

EL HIDRÓGENO, COMBUSTIBLE DEL FUTURO

LUIS GUTIÉRREZ JODRA*

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. C/ Valverde, 22. 28004 Madrid

INTRODUCCIÓN

En la historia de la Química, la primera referencia al hidrógeno como tal aparece con la identificación de dos gases diferentes como formando parte del agua, por el inglés Henry Cavendish en 1766. Cavendish le da el nombre de aire inflamable. Más tarde, Antoine Lavoisier le da el nombre por el que lo conocemos, hidrógeno, generador de agua.

Antes de que finalizara el siglo XVIII, el hidrógeno encontró su primera aplicación práctica, como ocurre frecuentemente, por el ejército francés para globos de reconocimiento. Más de un siglo después, Alemania lo empleó en sus dirigibles para cruzar el océano Atlántico e incluso como combustible para la propulsión de los llamados zeppelines. Esta empresa concluyó después de la catástrofe del Hindenburg en 1937.

Más tarde, antes y después de la segunda guerra mundial, el hidrógeno se empleó como combustible de motores de vehículos de todo tipo, incluidos locomotoras y submarinos, pero sin gran éxito. Y ello a pesar de la predicción de Julio Verne en su novela "La isla misteriosa" de que algún día el agua, bajo la forma de sus componentes hidrógeno y oxígeno, serviría como fuente inagotable de energía.

El auge del carbón en el siglo XIX y del petróleo en el siglo XX eliminaron toda posibilidad del uso masivo del hidrógeno. Solamente la industria química, primero con la producción de fertilizantes derivados del amoníaco y después con la necesidad de hidrógeno para eliminar azufre y otros componentes de las gasolinas y gasóleos de locomoción y como comple-

mento en las síntesis de productos derivados del petróleo, mantuvieron en el mundo una producción sustancial del hidrógeno.

Más adelante, ya en la segunda mitad del siglo XX, la preocupación por el ambiente y los posibles efectos sobre el clima, el comienzo de la era espacial y la inquietud sobre el agotamiento de los combustibles fósiles, ha traído de nuevo un gran impulso, sobre todo, de la industria automovilista por el empleo en gran escala del hidrógeno, lo que se ha llamado, erróneamente a mi modo de ver, la economía del hidrógeno.

El interés de las industrias aeroespacial y automovilista por el hidrógeno se debe a la llamada pila de combustible, donde el hidrógeno puede quemarse con el oxígeno, transformándose la energía de la combustión en electricidad. Este proceso fue ya descubierto en 1839 por el galés William R. Grove, pero su desarrollo comenzó en la década de los 1960 por la NASA para producir electricidad y agua en algunas de sus misiones espaciales. Actualmente, un gran número de prototipos de las principales marcas de automóviles y autobuses ensayan pilas de combustible de tipos y combustibles diversos.

ALGUNAS RAZONES PARA TRATAR DEL HIDRÓGENO

Las razones principales son de tipo ambiental y de previsión sobre el posible agotamiento del petróleo, que hoy constituye la base energética actual de los países avanzados, especialmente del transporte. Otras

TABLA 1: Algunas propiedades del hidrógeno

- Incoloro. Gas normalmente; sólido,cúbico.
- Punto de fusión: -259,1º C.
- Punto de ebullición: -252,7º C.
- Temperatura crítica: -239,8º C.
- Densidad del líquido: 0,0709 g/cm³.
- Densidad del gas: 0,0899 Kg/m³.
- Solubilidad en el agua:

a 0º C: 2,1 cm³
a 80º C: 0,85 cm³

}

en 100 partes
- Isótopos y abundancias

H-1	99,985%
H-2 (deuterio)	0,015%
H-3 (radiactivo, período 12,26 años)	-

dependen de sus propiedades específicas, así como también sus inconvenientes.

Su principal ventaja es que su combustión produce solo agua, lo que significa que no emite gases de efecto invernadero, como ocurre con los combustibles fósiles e incluso con la biomasa. Esto le hace particularmente apropiado para sustituir a los derivados del petróleo. La sustitución de éstos, sin embargo, tiene el grave inconveniente de no ser un combustible primario. Hay que producirlo con otros.

Su importancia radica en que es buen vector para transportar energía. La posibilidad de su almacenamiento le hacen competir favorablemente con la electricidad en algunos casos.

Una de sus propiedades importantes es la energía específica de su combustión. Su valor es de 120 megajulios por kg en comparación con 50 MJ/kg del gas natural o con 44,6 MJ/kg del petróleo. Esto se contrapone a la baja densidad que presenta tanto como gas como licuado y a las dificultades de almacenamiento para sus aplicaciones al transporte.

No obstante, su capacidad de ser almacenado le hace apropiado como complemento de algunas energías renovables que funcionan intermitentemente o son irregulares como la eólica o la solar. Algunas

instalaciones de este tipo funcionan o están en fase de proyecto en nuestro país.

PROPIEDADES

El hidrógeno es normalmente un gas. Es el elemento más abundante en el Universo y es el combustible de las estrellas y, evidentemente, del Sol, por lo que la energía que éste nos envía es la base de todos los procesos físicoquímicos y biológicos que tienen lugar en la Tierra.

El hidrógeno está presente en forma molecular o iónica, pero a pesar de su abundancia no está disponible para nosotros. El posible yacimiento más próximo está en Júpiter, inaccesible por el momento. En la Tierra, desgraciadamente, el hidrógeno está combinado en su mayor parte formando agua, no hay hidrógeno libre y la corteza terrestre está formada principalmente por oxígeno, silicio, aluminio y otros elementos menores.

Deben destacarse algunas propiedades que son importantes y deberán ser tenidas en cuenta en muchos de los aspectos que se verán a continuación. Los primeros son el bajo punto de ebullición y la proximidad a la temperatura crítica (vease la tabla 1).

Los segundos son las bajas densidades del gas y del líquido.

La tercera es el contenido en deuterio, que puede ser una de las bases de la energía nuclear de fusión, lo que no se tratará en esta presentación.

De las propiedades antes citadas se pueden deducir las dificultades de almacenar el hidrógeno, de transformar el gas en el líquido y de los problemas del almacenamiento del líquido.

En la tabla 2 aparece otro grupo de propiedades relacionadas con la seguridad de su manejo y de su empleo como son su elevado coeficiente de difusión en el aire, los límites de detonación e inflamabilidad y las temperaturas de ignición y de la llama.

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN

Debemos preguntarnos primero cuáles son las materias primas para obtener hidrógeno. Evidentemente, el primero es el mar, en el que el hidrógeno está en un 11,19% en peso. Todos los organismos vivos, animales y vegetales, contienen hidrógeno. Puede

obtenerse por ello de la biomasa y de algunos productos de origen animal como el biogas. Y lo contienen los combustibles fósiles, gas natural, petróleo y carbón.

No obstante, ha de quedar claro que la molécula de agua es extraordinariamente estable y que en todos los casos es preciso aportar energía para obtener el hidrógeno. Otra cuestión que, a veces se olvida, es que en nuestro mundo el hidrógeno no es una energía primaria y es preciso obtenerlo mediante alguna reacción química, bien de disociación del agua o por alguna reacción en que el hidrógeno es un producto de la reacción (vease la tabla 3).

En los últimos años casi el 90% del hidrógeno producido se dedica a la fabricación de amoníaco, 50%, y en las refinerías de petróleo, 37%. La obtención de metanol, 8%, otros productos químicos, 4%, y diversas aplicaciones, 1%, completan una producción que en el mundo se eleva a unos 60 millones de toneladas anuales.

Los métodos industriales de producción de hidrógeno se basan principalmente en los combustibles fósiles. Según los países y su disponibilidad

TABLA 2: Propiedades del hidrógeno y seguridad de su empleo

Coeficiente de difusión en el aire (t y p normales), cm ² /seg.	0,61
Límites de inflamabilidad en el aire, % volumen	4,0 - 75,0
Límites de detonación en el aire, % volumen	18,3 - 59,0
Límites inflamabilidad en oxígeno, % volumen	4,5 - 94,0
Límites de detonación en oxígeno, % volumen	15,0 - 90,0
Temperatura de ignición en el aire, °C	585
Temperatura de ignición en oxígeno, °C	560
Temperatura de la llama en el aire, °C	2045
Calor de combustión kJ/mol*	285,8

*1kJ/mol=1/4,184 kcal/mol

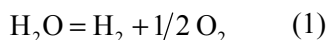
TABLA 3: Producción de hidrógeno

1.	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$	ALTAS TEMPERATURAS CICLOS
2.	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ $2\text{OH}^- - 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2$	ELECTROLISIS
3.	$\left. \begin{array}{l} \text{C} \\ \text{CH} \\ -\text{CH}_2- \end{array} \right\} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	COMBUSTIBLES FÓSILES
4.	$\left. \begin{array}{l} h\nu \\ \gamma \end{array} \right\} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$	FOTOPROCESOS RADIACIÓN

de materias primas se emplea el gas natural, el carbón o los derivados del petróleo y solamente en algunos la electrolisis del agua (vease tabla 4). A escala mundial, el 48% de la producción utiliza el reformado catalítico de gas natural con vapor. Le siguen el 30% a partir de hidrocarburos, el 18% del carbón gasificado y el 4% por electrolisis.

La necesidad de reducir las emisiones de CO_2 para evitar el efecto invernadero que provoca y las consecuencias previsibles del calentamiento de la Tierra y del posible cambio climático hace que actualmente se estudie profundamente la obtención de hidrógeno a partir de agua por métodos térmicos. La alta temperatura necesaria para alcanzar un rendimiento apreciable indica que es necesario acudir a la utilización de catalizadores y mejor aún al empleo de ciclos a fin de reducir la temperatura máxima de trabajo y así requerir materiales que puedan funcionar en condiciones prácticas de resistencia mecánica y química adecuadas.

1. La disociación térmica del agua



es fuertemente endotérmica (-120 MJ/kg y $-141,86 \text{ MJ/kg}$, respectivamente, para agua vapor y agua líquida).

De las relaciones termodinámicas

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2)$$

$$\text{y} \quad \Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (3)$$

se pueden obtener los valores de la constante de equilibrio K y de las composiciones de los equilibrios a distintas temperaturas.

Se encuentra así que para obtener concentraciones de hidrógeno prácticas son precisas temperaturas superiores a 2000 K . A esta temperatura la disociación del agua es solo de un 1%, por lo que habría de operarse al menos a 2200 K .

El empleo de catalizadores de platino o rutenio permite operar a temperaturas inferiores a 1000°C empleando métodos que desplacen el equilibrio por separación del hidrógeno a medida que se produce, lo que se logra mediante membranas permeables al hidrógeno o por reacción de éste con metales como el circonio, con los que forman hidruros de los que se recupera posteriormente el hidrógeno mediante aportación de calor.

Otra forma de soslayar las altas temperaturas y las bajas concentraciones de hidrógeno de la disociación térmica directa es mediante ciclos de reacciones químicas en que la reacción de disociación del agua se realiza por medio de reacciones químicas parciales. Con estas, las barreras de potencial son más bajas y las temperaturas de operación menores, reduciéndose las dificultades de llevar a la práctica la disociación.

El número de ciclos de disociación térmica propuestos es muy elevado. En la tabla 4 se esquematizan algunos de ellos en su formulación química.

De todos ellos el más comprobado experimentalmente a pequeña escala es el proceso denominado Azufre-Yodo o, simplemente, SI, que se presenta en la figura 1.

El creciente interés por las energías renovables como fuentes energéticas que no emiten dióxido de carbono ha hecho que se propongan métodos diversos de producción de electricidad que pueden utilizarse para obtener hidrógeno. El acoplamiento electricidad-hidrógeno puede servir para suplir el inconveniente de la electricidad de no poder ser almacenada. El hidrógeno, almacenado cuando no se emplee la electricidad,

TABLA 4: Ciclos de disociación térmica para la obtención de hidrógeno

• Procesos General Atomic

1. $2 \text{ HI} \rightarrow \text{I}_2 + \text{H}_2$ (425° C)
2. $\text{I}_2 + \text{SO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{ HI}$ (90° C)
3. $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{ O}_2$ (860° C)
- b) 1. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{ SO}_2 \rightarrow 2 \text{ FeSO}_4 + \text{H}_2$ (80° C)
2. $2 \text{ FeSO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{ SO}_2 + 1/2 \text{ O}_2$ (800° C)

• Departamento de Energía, Estados Unidos

1. $2 \text{ KI} + 2 \text{ NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 + 2 \text{ NH}_4\text{I}$
2. $\text{Hg} + 2 \text{ NH}_4\text{I} \rightarrow \text{HgI}_2 + 2 \text{ NH}_3 + \text{H}_2$
3. $\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{HgI}_2 \rightarrow \text{Hg} + 2 \text{ KI} + \text{CO}_2 + 1/2 \text{ O}_2$
- b) 1. $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2 \text{ SrO} + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ SrCrO}_4 + 3 \text{ H}_2$
2. $2 \text{ SrCrO}_4 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 2 \text{ SrO} + 3/2 \text{ O}_2$

• Procesos Hitachi

1. $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Cu} \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{H}_2$
2. $2 \text{ CuSO}_4 \rightarrow 2 \text{ CuO} + 2 \text{ SO}_3$ (760° C)
3. $2 \text{ CuO} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + 1/2 \text{ O}_2$ (750° C)
4. $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Cu} + \text{H}_2\text{O} + \text{CuSO}_4$
5. $2 \text{ SO}_3 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{SO}_4$

• Procesos Westinghouse

1. $2 \text{ H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$
2. $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{ O}_2$

podrá ser utilizado en periodos de mayor demanda utilizando su combustión directa o las pilas de combustible para generar electricidad o su empleo en cualquier tipo de utilización en la industria.

Los métodos directos basados en la fotólisis con semiconductores o en la radiación no tienen, por ahora, más que un interés puramente científico. La falta de interés práctico, esta vez desde el punto de vista económico, se aplica a los métodos basados en la biomasa, tanto los basados en su reformado directo como el de productos derivados, tales como los bio-combustibles (biofuel, biogas, alcoholes, etc).

En nuestro país hay diversas plantas piloto para producir hidrógeno mediante energías renovables. La primera de ellas fue la del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), que está formada inicialmente por una sección fotovoltaica y una pila de combustible de ácido fosfórico y que funciona desde 1993. Otras han sido instaladas posteriormente en diversos centros de Madrid y Barcelona.

Otra opción para obtener hidrógeno sin emitir CO_2 son los reactores nucleares de ciertos tipos que pueden funcionar a altas temperaturas. Estos reactores, que están dados en la tabla 5, pueden ser utilizados en muchos procesos industriales por lo que constituyen una firme esperanza de la industria nuclear para extender su empleo a otros campos diferentes a la pro-

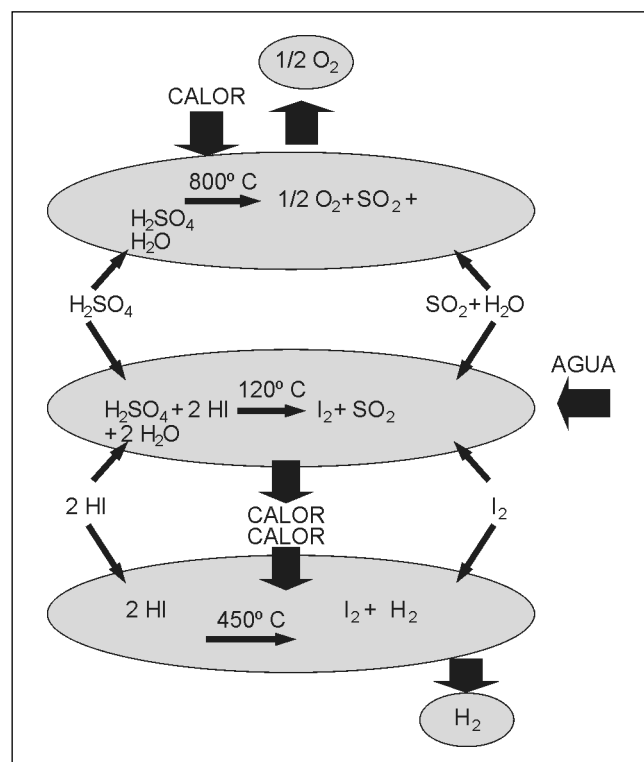


Figura 1. Ciclo Azufre-Yodo de producción de hidrógeno

ducción de electricidad. Pueden verse algunas aplicaciones posibles en la figura 2. Los tipos más probables para un futuro próximo son los de muy alta temperatura en los que el helio puede salir del reactor a temperaturas por encima de 900° C, sobrepasado este valor recientemente en el reactor experimental japonés de

TABLA 5: Reactores nucleares para producción de hidrógeno

- **Reactores de alta temperatura refrigerados por gas**

gas: helio

combustible: UO_2 ; UO_2 - PuO_2 (MOX)

- **Reactores reproductores rápidos**

refrigerante: Na, NaK, Pb, Pb-Bi

combustible: UO_2 ; UO_2 - PuO_2 ; nitruros-carburos de U y Pu

- **Acelerador-reactor subcrítico**

refrigerante: Pb, Pb-Bi

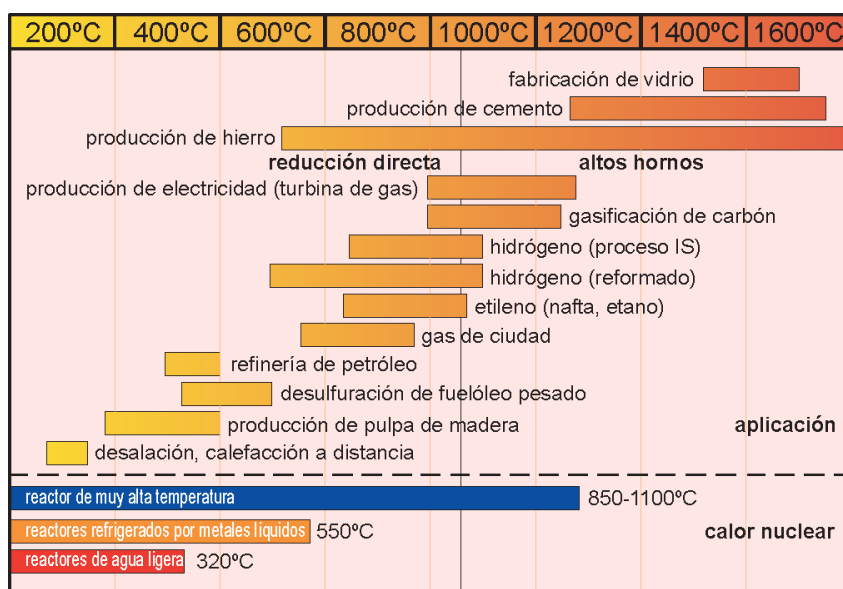
combustible: UO_2 ; ThO_2 

Figura 2

este tipo, que sirve de prototipo tanto de este reactor como la de una instalación de obtención de hidrógeno por el método SI de mayor producción que la actual anexa al prototipo de este modelo de reactor.

En un futuro más lejano, los reactores rápidos reproductores, o los conjuntos reactor subcrítico-acelerador de partículas, podrán también ser empleados para producir hidrógeno. Habrán de desarrollarse antes prototipos nuevos con refrigerantes distintos a los basados hasta ahora en sodio o sodio-potasio, cuyas temperaturas de salida no suelen pasar de 550°C ó 600°C. Solamente los reactores empleando plomo o

plomo-bismuto pueden funcionar, aparte de otras ventajas, a temperaturas próximas a los 900°C-1000°C, suficientes para la mayor parte de los ciclos propuestos.

Un esquema conceptual de un reactor de alta temperatura acoplado a una instalación de generación de hidrógeno se da en la figura 3.

2. Un método muy seguido en ciertas partes del mundo y en otras épocas del pasado siglo en que la electricidad era barata y abundante es la electrolisis del agua empleando células electrolíticas de diseño muy

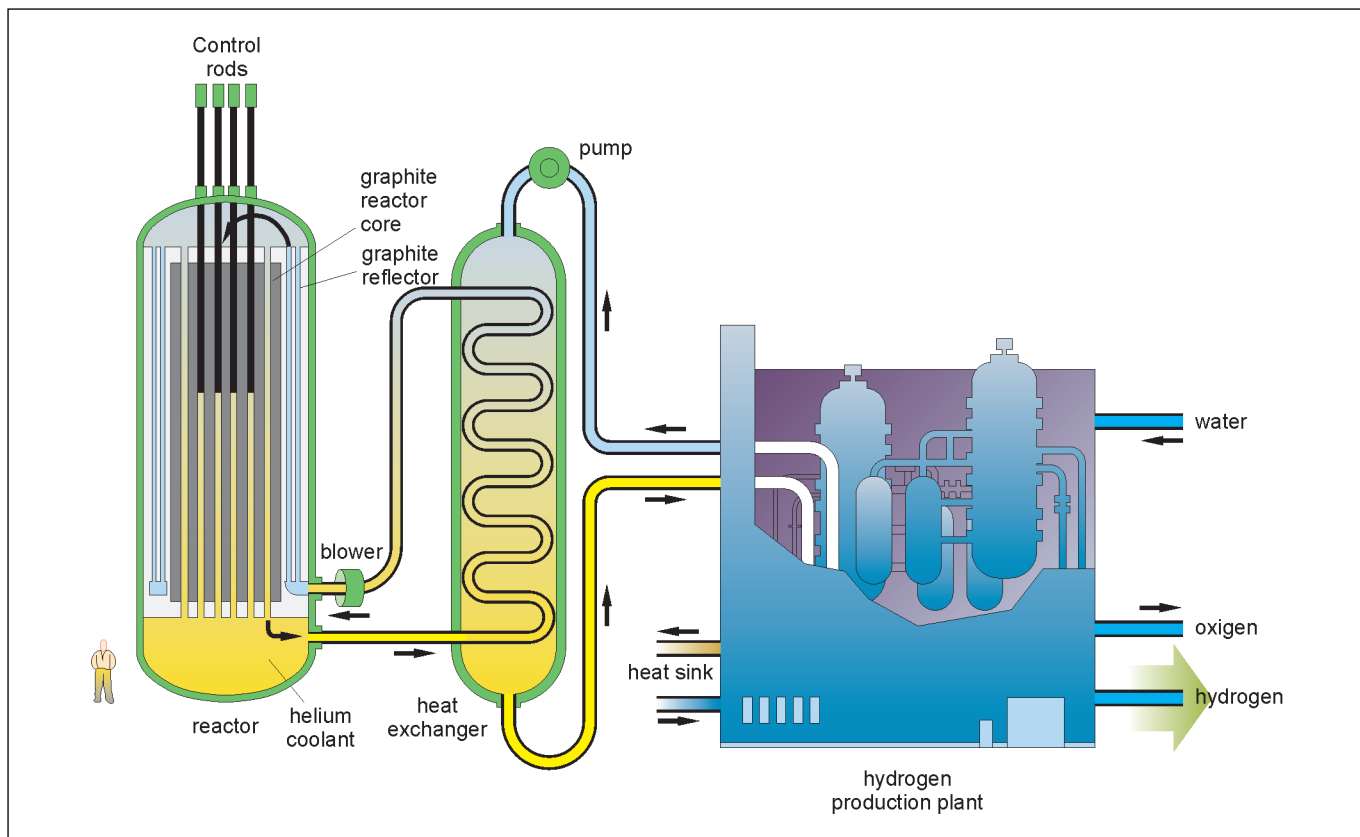


Figura 3

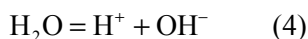
TABLA 6: Producción de hidrógeno por electrolisis Electrolito: KOH 25-35%

Fabricante	Presión K Pa*	Temperatura, ° C	Amp/cm ²	Voltios	Rendimiento, %	Tamaño, t
Electrolyzer	101	70	0,16	2,04	74	
Teledyne	690	82	0,43	1,84	82	25
Lurgi	3040	95	0,19	1,84	82	35,7
Bamag	101	80	0,25	1,92	78	7,85
Norsk Hydro	101	80	0,15	1,87	81	95
Life Systems	101	93	0,65	1,84	82	-
General Electric	20,260	82	1,08	1,85	81	-

*Dividir por 101 para obtener atm.

diverso en su concepción y materiales de cátodo y ánodo, la presión utilizada para el proceso y la intensidad y densidad de corriente de operación.

De la energía libre de la reacción



$$\Delta G^0 = nFE_0 \quad (5)$$

puede estimarse el potencial teórico necesario para llevar a cabo la electrolisis que es unos 1,23 voltios. A

este potencial deben agregarse las diferencias de potencial que resultan de las resistencias óhmicas del electrolito y de los electrodos

$$E_{\text{práctico}} = E_0 + I \sum R_i \quad (6)$$

Normalmente se asocia un número elevado de células en serie, lo que da lugar a una estructura que se suele denominar de filtro prensa por su semejanza con ese tipo de separador de sólidos y líquidos.

En la tabla 6 se dan las características más señaladas de diversos electrolizadores industriales. Hay que hacer notar los rendimientos, que no suelen llegar al 90%, el potencial, más bien próximo a los dos voltios, y la alta presión a que funcionan algunos modelos.

Debe indicarse aquí que solamente en algunas instalaciones se utilizan células de mercurio a causa de la contaminación ambiental a que dan lugar principalmente los vertidos que contienen mercurio.

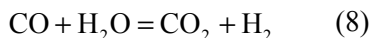
Es evidente que el coste de la producción electrolítica depende básicamente del precio de la electricidad que se emplee. Solamente en algunos casos la electricidad tiene precios suficientemente bajos para poderla utilizar. Excepcionalmente, como en los valles de producción o en la producción conjunta de calor y electricidad, a veces esto es posible.

3. El método industrial más utilizado industrialmente para producir hidrógeno en grandes cantidades parte de gas natural que tiene un contenido muy alto de metano. El reformado es un tratamiento con vapor de agua en presencia de un catalizador. El proceso está precedido de una eliminación del azufre contenido en el gas natural por medio de hidrógeno. La reacción química, muy exotérmica, es



Las altas temperaturas y presiones empleadas, más de 750°C y unos 3 MPa, proporcionan rendimientos en hidrógeno elevados del orden del 90 al 95%. Suelen emplearse reactores multitubulares y catalizadores de níquel.

En un segundo reactor, el CO se transforma en CO₂ según la reacción de equilibrio



Para conseguir un rendimiento alto, este segundo reactor tiene dos zonas diferentes. La primera zona, de temperatura alta, aprovecha la mayor velocidad de reacción y la concentración más alta de CO. Se emplea un catalizador de óxido de hierro con un promotor de cromo. En la segunda zona, posterior a la primera y de mayor volumen, se utiliza una temperatura baja, a la

cual el equilibrio es más favorable, y un catalizador de cobre sobre un soporte de alúmina.

Los procesos que emplean naftas, mezclas de hidrocarburos o carbón proceden de manera semejante. Las diferencias entre ellos se deben a las complicaciones que se derivan de su distinta composición y requieren más tratamientos previos y más operaciones de separación cuando se pasa del combustible gaseoso a combustibles líquidos y mas aún a combustibles sólidos.

En algunos países se han utilizado hidrocarburos en un proceso de pirólisis y oxidación parcial con vapor de agua y aire. La mezcla de reacciones es, en conjunto, endotérmica y se suelen utilizar altas temperaturas, del orden de 700°C y aún más altas.

En la reacción, además de CO₂ e hidrógeno, se producen olefinas, parafinas e hidrocarburos aromáticos, pero tiene las ventajas de no requerir catalizador y poder utilizar cualquier materia prima desde gas natural a asfalto, y evidentemente crudos de cualquier tipo, si bien precisa de oxígeno muy puro.

La reacción entre carbón y agua



es muy endotérmica, por lo cual se requieren altas temperaturas, del orden de 1000°C, al tratar de obtener hidrógeno. Al ocurrir también la reacción (8) el sistema sigue siendo endotérmico, pero tiene la ventaja de reducir al mínimo la formación de metano y no formarse aceites, ni alquitranes.

4. Los métodos directos basados en la aportación energética de la luz solar incluyen la biofotólisis, la fotoelectrólisis y la fotocatalisis, que son debidos a algas o bacterias o a compuestos químicos que reaccionan con el agua liberando hidrógeno. Ninguno de estos procesos puede dar lugar a cantidades importantes de hidrógeno. Ejemplos de ellos son las algas verdes, que producen hidrógeno por medio de hidrogenasas, las perovskitas impregnadas con níquel y algunos semiconductores cuando están iluminados con radiación ultravioleta. En todos los casos, no obstante, los rendimientos son bajos entre el uno y el dos por ciento.

Otro método directo se basa en la acción de la radiación sobre el agua. La radiolisis, sin embargo, actúa con rendimientos extraordinariamente muy bajos y tampoco ofrece interés como método de producción.

ALMACENAMIENTO

En las instalaciones que requieren un gran consumo de hidrógeno, la generación de éste se lleva a cabo en las cercanías con solo un almacenamiento intermedio a baja presión. Si la generación se hace lejos o sirve para instalaciones diferentes o alejadas se transporta por hidrogenoductos o a veces por ferrocarril o carretera.

El almacenamiento a bajas presiones no plantea problemas especiales y para ello se utilizan gasómetros semejantes a los de otros gases industriales. Se han empleado también, de manera semejante al gas natural, cavidades naturales: minas antiguas de sal (Reino Unido) o acuíferos (Francia). El único problema es la baja densidad que hace precisos grandes volúmenes. La reducción de volumen por el empleo de mayores presiones (de 200 a 450 bares) suele hacerse en depósitos cilíndricos, lo que está prohibido en algunos países como Japón.

Una reducción aún mayor se logra mediante liquefacción. Sus inconvenientes principales se deben a la baja temperatura involucrada (punto de ebullición, $-252,7^{\circ}\text{C}$). Por una parte, los depósitos deben estar muy aislados. Por otra, para la liquefacción se invierte una energía próxima a 1/3 de la que el hidrógeno puede rendir. Además, el depósito debe estar comunicado con el exterior porque la temperatura crítica ($-239,8^{\circ}\text{C}$) está muy próxima a la de ebullición y existe el riesgo de sobrepresiones peligrosas.

La cuestión del almacenamiento se hace particularmente relevante cuando se trata de vehículos, para conjugar el volumen con la necesidad de su recarga y hay que ponderar la seguridad y las posibilidades de accidentes. La existencia de nuevos materiales de construcción, como los composites o materiales compuestos permite utilizar presiones de hasta 700 bares, pero en el caso de hidrógeno líquido el aislamiento hecho a base de capas de distintos aislantes limita la capacidad de almacenamiento.

TABLA 7: Almacenamiento de hidrógeno

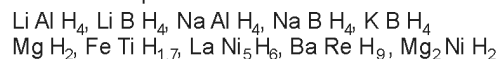
• como gas

1.1 depósitos (presiones baja o alta)

1.2 absorción en { carbón
hidrocarburos líquidos

1.3 adsorción en { carbón activo
nanotubos

1.4 formación de compuestos



• como líquido

depósitos criogénicos

Otros métodos de almacenamiento (vease la tabla 7) incluyen métodos físicoquímicos en los que el equilibrio pueda desplazarse con la temperatura y la presión. Los equilibrios buscados son de absorción por líquidos orgánicos e inorgánicos, por adsorción con carbón activo o nanotubos y por formación de hidruros con metales o mezclas de metales. Los más estudiados han sido los de hierro-titanio, lantano-níquel y magnesio-níquel. Las investigaciones que ahora se realizan tratan de encontrar una solución razonable del compromiso entre capacidad de retención por el compuesto, cinética de formación del hidruro (tiempo) y condiciones de presión y temperatura para liberar el hidrógeno.

En algunos casos para vehículos se ha optado por el empleo de otros compuestos como gasolinas y alcoholes que, por reformado, produzcan el hidrógeno en el propio vehículo.

TRANSPORTE, DISTRIBUCIÓN Y REPARTO

El transporte de hidrógeno gas por conducciones, hidrogenoductos, está menos extendido que el del gas natural. Suele hacerse en zonas industrializadas en que su generación está centralizada y las distancias involucradas son menores. Algunos ejemplos se dan en la tabla 8. En todo caso, en ellos las presiones de trans-

TABLA 8: Hidrogenoductos

Empresa	Situación	Caudal, millones de m ³ /día	Longitud, km	Diámetro, cm	Presión, atm	Año de funcionamiento
PRAXAIR	Texas, City-Bayport-Port Arthur, TX	2,7	8	20		1970
	Carney's Point, NJ	0,2				
	Whiting, IN	0,1				
Air Products and Chemicals	La Porte, TX Plaquemine, LA	1 0,8	200	10-30	3,4-54,4	1970
Chemische Week Hulls, AG	Ruhr Valley, Alemania	2,7				
ICI	Teeside, Inglaterra	0,5				
Air Liquide	Francia, Bélgica	0,4	340	10	100	1985

TABLA 9

Producción de hidrógeno		
Proceso de obtención	Rendimiento neto, %	Coste de producción c €/Kwh (sin ingresos por energía)
Reformado	<74	2,4
Gasificación	hasta 60 ó 70	3,6 carbón 5,1 biomasa
Oxidación parcial	73-77	2,2
Electrolisis	73 (30 bar) 77 (100 bar)	5,6
Fuente: Prof. U. Wagner, Univ. Tecn. Munich		
Costes previstos de hidrógeno en estaciones de servicio		
Hidrógeno de reformado, €/kg		
hidrógeno líquido		2,30
hidrógeno de reformado centralizado		2,60
hidrógeno de reformado in situ		2,76
hidrógeno de electrolisis in situ		5,73
Gasolina (sin impuestos)		0,27
Fuente: Linde, 2002		

porte no son muy altas, dependiendo principalmente de la distancia y del uso final del hidrógeno.

La creación de un sistema de distribución semejante al de la electricidad, el petróleo y sus derivados o el más moderno, todavía en desarrollo del gas natural, requiere grandes inversiones, tecnología y equipamientos, además de tiempo. Habría necesariamente

que comenzar por grandes flotas, líneas de transporte, empresas municipales y tráfico en ciudades.

La distribución a automóviles podría hacerse con el equivalente a las gasolineras con hidrógeno líquido. Ya existen en diversos países estaciones de servicio en las que se presta este servicio. El hidrógeno gas a presión se sirve ya en flotas de autobuses como ocurre ya en Barcelona y en Madrid.

Se ha propuesto que, para acelerar el proceso de establecer un sistema general, se utilizaran algunos de los actuales gasoductos, tras modificar algunos componentes como los compresores, y observar el comportamiento del acero de las conducciones por su posible fragilización.

En Estados Unidos se transporta hidrógeno líquido en cisternas criogénicas sobre camión, vagón de ferrocarril y barcaza especialmente preparados.

En una fase posterior, más lejana, la red de conducciones podría ampliarse a otros menesteres.

Hay pocos datos acerca de los costes o precios del hidrógeno tanto dependiendo del proceso seguido para su obtención como de los costes previstos para el suministro en estaciones de servicio. La información dada en la tabla 9 procede de la experiencia alemana.

Puede observarse que con la experiencia actual los costes no pueden competir con la gasolina.

TABLA 10: Propiedades físicas y químicas de hidrógeno, metano, propano y gasolina

Propiedad	Hidrógeno (H ₂)	Metano (CH ₄)	Propano (C ₃ H ₈)	Gasolina (-CH ₂ -)
poder calorífico (MJ/kg)	120	50	46,3	44,5
temperatura de autoignición (°C)	585	540	487	228-501
temperatura adiabática de la llama en aire (°C)	2.045	1.875	1.925	2.197
límites de ignición en aire (% en vol.)	4-75	5,3-15	2,1-10	1,0-7,6
propagación de la llama en aire (m/s)	2,65	0,4	-	0,4
coeficiente de difusión en aire (cm ² /s)	0,61	0,18	-	0,05
toxicidad	no	no	-	alta a conc.>500 ppm
ΔV en la reacción con oxígeno	negativo	positivo		positivo

SEGURIDAD

Esta es una de las cuestiones más debatidas para un futuro empleo masivo del hidrógeno o al menos en las ciudades. El recuerdo de la tragedia del dirigible alemán “Hindenburg”, que utilizaba hidrógeno para su sustentación, está en la historia de los empleos frustrados del hidrógeno.

Para examinar objetivamente el problema deben tenerse en cuenta las propiedades del hidrógeno dadas en las tablas 1 y 2. Es clave bajo esta consideración su masa molecular, la más baja de los elementos gaseosos, que da idea de su difusividad y de su baja densidad. Otras igualmente importantes son la temperatura de ignición y la toxicidad.

El gran intervalo de sus mezclas con aire y la velocidad de propagación de la llama favorecen una posible explosión, mientras que la difusividad y la densidad tienden a reducir su probabilidad, especialmente en espacios abiertos. En espacios cerrados, el escape de hidrógeno tiene lugar con disminución de la temperatura lo que reduce el riesgo. Por otra parte, la reacción química transcurre con reducción de volumen por lo que en vez de explosión lo que ocurre es una implosión.

En la tabla 10 se comparan las propiedades del hidrógeno con las de metano, propano y gasolina. Puede comprobarse que los límites de ignición y la velocidad de propagación de la llama son más desfavorables, pero en las demás propiedades son relativamente semejantes y mejores en toxicidad y temperatura de autoignición que la gasolina.

MATERIALES

En condiciones de presión y temperatura no muy diferentes de las ambientales, el hidrógeno no presenta problemas respecto al uso de materiales corrientes. La fragilización, que afecta seriamente a las propiedades mecánicas de los aceros, aparece cuando se utilizan presiones superiores a 100 atmósferas y sobre todo temperaturas altas. En cualquier caso, los aceros al carbono deben ser observados si se emplean en contacto con hidrógeno.

Los aceros de alta resistencia, las aleaciones níquel-titanio y, en menor medida, los aceros inoxidable austeníticos son también susceptibles a la fragilización. Por el contrario, no se fragilizan por el hidrógeno el aluminio, el cobre y las aleaciones cobre-berilio.

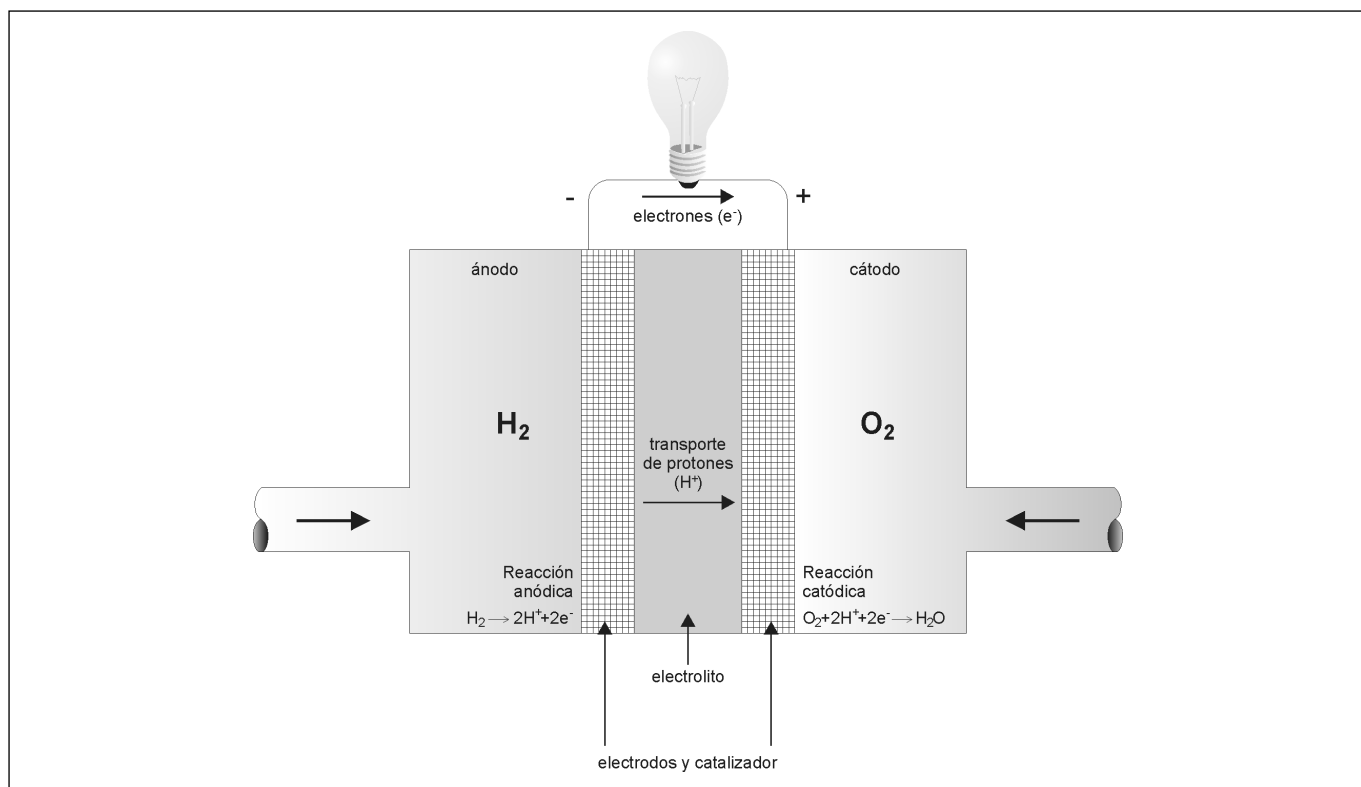


Figura 4

PILAS DE COMBUSTIBLE

Es fácil prever un aumento notable en los usos masivos actuales del hidrógeno en sus dos principales destinos: la fabricación de amoníaco y el refinado de petróleo. El amoníaco es la base de la industria de fertilizantes que han de servir para atender la creciente población del mundo y el aumento de su nivel de bienestar. En las refinadoras el hidrógeno se emplea para reducir el contenido en azufre de los crudos y para incrementar la proporción de productos ligeros por el creciente uso de crudos pesados.

También aumentará en otros usos de la industria química como son las producciones de metanol, benceno, ciclohexano, oxialcoholes, anilina y muchos más, en la hidrogenación de grasas para la industria alimentaria y en la industria metalúrgica para la reducción de óxidos y la obtención de preconcentrados.

Sin embargo, si se desarrolla la llamada “economía del hidrógeno” el mayor incremento de la producción

será con destino a la automoción y el transporte y parcialmente a la generación de electricidad, todo ello por la utilización de la célula o pila de combustible.

En esencia, una pila de combustible es un sistema electroquímico que convierte directamente la energía química del hidrógeno al reaccionar con oxígeno, en electricidad.

Esto tiene como principal ventaja el alto rendimiento que se puede obtener en el proceso. Muy superior al de la combustión, que para la producción de energía tiene como límite el ciclo de Carnot.

El rendimiento máximo de la transformación directa viene dado por el cociente entre la energía libre y la entalpía del proceso. De ambas magnitudes se obtiene:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\Delta G^\circ}{\Delta H^\circ} = 1 - T \frac{\Delta S^\circ}{\Delta H^\circ} \quad (10)$$

Este rendimiento teórico en la reacción de combustión del hidrógeno para dar agua es del orden del 95% en comparación con el 33-38% de la combustión. Es evidente que este rendimiento máximo disminuye

en la práctica por los fenómenos irreversibles y su ánodo y cátodo y las diversas resistencias en el electrolito y otros compuestos de la pila. Se obtienen así rendimientos entre el 60 y el 70%.

El modelo más sencillo de pila consta de dos electrodos, un ánodo, negativo, y un cátodo, positivo, ambos con platino como catalizador separados por un electrolito. El hidrógeno entra en la pila por el ánodo y allí se disocia en iones hidrógeno y electrones. Los iones hidrógeno pasan a través del electrolito hasta el cátodo. Los electrones del ánodo emigran por un circuito exterior hasta el cátodo donde reaccionan con los iones hidrógeno y el oxígeno para dar agua. Un esquema conceptual se presenta en la figura 4.

Para obtener un mayor voltaje se emplea un cierto número de unidades, es decir, un acoplamiento en serie. La intensidad a obtener depende de la superficie necesaria. En la figura 5 se representa la forma en que se disponen los componentes de una unidad y su ensamblaje para formar el apilamiento.

La pila de combustible es una invención del siglo XIX. Se la atribuye el abogado inglés William R. Grove en 1839, aunque hay un antecedente en una publicación del suizo Christian F. Schnbein el año anterior. Los modelos actuales se desarrollaron durante el resto del siglo XIX y la primera parte del XX, pero solo cuando la NASA americana, en la década de los 1960, instaló una pila de combustible en uno de sus vehículos espaciales, no comenzaron los trabajos de investigación y desarrollo de las grandes empresas como General Electric, British Petroleum y algunas otras.

Más recientemente, las preocupaciones por el ambiente y por los recursos energéticos han contribuido a su desarrollo, estimulado además por el éxito de las instaladas en la lanzadera espacial Shuttle y en el Ariane europeo.

Las ventajas e inconvenientes de las pilas de combustible se resumen en la tabla 11.

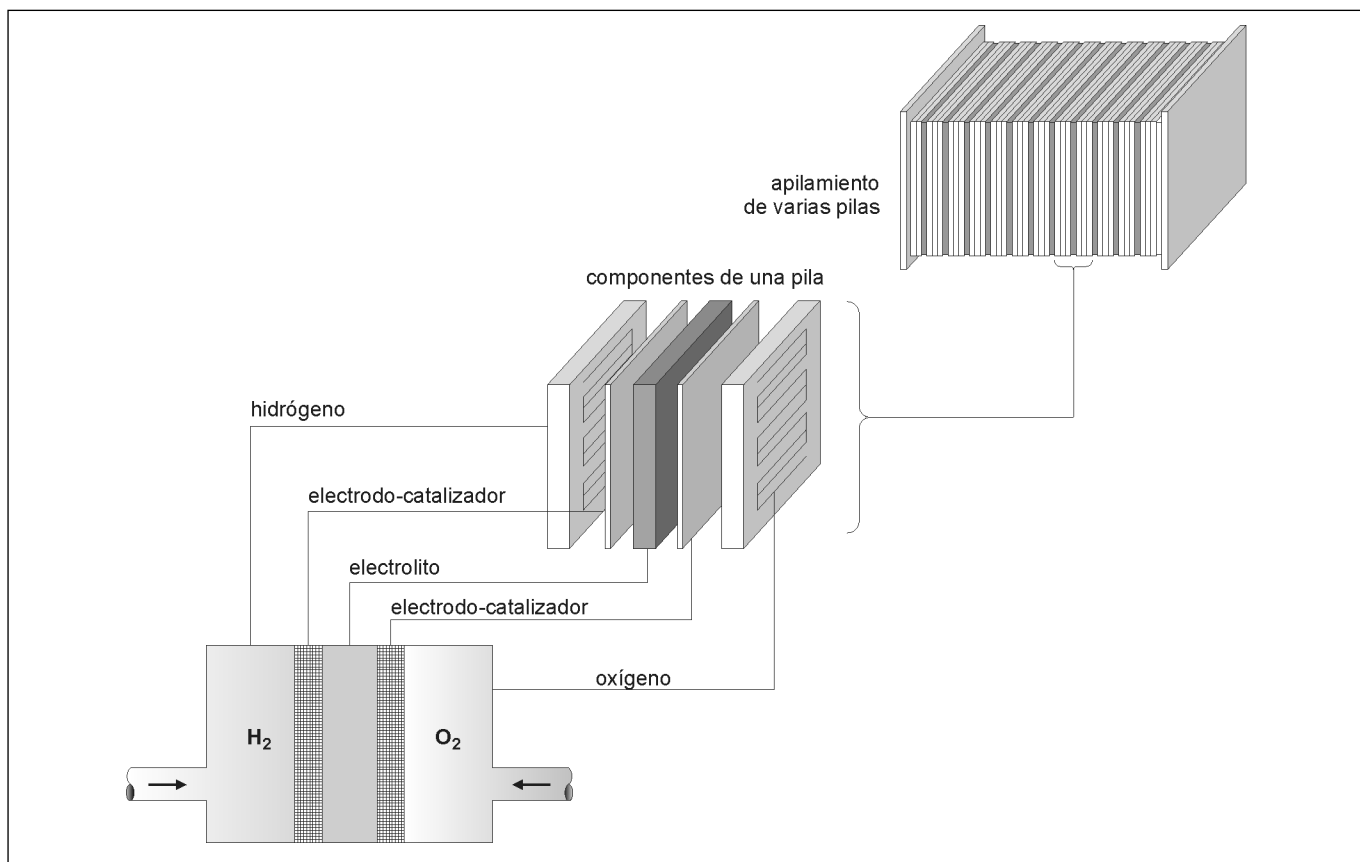


Figura 5

TABLA 11: Características principales de las pilas de combustible

• ventajas

La reacción química no produce CO_2

Alto rendimiento teórico $\left[\frac{\Delta G^\circ}{\Delta H^\circ} \right] \approx 95\%$. Práctico: 40-65%

Bajo nivel de ruido

Modular (apilamiento)

• inconvenientes:

Caras de fabricar

Vida útil corta

Requerimientos variables del combustible

Los diversos tipos existentes difieren en el electrolito utilizado y, por tanto, en el ión involucrado, en el catalizador, que suele ser platino o níquel y en la temperatura de funcionamiento. El conjunto de características condiciona sus aplicaciones. Estas características aparecen en la tabla 12 donde aparecen los principales tipos, que pueden clasificarse por el nivel de temperatura y por su principal aplicación futura.

Las de baja temperatura son la de membrana y cambio de protón (PEM), la alcalina (A) y la que emplea metanol (DM). A nivel intermedio funciona la de ácido fosfórico (PA) y a alta temperatura, la de carbonato fundido (MC) y la de óxido sólido (SO). Las

reacciones electroquímicas anódicas y catódicas se detallan en la tabla 13.

Ha de destacarse que el sentido en que se desplazan los iones involucrados depende del signo de la carga del ión. En el ión hidrógeno (H^+), caso de las pilas PEM y PA el sentido es del ánodo al cátodo. En el resto, alcalina (A), en que el ión es OH^- , de carbonato (MC) en que es CO_3^{2-} y en la de óxido (SO) en que es O^{2-} , el sentido es del cátodo al ánodo.

Las membranas empleadas suelen ser de un material plástico, de los que los más empleados son el poliacido perfluorosulfónico de General Electric y el Nabion de Dupont, ambos relacionados con el conocido teflón. En el resto de las pilas los electrolitos están dados en la tabla 12.

Las aplicaciones futuras más previsibles y de mayor importancia corresponden a los ámbitos del transporte y de la producción de electricidad. Algunos valores típicos de las pilas que reúnen las características más apropiadas para alimentar automóviles, camiones, autobuses e incluso aviones desde los puntos de vista de potencia, recorridos sin repostar y rendimientos se dan en la tabla 14. Su rendimiento puede ser superior, pero, por ahora, su recorrido sin repostar no es comparable a los motores de explosión y combustión y solo supera al motor eléctrico.

TABLA 12: Características de las diversas pilas de combustible

Pila	Electrolito	Temperatura, °C	Catalizador	Combustible	Venenos	Rendimiento,	Aplicaciones
Alcalina (A)	KOH (8-12 N)	50-250	Pt, Ni/NiOx	H_2	$\text{CO}_1 \text{CO}_2$	60-90	Espaciales
De membrana y cambio de protón(PEM)	Membrana	50-90	Pt	H_2 puro o reforzado	$\text{CO} > 10 \text{ ppm}$	40-60	Portátil, automoción
De metanol (DM)	Membrana	50-90 (≤ 130)	Pt	CH_3OH	Compuesto intermedios	45	Portátil, automoción
De ácido fosfórico (PA)	H_3PO_4 (85-100%)	180-200	Pt	H_2 de reformado	$\text{CO} > 1\%$ $\text{H}_2\text{S} > 50 \text{ ppm}$	40	Producción de electricidad, Cogeneración, Automoción
De carbonato fundido (MC)	Carbonatos fundidos (Li,K,Na)	650	Ni/LiNiOx	H_2 y CO de reformado, CH_4	$\text{H}_2\text{S} > 0,5 \text{ ppm}$	> 50	Producción de electricidad, cogeneración
De óxido sólido (SO)	Óxido sólido ($\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$)	750-1050	Ni/Perovskitas	H_2 y CO de reformado, CH_4	$\text{H}_2\text{S} > 1 \text{ ppm}$	50-65	Producción de electricidad, cogeneración

TABLA 13: Reacciones electroquímicas de las diversas pilas de combustibles

Pila	Reacción anódica	Reacción catódica	Ión conductor en el electrolito
Alcalina (A)	$\text{H}_2 + 2 \text{OH}^- \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow 2 \text{OH}^-$	OH^-
De membrana y cambio de protón (PEM)	$\text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$1/2 \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	H^+
De ácido fosfórico (PA)	$\text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$1/2 \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	H^+
De carbonato fundido (MC)	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$1/2 \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{CO}_3^{2-}$	CO_3^{2-}
De óxido sólido (SO)	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$1/2 \text{O}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{O}^{2-}$	O^{2-}

TABLA 14: Las pilas de combustible y otros medios de transporte

Medio	Potencia, kW	Recorrido sin repostar, km	Rendimiento %
De membrana de cambio de protón (PEM)	10-200	500	45-55
Con metanol (DM) y membrana	20-30	500	30
De ácido fosfórico (PA)	20-200	300	40
Motor de gasolina	10-100	600	25-30
Motor Diesel	10-200	800	30-35
Turbina de gas	10-200	600	35-40
Acumulador eléctrico	10-100	100-300	65
Vehículo híbrido motor-eléctrico comb.int.	10-100	500	40-50

TABLA 15: Las pilas de combustible y otros medios de producción de electricidad

Medio	Potencia, MW	Vida útil, años	Rendimiento, %
De ácido fosfórico (PA)	0,2-10	5	40-45
De carbonato fundido (MC)	1-100	5	50-55
De óxido sólido (SO)	1-100	5	50-60
Central térmica (carbón, fueloil, gas)	≈1000	>30	25-35
Turbina de gas	100-1000	>20	25-60
Hidroelectricidad	0,1-1000	>40	65
Central nuclear	≈1000	>40	35
Energía eólica	0,1-1	>10	75
Fotovoltaica	01-1	>10	10

TABLA 16: Vehículos con pila de combustible

Año	Empresas	Combustible y almacenamiento	Potencia kW	Energía auxiliar	Tipo de vehículo	Recorrido sin repostar, km
1993	Ballard	H ₂ a presión	120	No	Autobús	160
1994	Daimler-Chrysler	H ₂ a presión	54 netos	No	Furgoneta	130
1996	Toyota	H ₂ a presión	50 netos	No	Furgoneta	250
1996	Ballard	Hidruro metálico	20	Acumulador de plomo	Automóvil	250
1997	Daimler-Chrysler	H ₂ a presión	205 netos	No	Autobús	400
1997	Daimler-Chrysler	Metanol con reformado	50	No	Automóvil	>400
1997	Mazda	Hidruro metálico	20	Supercondensador	Automóvil	170
1997	DC	H ₂ a presión	190 neto	No	Autobús	250
1998	Renault	H ₂ líquido	30	Acumulador de Ni	Todo terreno	400
1998	Opel	Metanol con reformado	50	Acumulador de Ni	Mini	-
1999	Daimler-Chrysler	H ₂ líquido	70	No	Automóvil	400
1999	Ford	H ₂ a presión	75	No	Automóvil	96
1999	Nissan	Metanol con reformado	10	Acumulador de Li	Todo terreno	-
1999	Honda	Hidruro metálico	60	Acumulador de Ni	Automóvil	-
1999	Honda	Metanol con reformado	60	Acumulador de Ni	Todo terreno	-
2000	General Motors	Hidruro	75	Acumulador de Ni	Todo terreno	800

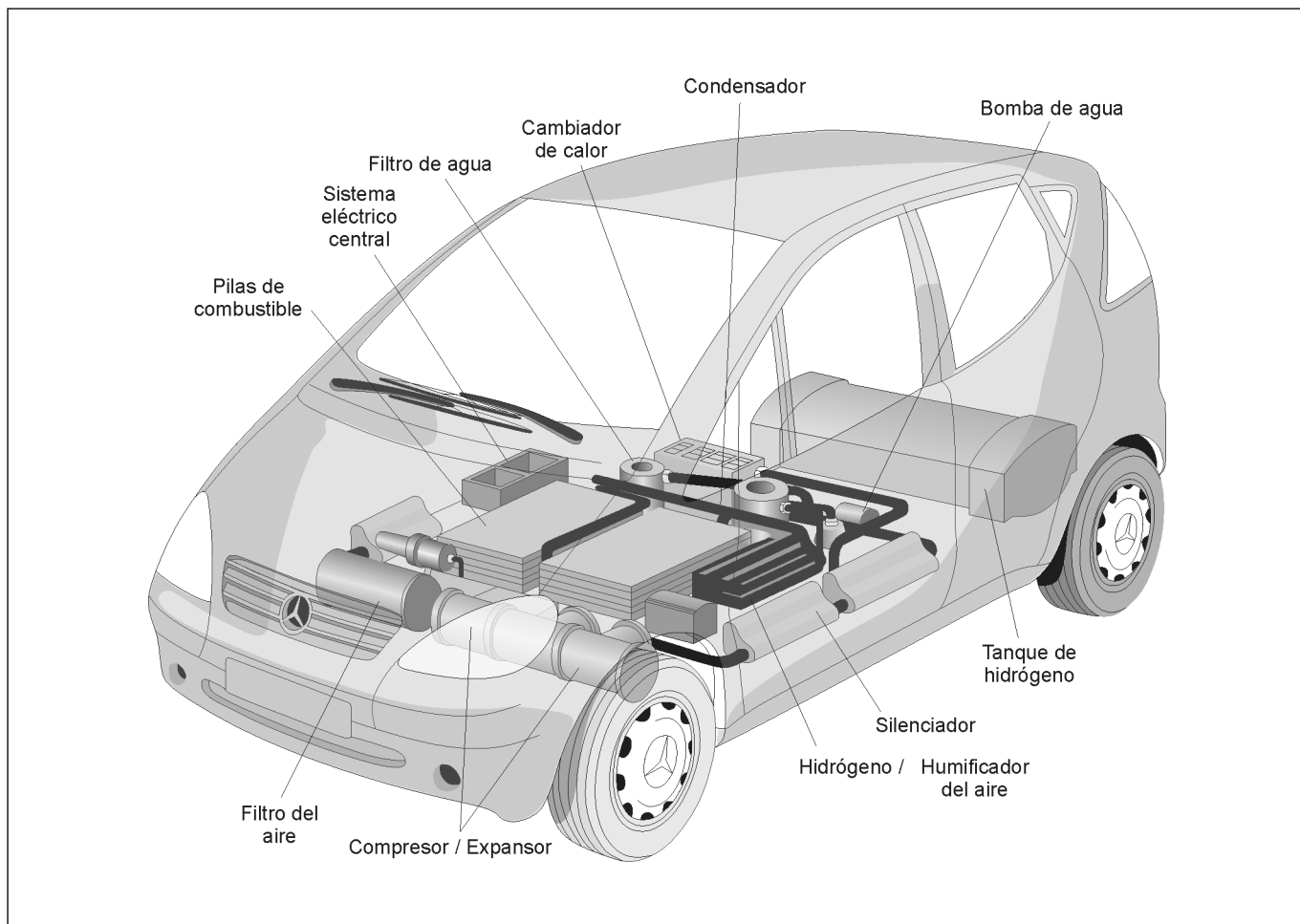
Cuando la comparación se hace sobre la generación de electricidad, las pilas tienen rendimientos próximos a los de la energía hidroeléctrica. En cambio su vida útil es todavía demasiado baja (tabla 15).

En otras aplicaciones, las pilas tipo PEM son las utilizadas. Sirven, y de hecho ya se utilizan, para aparatos portátiles, que ahora emplean baterías eléctricas, como tomavistas, unidades de televisión móviles, ordenadores y para pequeños generadores de electricidad.

Durante los últimos años, las grandes empresas automovilísticas, los fabricantes de pilas y algunos centros de I+D y Universidades han unido sus fuerzas para obtener experiencia en diversos tipos de pilas y vehículos con distintos combustibles y métodos de almacenamiento de hidrógeno. Algunos ejemplos se dan en la tabla 16.

Puede comprobarse la gran diversidad de soluciones ensayadas. Además de las más conocidas marcas de automóviles y camiones figura entre las empresas una de las más avanzadas en la fabricación de pilas de todo tipo, que es la canadiense Ballard. El más corriente combustible es el hidrógeno gas a presión pero también se utilizan el hidrógeno líquido, el reformado de metanol y algunos hidruros. En algunos casos se dispone un generador auxiliar de electricidad para el arranque o para atender picos de demanda que suele consistir en una batería de acumuladores.

El problema más importante para seleccionar el combustible en los vehículos, especialmente en los automóviles pequeños, es el volumen ocupado por el depósito correspondiente. El hidrógeno gaseoso, aún a presión, ocupa un gran volumen y aunque el hidrógeno produzca tres veces más energía que la gasolina, la

**Figura 6**

cantidad en masa que incorpora es relativamente baja por lo que hay que repostar con gran frecuencia. En su mayoría los fabricantes de vehículos optan por el empleo del hidrógeno líquido, hidruros o metanol para los vehículos de menor tamaño y, en cambio, por el gas a presión para aquellos, como autobuses o vehículos de transporte, en el que el volumen destinado al depósito de combustible es menos crítico.

Es evidente que en el caso de los hidruros como en el del metanol también cuenta el volumen de la unidad de descomposición o del reformado, respectivamente.

Una vista de este tipo de vehículos se da en la figura 6.

Aparte de las ventajas inherentes a las pilas, su aplicación a los vehículos hace tener otras como es su facilidad de arranque a cualquier temperatura, ya que

la pila PEM funciona a baja temperatura y no necesita llegar a las altas temperaturas a las que funcionan los motores de explosión. Otra ventaja es su fácil adaptación y por ello su inmediata respuesta a las variaciones de la demanda.

Existen ya numerosos automóviles con pilas de hidrógeno que circulan por carreteras europeas gracias a las ayudas y subvenciones de la Unión Europea. E igualmente hay ya en Alemania, entre otros países, estaciones de servicio, hidrogeneras, que suministran hidrógeno gas a presión e hidrógeno líquido.

En Estados Unidos y en muchos países de Europa, entre ellos España, circulan autobuses movidos por pilas de hidrógeno en ciudades con el fin de evitar la contaminación del ambiente. Normalmente estos vehículos pertenecen a las redes municipales del transporte público interurbano o a flotas que prestan ser-



Figura 7



Figura 8



Figura 9

vicios entre puntos fijos interciudades. Cualquiera de ellas funciona con una instalación central de almacenamiento o producción de hidrógeno.

Esto ocurre con los autobuses que circulan en Barcelona y Madrid. Vease las figuras 7 y 8.

Uno de los vehículos donde se ha ensayado el hidrógeno como combustible es el avión. La industria

aeronáutica europea ha llevado a cabo el proyecto "Cryoplane", avión propulsado con hidrógeno líquido (figura 9) en el que parece que el depósito de combustible está situado en la parte superior. Un proyecto semejante se ha llevado a cabo en Rusia con un avión Antonov. Ninguno de ellos ha funcionado más allá de las pruebas.

Otro caso extremo es el descrito, pero no producido en serie, de una motoscúter con una pila de 3 kW que, con un peso inferior a 6 kg ha obtenido velocidades de hasta 50 km por hora y una autonomía de 180 km.

En cuanto a la generación de electricidad, la utilización más extendida ha sido en unidades de potencias bajas. Tienen las ventajas de poder instalarse en las ciudades y poblaciones sin producir ruidos, ni emisiones contaminantes. La empresa alemana Siemens ha puesto en el mercado pilas de 250 kW de carbonatos y de óxidos y algunas otras, entre ellas Panasonic, ofrecen pilas para producir simultáneamente electricidad y agua caliente.

Otro de los campos que ofrecen buenas perspectivas para el futuro es el de las pequeñas pilas para dispositivos eléctricos y electrónicos portátiles que se basan en los tipos PEM y sobre todo en la pila que consume metanol.

CONCLUSIONES

A modo de conclusiones podrían citarse las siguientes:

Las ventajas principales del uso del hidrógeno es su ausencia de emisiones contaminantes.

El hidrógeno no es una energía primaria. Es solo un vector para su transporte y utilización.

Como vector solamente puede competir con la electricidad por su más fácil almacenamiento. Para el transporte solamente puede competir con los hidrocarburos en cuanto a su no emisión de gases de efecto invernadero. Puede complementar a la electricidad.

Para producir hidrógeno hay que utilizar una fuente de energía primaria u otra forma de energía derivada como la electricidad.

Actualmente, en gran escala, se emplea el gas natural, el petróleo y el carbón vía gasificación. En escala menor, la electrolisis.

En el futuro podrá obtenerse de energías renovables y de energía nuclear (fisión, quizá en futuro próximo y fusión después), sobre todo por consideraciones ambientales.

La expansión del empleo del transporte depende de cuatro factores, todos ellos a desarrollar: producción, almacenamiento, distribución y empleo de las celdas de combustible.

La producción industrial, ahora ya sustancial, constituirá un obstáculo solamente si el crecimiento de la demanda es alto y continuado.

El almacenamiento del hidrógeno gas no presenta dificultades pero requiere un gran desarrollo en su aplicación a la automoción en forma líquida.

La distribución para transportes terrestres depende del establecimiento de una red adecuada, lo que requiere evidentemente un aumento notable del

número de vehículos y debe comenzar por las flotas de camiones y autobuses de recorridos fijos.

El empleo de las pilas de combustible, que tienen un rendimiento energético mucho más elevado que la combustión, es una forma de atenuar las pérdidas en la transformación térmica del hidrógeno, pero requieren todavía considerable experiencia industrial para aumentar su duración y rendimiento y reducir sus costes de inversión y operación.

BIBLIOGRAFÍA

1. R.E. Kirk – D.S. Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 3ª ed. John Wiley, (1978).
2. A.J. Appleby y F.R. Foulkes, *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, (1989).
3. K. Kordesch y G. Sinader, *Fuel Cells and their Applications*. John Wiley, (1996).
4. U.S. Department of Energy, *Fuel Cells: A Handbook*, 4ª edición, (1998).
5. J.O. Ogjen. *Annual Review Energy Environ*, 227-279 (1999).
6. D. Voss, *Science*, 682-5 (1999).
7. S. Srinivasan, R. Mosdale, P. Stevens y C. Yang, *Annual Review Energy Environ.*, 281-328 (1999).
8. A. Contreras y otros, *Int. J. Hydrogen Energy*, 1041-52 (1999).
9. K. Kendall, *Nature*, 233-5, 265-7 (2000).
10. Actas de la Reunión de París (Francia) sobre Producción Nuclear de Hidrógeno, 2-3 octubre 2000, NEA-OCDE. París (2001).
11. L. Schlapbach y A. Züttel, *Nature*, 353-8 (2001).
12. N.S. Lewis, *Nature*, 589-90 (2001).
13. Z. Zou y otros, *Nature*, 625-7 (2001).
14. M. Grätzel, *Nature*, 338-44 (2001).
15. R. George y K. Hassman, *Siemens Power Journal*, 5-17 (2001).
16. B.C.H. Steele y A. Heinzl, *Nature*, 345-352 (2001).
17. R.F. Service, *Science*, 1222-4 (2002).
18. T. Happe y otros, *Trends in Plant Science*, 246-50 (2002).