de eficiencia, con cogeneración podría llegar al 80%. Sólo hace falta instalarlas cerca de un sector industrial y de la población que necesite calor en sus procesos. La planta eléctrica de ciclo combinado prevista en la desembocadura del Besós podría ser muy útil para suministrar agua caliente en el área metropolitana de Barcelona y a las fábricas del sector. Desgraciadamente, se malgastarán millones de kWh. de energía aprovechable ya que el diseño no incluye la cogeneración.

La red energética del hidrógeno

Las verdaderas revoluciones siempre van acompañadas

de tecnologías de la comunicación. La era industrial fue posible gracias a la existencia de la imprenta. Actualmente, Internet i la World Wide Web podría ser el vehículo para promocionar la generación distribuida y las pilas de hidrógeno a una revolución en el sistema energético mundial basado en la economía fósil y nuclear. La conexión de pequeñas centrales basadas en pilas de combustible i energía solar en viviendas, oficinas o fábricas podría permitir crear una red de producción suficiente para alimentar las necesidades de una ciudad o una área metropolitana. La experiencia de Internet funcionando con millones de servidores interconectados podría ser un precedente para aplicar esta filosofía al sistema energético mundial. En el desarrollo de Internet, de seguida se demostró que era mucho más costoso tener superordenadores que no trabajar con una batería de pequeños ordenadores, económicos y fáciles de mantener. Muchos ordenadores juntos hacían la faena con más precisión y eficiencia que no los macroordenadores. Así pues, la experiencia de Internet tiene un notable paralelismo entre las megaplantas eléctricas actuales y las posibilidades que dibujan las pilas de combustible. En el futuro miles de pilas de



La estación de recarga solar de los autobuses de hidrógeno de Barcelona es un buen ejemplo de las posibilidades de las energías renovables.



Transporte de hidrógeno líquido criojénico. Este sistema es complejo y tiene pérdidas, de momento inevitables. Tanques destinados a los cohetes Ariane.

combustible podrían suministrar la misma electricidad que una planta nuclear de 1.000 MW.

Se deben establecer nuevas reglas en el uso y el acceso a la red eléctrica. Nos podemos aprovechar del desarrollo de la informática como herramienta de comunicación y gestión. Desgraciadamente, la experiencia de la cogeneración, que se puede considerar una ex-

periencia de generación distribuida, ha sido capada con contundencia por los grandes monopolios energéticos. Impedir la rentabilidad de la cogeneración es una tontería si tenemos en cuenta la inestabilidad del actual sistema basado en una red tan compleja como la de la alta tensión, llena de pérdidas y con notable impacto de contaminación electromagnética.

Otro factor que podría acelerar la generación distribuida con hidrógeno es la introducción del coche con pilas de combustible. En el mundo hay 750 millones de vehículos en las carreteras que consumen el 20% de la energía primaria global y, lógicamente, son responsables de cerca del 20% de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera planetaria. Las pilas de hidrógeno no producen gases tóxicos y, debido a que un vehículo se pasa cerca del 90% del tiempo estacionado, en realidad tenemos una central eléctrica sobre ruedas con una capacidad de generación de 20 kW.

La transición hacia los coches con pilas de combustible nos pone al alcance un ingente potencial de producción energética ya que lo

Reflexiones energéticas

La demanda media de carne de una familia de 4 personas propicia el consumo de 984 litros de combustibles fósiles que cuando se queman liberan 2,25 toneladas adicionales de CO₂, la misma cantidad que un coche durante 6 meses de funcionamiento normal.

Un barril de petróleo (158,9 litros) permite producir gasolina para conducir unos 300 km. con un coche de tamaño medio, gasoil para recorrer 64 km. con un camión de gran tonelaje lleno y lubricante para elaborar más de 1 litro de aceite sintético de motor.

En el 1986 se necesitaban 16 g de platino por kilovatio producido, actualmente se necesitan sólo 1,6 g. La producción mundial de platino es de unas 160 toneladas (el 80% extraídas de Sudáfrica). ¿Cuánto platino se necesitaría si los 1.000 kWh./habitante/año de consumo en electricidad de los Catalanes se hiciesen con pilas de combustible?

La eficiencia de la célula de combustible

La membrana de intercambio protónico de un polímero, el nafión parecido al Goretex utilizado para fabricar prendas de montaña y deportiva. El voltaje teórico que aportaría sería de 1,23 voltios (que es el voltaje mínimo para descomponer el agua en la electrólisis). Actualmente, la máxima corriente por superficie es de 2 amperios/cm². En la práctica por cada célula se obtienen entre 0,6 y 0,9 voltios de corriente continua. Para obtener voltajes más grandes es necesario conectar varias células. Debido a que la energía química se convierte directamente en electricidad, la eficiencia de una célula de combustible es de un 50%, mientras que un motor de combustión interna, el cual está sometido al principio de Carnot, no supera el 30% y normalmente se queda entre el 15 y el 20%.

podemos conectar a la red eléctrica de casa o de la oficina mientras el vehículo está parado. Se calcula que crear la infraestructura necesaria para producir y distribuir el hidrógeno en grandes cantidades puede tener un coste superior a los 100.000 millones de dólares. Aproximadamente igual al precio calculado de una guerra como por ejemplo la de invadir Iraq.

Pero, hay otras alternativas para propiciar una transición hacia el hidrógeno. Una posibilidad es que las pilas de combustible no se implanten primero masivamente en los coches sino en las viviendas y las oficinas para producir hidrógeno en momentos de bajo consumo. Sea como sea, tenemos en nuestras manos las herramientas y los conceptos para hacer una gran revolución, como lo fue la introducción del vapor en el siglo XIX. La ventaja del hidrógeno es que no comporta el riesgo ambiental del carbón o el resto de los combustibles fósiles.

Cuando la humanidad se lo propone es capaz de batir sus propios récords. Debemos darnos cuenta que la economía de Internet se ha

creado en menos de 10 años. Es evidente que la experiencia de la World Wide Web ha demostrado que democratizar la información no está exenta de peligros y que los grandes trustos hacen lo posible para segar la libertad de los canales de la información. Una prueba de esto es la desaparición legal del intercambiador de música Napster. Pero, en esta batalla, también hay el éxito creciente del sistema operativo de software libre Linux el cual demuestra que otro mundo es posible. En todos los cambios hay nubes oscuras y el paso hacia la economía del hidrógeno no será la excepción. Sin embargo, hace falta valorar la experiencia de las comunidades civiles como por ejemplo las CSO (Civil Society Organizations) capaces de utilizar Internet para unir intereses de millones de personas (con éxitos tan notables como abolir el uso de las minas antipersonas, defender los derechos de las mujeres o proteger el medio ambiente). Internet es el escenario donde se debe democratizar el uso racional de la energía.

Ahora sólo hace falta tomar consciencia,

Barcelona apuesta por el hidrógeno

La ciudad de Barcelona participa juntamente con diferentes ciudades europeas del proyecto CUTE (Transportes Urbanos Limpios por Europa) el objetivo del cual es el desarrollo de autobuses alimentados con hidrógeno. Por ello, incorporará en otoño de 2003 tres autobuses de hidrógeno a su flota para hacer las pruebas oportunas y descubrir la opinión de la ciudadanía. Sin embargo, esta apuesta tiene como objetivo final conseguir un vehículo de transporte no contaminante, silencioso y de energía limpia.

Para el suministro de hidrógeno Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB) dispondrá de una planta fotovoltaica con la cual generará por hidrólisis del agua, hidrógeno para las pilas de combustible que alimentarán los autobuses de hidrógeno. Esta será la primera estación de producción de hidrógeno en Europa que utilizará la energía fotovoltaica para su funcionamiento, la cual cuenta con la experiencia internacional de la empresa BP Solar.

La autonomía de los autobuses fabricados por Mercedes Benz será de entre 200 y 250 km. con una velocidad máxima de 80 km./h y una capacidad para 70 pasajeros. Los autobuses con pila de combustible que alimenta un motor eléctrico es una alternativa a los vehículos eléctricos alimentados por baterías convencionales porque pesan menos y tienen mayor autonomía.

La apuesta de Barcelona tiene un coste de 3,75 millones de euros y quiere disponer de 3 vehículos de hidrógeno en su flota. A la misma vez, conjuntamente con Madrid, Amsterdam, Estocolmo, Hamburgo, Stuttgart, Londres, Luxemburgo, Port y Reykjavic, se convertirá en una ciudad de referencia para la tecnología del hidrógeno.

apostar por la tecnología de las pilas de combustible y organizarse colectivamente para defender el derecho a generar electricidad de forma distribuida. A lo mejor todos estos conceptos nos parecen utópicos. La economía del hidrógeno y la implantación de una red energética descentralizada y democrática puede servir para redistribuir los asentamientos humanos adaptándolos a la bioregiones y así favorecer una convivencia más armónica con el entorno. “Entrelazar las comunidades humanas con las biocomunidades genera un nuevo y profundo sentido de seguridad, inseparable de la salud y el bienestar de la Tierra. La creación de una arquitectura económica y social que constituya un microcosmos de la propia filosofía de la Tierra abre un nuevo mundo lleno de posibilidades de natura afirmativa y regeneradora para nuestra especie”.

El impacto ambiental del hidrógeno

En el futuro, si la economía del hidrógeno se desarrolla a partir de la energía solar las emisiones de este gas y del vapor de agua no

alterarán los ciclos y balances naturales. Esta es la principal ventaja de apostar por la tecnología del hidrógeno. Sin embargo, se debe considerar las alteraciones que se podrían producir en el ciclo del agua.

Según los científicos, las emisiones de vapor de agua y de hidrógeno pueden ser más pequeñas que las que actualmente causan los combustibles fósiles y la energía nuclear, debido a que puede representar sólo un 0,005% del total del ciclo del agua. Ahora bien, estos resultados no incluyen las aplicaciones que se puedan hacer de la combustión del hidrógeno a la estratosfera por parte de aviones y la industria espacial. La baja concentración de vapor de agua a niveles estratosféricos (a unos 11 km., un espacio aéreo muy idóneo para consumir poco combustible y tener un vuelo tranquilo) en caso de utilizar el hidrógeno en la aviación podría causar incrementos de la densidad de radiación solar de hasta 0,75 W/m². Las emisiones futuras cuando alcancen niveles de pérdidas del 2 al 3% serían de la misma magnitud que las de combustión incompleta de hidrocarburos.

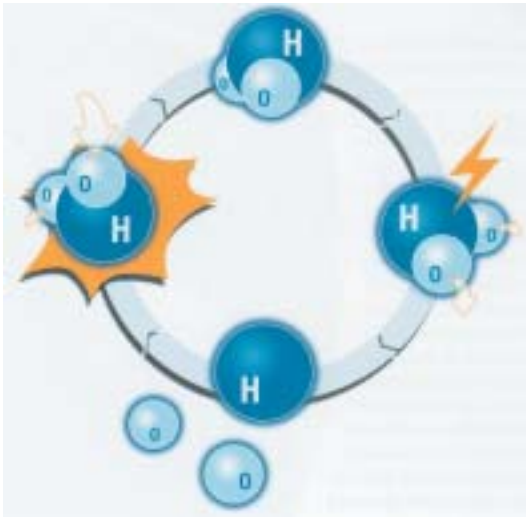


El hidrógeno estelar hace de reserva para formar nuevas estrellas. Esta fotografía de la nebulosa Águila (M16) a 7.000 años luz fotografiada por el telescopio espacial Hubble nos muestra que el universo tiene en el hidrógeno su principal fuente de energía. Una buena imagen para inspirar el futuro de la economía del hidrógeno en la civilización humana.

Si queremos contribuir a hacer posible la revolución de la economía del hidrógeno nos hace falta tomar consciencia de las posibilidades que ofrece este vector energético. Experimentar con el hidrógeno desde la escuela es esencial. Las pilas de combustible son, actualmente, la mejor tecnología para proveer el planeta de una fuente de energía no contaminante y que puede contribuir a democratizar la sociedad del siglo XXI.

Hagamos hidrógeno

Electrólisis



A pesar de que el hidrógeno es el elemento que forma un 75% del Universo no acostumbra a estar en estado puro y libre. Una de las sustancias básicas donde se encuentra el hidrógeno es el agua. Así que el primer paso para descubrir este gas es provocar que se desprenda de este líquido y se libere en forma de gas. El proceso que lo hace posible se llama electrólisis y fue descubierto en el 1796 por el científico inglés Cavendish. Por eso, el primer paso para adentrarnos en el conocimiento de las posibilidades del hidrógeno es tener la evidencia de este elemento.

Para hacer este experimento necesitamos: un recipiente de cristal, si puede ser un bote de laboratorio de 400 a 1.00 ml. lleno de agua destilada, un poco de cable eléctrico, dos barras de metal, si puede ser de cobre, y una pila plana de 6 voltios.

La separación del oxígeno se produce cuando sumergimos las dos barras de metal en el re-

recipiente de agua y cada una de ellas las conectamos a los polos positivos y negativos respectivamente de la pila. Así que empieza a pasar la electricidad podremos observar como se forman las burbujas alrededor de la barra. En la barra que está conectada al polo negativo de la pila (que llamaremos cátodo) las burbujas que se hacen son hidrógeno y en la barra conectada al polo positivo de la pila (el ánodo) las burbujas son de oxígeno. Haya aparatos de laboratorio en los cuales podríamos recoger estas burbujas de gas.

La electrólisis es el experimento contrario del que pasa en una célula de combustible donde se produce la reacción inversa, la cual consiste en inyectar hidrógeno gas que se une al oxígeno para formar agua y desprender energía. Energía que podemos aprovechar en forma de electricidad. En nuestro experimento de electrólisis le podemos añadir entre el polo positivo de la pila y el ánodo una bombilla. Si después añadimos sal de cocina al agua del recipiente descubri-

mos que la bombilla se enciende. La sal disuelta es una mezcla de iones positivos (de sodio) y negativos (de cloro) que hacen de transporte para otras cargas. Este papel es el que definimos como el del electrólito. La sal antes de disolverse en el agua no puede transferir cargas positivas ni negativas porque se trata de una sustancia cristalina muy estable. Cuando la sal se disuelve puede transferir electrones fácilmente y estos influyen, razón por la cual la bombilla se ilumina. En una célula de combustible se produce electricidad que ioniza el hidrógeno y el oxígeno. La estructura atómica del hidrógeno y el oxígeno cambia debido al proceso de ionización, es decir, cuando se dispone de una sustancia que libera cargas positivas y negativas, que es el que se vuelve en una célula de combustible, es decir, que se crea electricidad a través de un medio químico.

De hecho, este es el proceso que tiene lugar en el interior de una pila seca. En una célula de combustible, a diferencia de una pila seca, se produce electricidad mientras suministramos la

Vocabulario básico

Ánodo: polo negativo de un electrodo.

Cátodo: polo positivo de un electrodo.

Célula de combustible: fuente de generación de energía mediante la electroquímica.

Cogeneración: producción de electricidad aprovechando el vapor de agua que se necesita para determinados procesos industriales.

Corriente alterna: electricidad en la cual la intensidad y la tensión varían de forma periódica.

Corriente continua: electricidad en la cual la intensidad y la tensión se mantienen constantes.

Electricidad: flujo de electrones en un circuito, generalmente con un conductor metálico.

Electrólito: sustancia que permite el intercambio de electrones entre sustancias en presencia de energía eléctrica.

Electrólisis: proceso químico por el cual haciendo pasar corriente eléctrica a través de una solución se transfieren electrones hacia el electrodo positivo.

Electroquímico: sistema de conversión de la energía química en energía eléctrica.

Hidrógeno: elemento químico que contiene un protón y un electrón.

Ionización: proceso que hace perder o ganar electrones para formar iones positivos o negativos.

Membrana: sustancia que permite el paso de una sustancia e impide el paso de otras.

Oxidación: proceso químico que aporta electrones.

Pila de combustible: conjunto de células de combustible unidas entre ellas para incrementar el voltaje que se genera.

Polímero: sustancia sintética o natural compuesta de moléculas simples repetidas y enlazadas entre ellas.

Reducción: proceso químico que produce absorción de electrones.

Voltaje: medida del potencial eléctrico en un cir-

sustancia que lleva electrones. En cambio, en una pila seca la reacción química que produce electricidad se va agotando a medida que le extraemos los electrones porque no hay la posibilidad de añadir un elemento que le aporte más. En una célula de combustible el electrólito permite viajar a los electrones mientras se los suministramos. Los electrones los aporta el hidrógeno gas cuando entra en contacto con el electrólito.

Otra experiencia que podemos extraer del experimento de la electrólisis y la ionización es sustituir la barra de uno de los electrodos por una de un metal diferente. Por ejemplo, mantenemos el cobre en el cátodo y colocamos una barra de níquel en el ánodo. Cuando el agua es salada y hacemos circular la electricidad de la pila observaremos que ésta viaja del ánodo al cátodo. El resultado es que podremos observar una deposición de lunares metálicos que no son nada más que iones de níquel que con gran cantidad de energía recubriría todo el cobre. En la industria este es el proceso de cromar los metales. Comprender bien estos procesos desde la experimentación contribuye a comprender mejor el funcionamiento de la pila de combustible.

Una visita obligada

En la cochera de autobuses de la Zona Franca de Transportes Metropolitanos de Barcelona



se instalará una estación generadora de hidrógeno mediante hidrólisis del agua. La energía para generar el hidrógeno la suministrará una instalación de placas solares fotovoltaicas. Esta estación de hidrógeno constituye un recurso pedagógico para comprender a la práctica el potencial de la economía del hidrógeno. El teléfono de Relaciones Externas de TMB es el 932 987 000.

Kits pedagógicos de hidrógeno

La Fundación Tierra comparte la visión que el futuro de la energía de la humanidad no puede ser sucio como el que nos ha traído durante más de un siglo de petróleo. La clave del futuro pasa por dos nuevos elementos que son limpios como es el silicio y el hidrógeno. El silicio cristalino es la base de la captación de la energía solar a través del efecto fotovoltaico. El hidrógeno es el mejor vector energético para generar electricidad. Se debe experimentar el poder de esta combinación para entusiasmarse con la energía del futuro. Sólo si tocamos el corazón de los niños con el hidrógeno, con experimentos, jugando, podremos pensar en un futuro menos negro que el que tenemos siendo dependientes de los combustibles fósiles. Por eso, creemos fundamental la difusión de los kits pedagógicos existentes en el mercado. Los kits de hidrógeno son como los “mecanos” con los que jugábamos los niños de los sesenta. Por eso, desde la tienda virtual Biohabitat de la Fundación Tierra (Teléfono 936 011 636) facilitamos la obtención de los kits pedagógicos de hidrógeno más interesantes.

Construction 30 d’EiTech

Esta maleta es un “mecano” que permite construir 3 ingenios hechos de piezas metálicas. Una bicicleta, una noria y un juego de engranajes que se mueven por la fuerza del hidrógeno. La célula de combustible se alimenta una pequeña bom-

ba de 0,045 litros de hidrógeno a una presión de 0,5 bares que permite obtener 930 milivoltios en una célula de combustible que proporciona de 0,4 a 1 voltio.

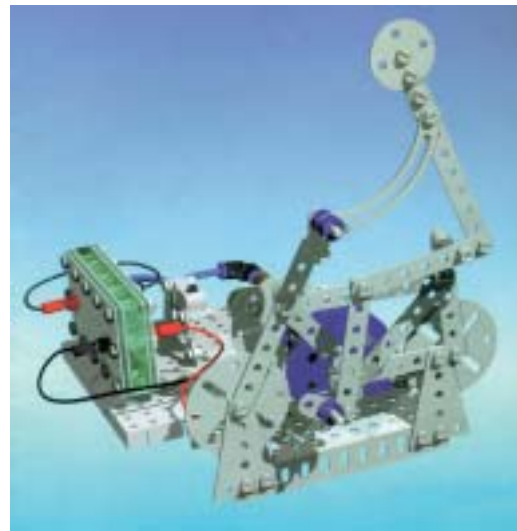
El principal interés de esta maleta es que aporta la necesidad de un montaje previo que obliga un cierto ingenio previo a la demostración del potencial del hidrógeno como combustible. La simplicidad de todas las piezas hace mucho más comprensible la sencillez de la pila de combustible. En realidad una pila de combustible de membrana protónica PEM no es otra cosa que un polímero encapsulado entre un ánodo y un cátodo. En este sentido, no estamos delante de un recurso vistoso, pero en contrapartida ilustra las piezas esenciales de una central eléctrica con hidrógeno. El único inconveniente es que la bombona de hidrógeno no se pueda recargar con el propio kit.

El coche de hidrógeno de KOSMOS

El futuro nos puede dibujar un mundo en el cual vehículos, máquinas y otros aparatos se alimenten con células de combustible de hidrógeno. El kit de experimentación de KOSMOS nos adelanta el futuro y lo convierte en una herramienta para aprender, para probar el mundo sin contaminación que impregne la tecnología del



Presentación del kit de coche para experimentar con el hidrógeno solar de KOSMOS.



Kit de Eitech de la célula de combustible con la bombona de hidrógeno que acciona el motor eléctrico que mueve el ciclista

hidrógeno solar que resume en un coche de metacrilato equipado con una célula de combustible reversible, es decir que puede generar la electricidad necesaria para descomponer el agua y obtener el hidrógeno gracias a un panel solar fotovoltaico y almacenarlo en una bombona, que cuando no tengamos luz solar podamos dirigir hacia la célula de combustible y generar nuevamente electricidad, para hacer funcionar el motor eléctrico que mueve el coche.

Se trata de uno de los kits pedagógicos más



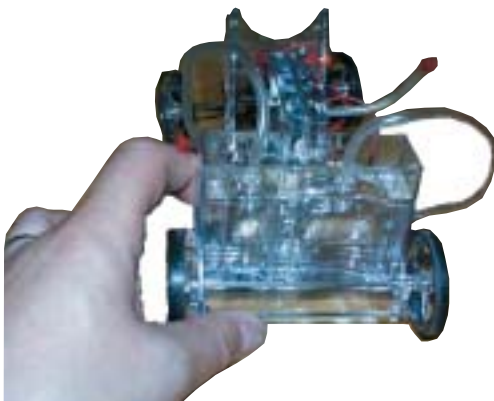
Detalle de la célula de combustible del coche con el depósito de agua que con energía fotovoltaica se convierte en hidrógeno.



Detalle de la placa fotovoltaica con la cual se genera electricidad que sirve para recargar el tanque de hidrógeno del coche, con el cual, una vez lleno, a través de la célula de combustible se hace girar el motor eléctrico que mueve.

ingeniosos que nunca se han creado para apoyar el nacimiento de la era del hidrógeno. Sus creadores el Dr. Detlef Bahnemann (1953), Christopher Berge (1972) y Francisco Pujiula-Krüger (1961) con una célula de combustible fabricada por NOVARS y el desarrollo de los laboratorios de KOSMOS han conseguido un juguete pedagógico que no necesita de ninguna otra energía que la luz del Sol para funcionar.

El kit nos propone 30 experimentos sencillos para tomar el pulso al potencial del hidrógeno como vector energético. Por ejemplo, unos 10



Detalle del depósito de agua con los tubos que recogen el hidrógeno y el oxígeno que sirven para producir electricidad a la célula de combustible.

minutos de luz solar permiten fabricar hidrógeno para hacer correr el vehículo unos 20 minutos.

Ya hemos comentado en esta monografía que la gran lucha por implantar esta fuente de energía limpia se centra en el hecho de que el hidrógeno presente en el agua se extraiga con energías renovables. El kit de KOSMOS es pues el paradigma de esta apuesta que debe permitir a la humanidad salir de la era oscura del petróleo. Una etapa que aún y haber permitido un enorme progreso se ha cobrado un buen tributo en forma de contaminación, alteraciones globales y conflictos sociopolíticos que han dejado millones de víctimas por todo el planeta.

Creemos que estos kits de hidrógeno se convierten en recursos muy idóneos porque en la escuela se pueda debatir muchos de los aspectos que hemos apuntado.

- ¿Cuanto CO₂ podríamos dejar de liberar por cada coche con motor de combustión interna que retirásemos de las calles y carreteras?

- De los 1000 kWh./m² que recibimos del Sol las placas fotovoltaicas con una eficiencia de entre el 10 y el 20% pueden suministrar en unos 50 m² de paneles fotovoltaicos el consumo eléctrico medio de una familia (unos 4.500 kWh/año). ¿Tenemos suficiente tejado para captar la energía solar y ser productores de electricidad en casa? La energía solar no consumida de día se podría almacenar con hidrógeno y producir electricidad de noche. ¿No podríamos ahorrar más energía en casa?

- ¿La producción de hidrógeno a partir de residuos puede resultar una solución?

- ¿Podemos imaginar un futuro con hidrógeno como motores energéticos para una humanidad más solidaria y respetuosa con el entorno? La tecnología nos pone la semilla para enamorarnos de un futuro más limpio. ¿Podemos pagar un poco más por cambiar por un mundo mejor?

Recursos, bibliografía e internet

Recursos i bibliografía

- BOCKRIS, John O'M, VEZIROGLU, Nejat; SMITH, Debbi. *Hidrógeno solar: la energía limpia del futuro*. Santiago de Chile: Cuatro Vientos Editorial, 1994.
- COOK, Brian. *An introduction to fuel cells and hydrogen technology*. Vancouver: Heliocentris, 2001.
- DALTON, Jim. *National fuel cell education program pilot project*. Santa Barbara: Eco Soul, Inc, 2002.
- DUNN, Seth. *Hydrogen futures: towards a sustainable energy system*. Washington: Worldwatch Institute, 2001.
- HOFFMANN, Peter. *Tomorrow's energy. Hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet*. London: The MIT Press, 2001.
- RIFFKIN, Jeremy. *La economía del hidrógeno*. Barcelona: Paidós, 2002.

Internet

- <http://biohabitat.terra.org> kits asequibles para producir hidrógeno y mostrar el poder del hidrógeno en la escuela sin peligro.
- <http://www.aeh2.org> ; web de la Asociación Española del Hidrógeno creada en el 2002.
- <http://www.hydrogen.org/index-e.html> ; artículos, glosario, sumarios técnicos, base de datos, una buena herramienta a favor de la difusión del hidrógeno.
- <http://www.hynet.org> : La Red europea temática sobre el hidrógeno es una iniciativa de la Unión Europea; contiene alguna publicación y una agenda de eventos.
- http://www.pacificsites.net/~dglaser/h2/*links.html ; una interesante colección de enlaces a diferentes centros de interés sobre el hidrógeno.
- <http://www.h2fc.com/tech.html> ; un buen recopilatorio de documentos con las principales tecnologías sobre las pilas de combustible.
- <http://www.bellona.no> ; fundación noruega que dispone de un brillante informe sobre el hidrógeno.
- <http://www.energyshortage.com> ; una página dedicada al declivio de los recursos fósiles.
- <http://www.fuelcellpark.com> ; un paseo por los diferentes tipos de células de combustible, proyectos y otros temas relacionados.
- <http://www.bp.com/centres/energy2002> ; datos sobre el consumo de petróleo.
- <http://www.fuelcellstore.com> ; venta de productos domésticos relacionados con la tecnología del hidrógeno en los Estados Unidos.
- <http://www.fuelcells.org> ; centro on line de información sobre las pilas de combustible con abundantes recursos para los profesores; probablemente, uno de los espacios web más interesantes para consultar.
- <http://www.h-tec.com> ; células de combustible de demostración para actividades educativas.
- <http://www.generallyhydrogen.com/html/links.html> ; enlaces a compañías, publicaciones y asociaciones que divulgan el hidrógeno.
- <http://www.runningonempty.org/espanol.htm> ; una página muy interesante para reflexionar sobre la crisis del petróleo.
- <http://directory.google.com/Top/Science/Technology/Energy/Hydrogen/> ; directorio web propuesto por el buscador google.
- <http://www.ehgtechnology.com/Conversion%20Table.htm> ; tabla de conversión y equivalencias de las diferentes medidas utilizadas en gases. A la misma vez, esta empresa es la responsable de la tecnología de la electrólisis gravitacional.
- <http://education.lanl.gov/RESOURCES/H2/education.html> ; recursos educativos aportados por el laboratorio Los Alamos de los Estados Unidos. Selección de enlaces a otros materiales pedagógicos.
- <http://www.eren.doe.gov/hydrogen/basics.html> ; especialmente están relacionados algunos documentos divulgativos en formato PDF sobre el hidrógeno.
- <http://www.dodfuelcell.com> ; guía sobre los diferentes tipos de pilas de combustible.
- <http://americanhistory.si.edu/csr/fuelcells/index.htm> ; historia de las células de combustible.
- http://www.alternenergy.org/2/renewables/hydrogen_and_fuel_cells/hydrogen_and_fuel_cells.html ; documento que resume la tecnología del hidrógeno.
- <http://www.crest.org/hydrogen/index.html> ; pioneros en la divulgación de las energías renovables hay un buen documento informativo sobre el hidrógeno.
- <http://www.methanol.org> ; tiene imágenes sobre los vehículos y desarrollos en hidrógeno que utilizan metanol para el funcionamiento de la pila de combustible.