

Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM

Félix Barreras, Antonio Lozano
 LITEC, CSIC – Universidad de Zaragoza
 María de Luna, 10. 50015 – Zaragoza

1. Introducción

La revolución industrial marcó el comienzo de una etapa en la que la generación energética mundial ha estado basada en el uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural). Desde entonces, los consumos de estas materias primas y las emisiones de contaminantes asociadas a su combustión han ido incrementándose paulatinamente. Según la Administración de Información Energética de los Estados Unidos (EIA), la evolución del consumo de petróleo se ha triplicado desde 1960 (figura 1a), lo que ha generado serias dudas sobre las reservas disponibles para el futuro [1]. Este aumento coincide con el incremento de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera (figura 1b) y la aparición de fenómenos como el efecto invernadero o la lluvia ácida que están convirtiéndose en graves problemas medioambientales e incluso de salud pública [2].

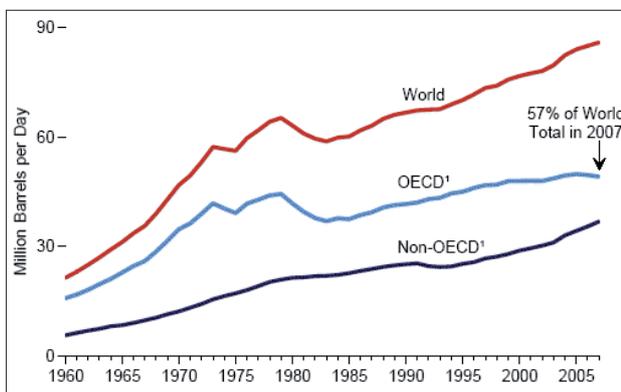


Figura 1. a) Evolución del consumo de petróleo mundial desde 1960 hasta 2005.

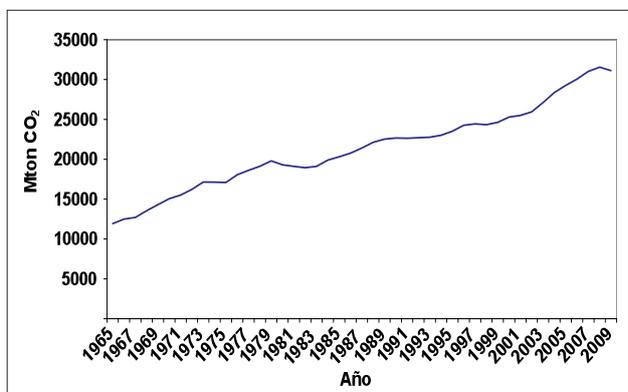


Figura 1. b) Evolución de las emisiones mundiales de CO₂ entre 1965 y 2009.

Ante esta situación tan preocupante, y de acuerdo con los fines de la política energética mundial, los objetivos específicos medioambientales de la política energética de la UE [3] tienden a:

- Reducir el impacto medioambiental de la producción y consumo energéticos.
- Promover el ahorro y la eficiencia energética.
- Aumentar el porcentaje de producción y uso de energía más limpia.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

Teniendo en cuenta este marco de actuación internacional, la escasez de combustibles fósiles, así como las estrictas limitaciones en las emisiones de gases de efecto invernadero impuestas por el Protocolo de Kyoto, se está promoviendo la búsqueda de métodos alternativos a la combustión de hidrocarburos para la producción de energía. Es importante también tener en cuenta que, según la Agencia Europea de Medioambiente (EEA), el transporte es el segundo sector en contribución de emisiones de gases de efecto invernadero, y constituye un 17% del global de las emisiones de CO₂ [4]. Debido a su gran carga contaminante, la automoción es uno de los sectores que mayor interés suscita en la búsqueda de alternativas tecnológicas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

La diversificación de actuaciones y alternativas que se están desarrollando en este sector es una de las claves para minimizar su impacto, tanto a corto como a largo plazo. Para ello se proponen varias acciones:

Uso de biocombustibles

Los biocombustibles son considerados como una energía renovable, ya que son producidos a partir de la biomasa. Dentro de los biocombustibles, los biocarburantes son los destinados al uso en motores de combustión interna (MCI). Los biocarburantes son un sustituto directo e inmediato para los combustibles fósiles líquidos ligeros utilizados en el transporte (gasolina, diésel). La forma más común de utilización es introduciendo un porcentaje de biocombustible mezclado con el combustible fósil [5]. Esto permite que puedan ser fácilmente integrados en los sistemas logísticos actualmente en operación. Por tanto, puede ser considerada como una medida parcial a corto plazo, que disminuye las emisiones netas procedentes de los combustibles fósiles dando lugar a un periodo de transición hacia el desarrollo de otras tecnologías capaces de sustituir a los derivados del petróleo como fuente energética en el transporte.

Existen dos tipos de biocarburantes: el biodiésel y el bioetanol. Ambos proceden de materias primas vegetales, a través de transformaciones biológicas y físico-químicas. El biodiésel se obtiene a partir de la transesterificación de aceites vegetales y grasas animales con un alcohol ligero, como metanol o etanol. Por otro lado, el bioetanol se obtiene fundamentalmente de semillas ricas en azúcares mediante fermentación directa, como es el caso de la caña de azúcar, la remolacha o el sorgo dulce, que contienen azúcares simples, o bien mediante la hidrolización y posterior fermentación, en el caso de otros cultivos ricos en carbohidratos más complejos como los cereales.

Desarrollo de vehículos eléctricos puros

Los vehículos eléctricos no son una tecnología nueva. Fue a mediados del siglo XIX cuando Robert Anderson creó el primer carruaje eléctrico de la historia en Escocia. Desde entonces, han ido apareciendo en el mercado nuevos diseños, de modo que el motor eléctrico se ha convertido en un medio de propulsión común, no solo en coches, sino también en otros sectores como los trenes, tranvías y autobuses.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



En el siglo XX y con la aparición del MCI, ambas tecnologías coexistieron. Sin embargo, el rápido desarrollo de los MCI y sus mejores prestaciones, en contraposición con el estancamiento sufrido en el desarrollo de las baterías, consiguieron finalmente desbancar a los coches eléctricos, quedando relegados estos últimos a su aplicación en trenes, tranvías o pequeños vehículos [6]. En las últimas décadas, con la creciente preocupación por la contaminación ambiental y la escasez de recursos fósiles, los vehículos eléctricos se han convertido en una de las mejores alternativas a corto o medio plazo, sobre todo para su uso en áreas urbanas. Durante este periodo, las normativas a nivel mundial han incentivado la creación de vehículos de emisión cero. En 1990, la actuación estadounidense denominada *Air Clean Act*, o la Directiva Europea 89/458/EEC fueron las primeras en establecer criterios de reducción de emisiones en los coches y la potenciación de tecnologías alternativas al MCI [7,8]. Desde entonces, con la mejora de la tecnología de las baterías eléctricas, y el continuo endurecimiento de los límites legales de emisión, los vehículos eléctricos puros están cobrando cada vez mayor presencia en el sector de la automoción. Sólo en la UE, el número de vehículos eléctricos se ha triplicado entre 1996 y 2004.

Desarrollo de vehículos híbridos

En este sector, las tecnologías basadas en las pilas de combustible y las tecnologías eléctricas se están convirtiendo en una prometedora alternativa a los motores de combustión interna. En la actualidad el término *vehículo híbrido* se está generalizando para los vehículos que constan de un motor eléctrico combinado con un MCI, como puede ser el modelo comercial del Toyota Prius. En estos casos, las emisiones descienden notablemente, aunque siguen existiendo. Sin embargo, técnicamente un vehículo híbrido también se denomina a aquellos prototipos que combinan un sistema de generación eléctrica por pilas de combustible y baterías asociadas a un único motor eléctrico. Es en estos casos, cuando se puede hablar de sistemas de generación eléctrica basados en el concepto de emisión cero (en el punto de uso), ya que los únicos productos de la reacción son el agua y el calor en prácticamente todos los tipos de pilas de combustible [9].

2. Evolución histórica de las pilas de combustible

Al contrario de lo que puede pensarse, el concepto de la pila de combustible no es un invento moderno. Un cronograma aproximado de la evolución de las pilas de combustible se muestra en la figura 2 (página siguiente). El principio de operación de las pilas de combustible es realmente muy antiguo, descubierto por Sir William Grove en el año 1839 [10], aunque parece que un científico suizo, llamado Christian F. Shönbein, había descrito de forma independiente el mismo efecto de manera simultánea (o incluso un año antes) [11]. Fue Nernst [12] quien en 1900 dedujo la ley termodinámica que rige el principio de funcionamiento de las células de combustible y, además, fue el primer constructor de la célula de combustible de óxidos sólidos o cerámica.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



Pese a los esporádicos intentos realizados por desarrollar un dispositivo práctico, la llamada por Grove [13] *batería voltaica gaseosa* permaneció como una mera curiosidad científica durante casi un siglo. Fue otro científico inglés, Francis T. Bacon, quien retomó los trabajos sobre estos dispositivos de forma práctica en 1937, desarrollando una pila de 6 kW a finales de la década de 1950.

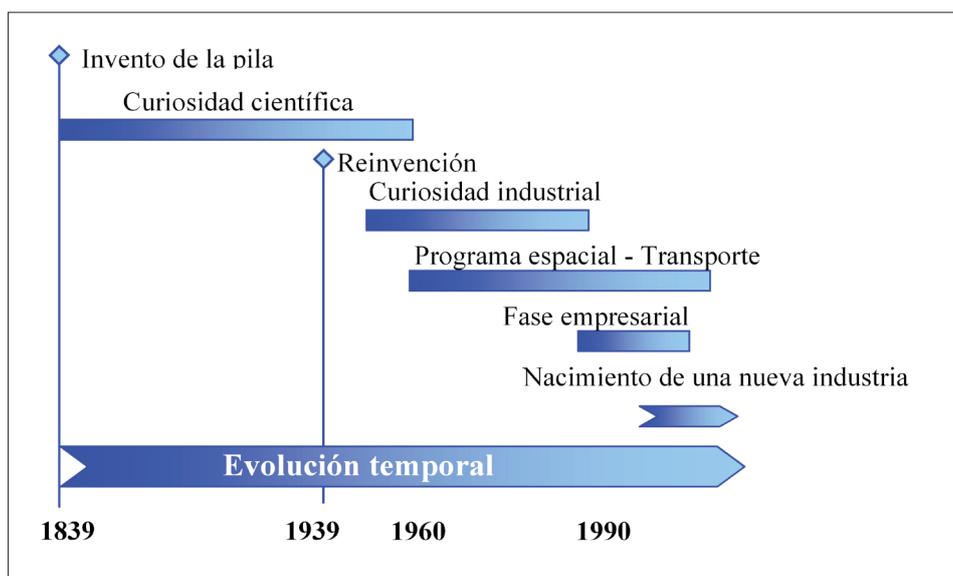


Figura 2. Cronograma de desarrollo de las pilas de combustible.

Sin embargo, la primera aplicación práctica de las pilas de combustible tuvo lugar en el Programa Espacial de los Estados Unidos. Para ello, **General Electric** desarrolló una pila alimentada por hidrógeno que se empleó en el Programa Gemini a principio de la década de 1960. Este primer desarrollo fue seguido por el del Programa Espacial Apolo (véase figura 3), el cual empleó pilas de combustible para generar electricidad empleada para el uso diario, así como en las redes de comunicaciones [14]. Estas pilas fueron desarrolladas por Pratt y Whitney, basados en la licencia tomada sobre la patente de F. T. Bacon.

A mediados de la década de 1960 **General Motors** incorporó una pila de combustible desarrollada por **Union Carbide** a una furgoneta. Pese a que las pilas de combustibles se han seguido empleando en todas las misiones especiales de los EE.UU hasta hoy día, éstas fueron «olvidadas» en las aplicaciones terrestres hasta el comienzo de la década de 1990. A partir de este momento se probaron sistemas de pilas de combustibles en todo tipo de aplicaciones, como en coches [15], autobuses, submarinos, etc.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

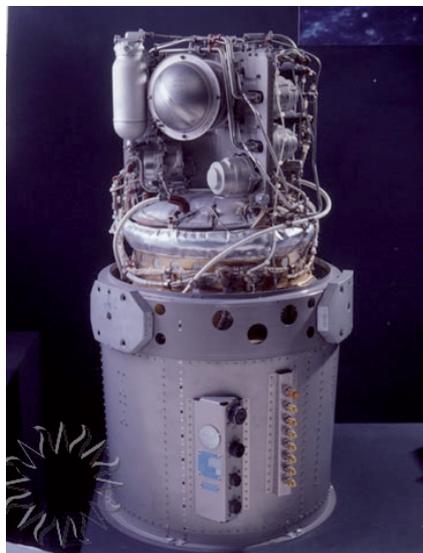


Figura 3. Pila de combustible de tipo PEM empleadas en el programa espacial Apolo del gobierno de los EE.UU.

En estos momentos, los gobiernos de los países desarrollados, liderados por EE.UU, Japón, Canadá y la Unión Europea, promueven políticas que tienden a aumentar los nichos de aplicaciones para estas tecnologías. Por ello, a día de hoy es posible decir que ha surgido una nueva industria, basada en una nueva revolución energética. Basta sólo echar un vistazo al aumento exponencial del número de patentes solicitadas sobre esta tecnología, lo que demuestra el continuo interés y participación de la comunidad científica e ingenieril de todo el mundo en su desarrollo.



Figura 4. El coche de pasajeros modelo *GreenCar* de *Energy Partners*, movido por una pila de tipo PEM probado en 1993 por *Perry Technologies*, y el sumergible de dos personas *PC-1401* desarrollado por *Ballard* en 1989.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

3. Tipos de pilas de combustible

Una pila de combustible es un sistema electroquímico que convierte la energía química directamente en energía eléctrica obteniendo como subproductos de la reacción agua y calor. A diferencia de las baterías convencionales, los reactantes son suministrados constantemente a la pila, y los productos de reacción eliminados.

En las plantas térmicas convencionales para la generación de trabajo eléctrico, el proceso de conversión está sujeto a ciclos termodinámicos (ciclo de Carnot, Otto, Rankine, etc.) que comprenden varias etapas asociadas a pérdidas energéticas intrínsecas. Normalmente, la combustión de los reactantes libera gran cantidad de energía creando una diferencia de temperatura entre dos focos, lo que provoca un gradiente térmico capaz de producir un trabajo mecánico. Sin embargo, la generación eléctrica en pilas está exenta de cualquier proceso térmico o mecánico intermedio, produciéndose la conversión directa mediante la reacción electroquímica del hidrógeno y el oxígeno. Esto provoca que se alcancen mayores rendimientos.

	PEMFC / DMFC Pilas de intercambio protónico y pilas de metanol	AFC Pilas alcalinas	PAFC Pilas de ácido fosfórico	MCFC Pilas de carbonato fundido	SOFC Pilas de óxido sólido	ZAFC Pilas de Zinc-aire
Electrolito	Polímero sólido perfluosulfonado	KOH	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃	KOH, LiOH, NaOH
Electrodos						
Ánodo	Pt/C	Ni, Ag, MeO	Pt/C	Ni poroso	Co-ZrO ₂ /Ni-ZrO ₂	Zn
Cátodo	Pt/C	Ni, Ag, MeO	Pt/C	NiO poroso	LaMnO ₃ + Si	MnO ₂
Matriz		Asbestos	SiC	LiAlO ₂		
Reacciones						
Ánodo	2H ₂ → 4H ⁺ + 4e ⁻	2H ₂ +4OH ⁻ →4H ₂ O+4e ⁻	2H ₂ → 4H ⁺ + 4e ⁻	CO ₃ ²⁻ +H ₂ →H ₂ O+CO ₂ +2e ⁻	2H ₂ +2O ²⁻ →2H ₂ O+4e ⁻	Zn+4OH ⁻ →Zn(OH) ₄ ²⁻ +2e ⁻
Cátodo	O ₂ +4H ⁺ +4e ⁻ →H ₂ O	O ₂ +2H ₂ O+4e ⁻ →4OH ⁻	O ₂ +4H ⁺ +4e ⁻ →2H ₂ O	CO ₂ +1/2O ₂ +2e ⁻ →CO ₃ ²⁻	O ₂ +4e ⁻ →2O ²⁻	O ₂ +2H ₂ O+4e ⁻ →4OH ⁻
Global	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	H ₂ +½O ₂ +CO ₂ →H ₂ O+CO ₂	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	2Zn+O ₂ →2ZnO
T [°C]	60-80	65-220	200	650	600-1000	0-60
Potencia	0-250 kW	10-100 kW	50 kW – 1 MW	0-1 MW	0-3 MW	90 W/kg
Eficiencia [%]	53-58% transporte 25-35%estacionario	60	>40	45-47	35-43	
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Back up ▪ Transporte ▪ Pequeñas aplicaciones móviles y domésticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Militar ▪ Aeroespacial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Domésticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plantas de generación energética 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plantas de generación energética ▪ Sistemas auxiliares 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Móviles y estacionarias

Tabla 1. Tipos de pilas de combustible y sus características principales.

Existen diferentes clases de pilas de combustible según el tipo de electrolito utilizado, sólido o líquido. La naturaleza del electrolito les confiere diferentes pautas de funcionamiento y características, como pueden ser la temperatura de operación, los gases reactantes, los materiales utilizados para su construcción, o incluso su vida útil y área de aplicación. Un resumen de todas ellas y sus características se muestra en la [tabla 12](#). Las pilas de combustible que operan a bajas temperaturas suelen utilizar catalizadores basados en metales

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

más nobles, como por ejemplo el platino, con el objetivo de favorecer las reacciones que se producen en los electrodos.

Entre todas ellas, las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM), o simplemente pilas poliméricas, son actualmente la opción más prometedora para las aplicaciones móviles debido a su alta eficiencia, densidad de corriente y baja temperatura de operación. Es por ello que en este artículo nos centraremos únicamente en este tipo de pilas de combustible.

4. Pilas de combustible de membrana polimérica (PEM). Principio de funcionamiento

Las pilas de combustible de tipo PEM se denominan así porque el electrolito está constituido por una membrana polimérica que separa la parte anódica y catódica de una celda. Se trata de un conductor protónico, que permite el paso a través de él de los iones H^+ , pero con la particularidad de ser impermeable al resto de sustancias.

Un esquema simplificado del funcionamiento de un pila tipo PEM puede verse en la figura 5. Básicamente, una celda está compuesta por tres zonas: un electrodo cargado negativamente (cátodo), un electrodo cargado positivamente (ánodo), y en medio la membrana electrolítica que separa físicamente los gases a ambos lados. El combustible, en este caso hidrógeno, es introducido por los canales mecanizados en la placa bipolar por el lado del ánodo y guiado a través de una capa difusora de material carbonoso hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción de oxidación del hidrógeno (Ec. 1). La capa difusora debe ser un material altamente poroso, de modo que facilite la difusión del hidrógeno para alcanzar más eficientemente las partículas de catalizador.

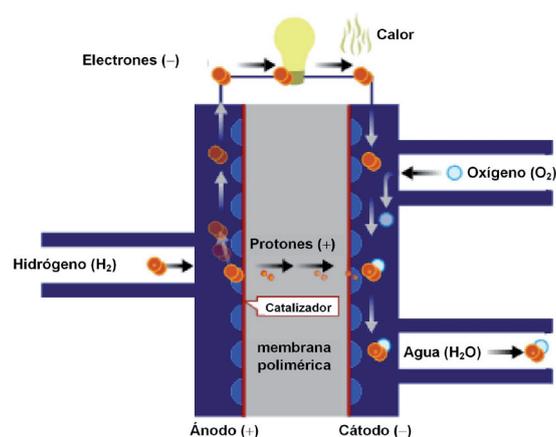


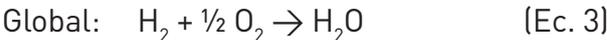
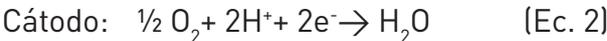
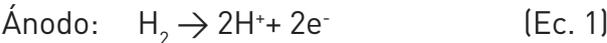
Figura 5. Esquema simplificado del funcionamiento de una pila de H_2 de tipo PEM.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

Los protones generados atraviesan la membrana polimérica de intercambio protónico, pero los electrones no pueden cruzarla, debido a que no es conductora electrónica y buscan la salida a través de un circuito alternativo: el formado por las capas difusoras (que al ser de un material carbonoso conducen la electricidad) y las placas, creando una corriente eléctrica disponible para la realización de un trabajo. Por la otra cara, el aire entra a través de los canales del cátodo, atraviesa la capa difusora y el oxígeno se combina en la capa catalítica con los protones que pasan a través de la membrana y los electrones del circuito exterior, generando agua y calor (Ec. 2). Estos dos subproductos son evacuados a través del flujo de gases en el cátodo y, en el caso del calor, además por convección (natural o forzada) con el medio que rodea a la pila.

En el caso de una configuración de varias monoceldas apiladas (lo que constituye realmente «una pila»), la circulación electrónica varía, ya que los electrones generados en el ánodo de una celda no se recombinan en la reacción catódica de la misma celda, sino en el cátodo de la celda adyacente. Es el proceso continuo de generación y recombinación en celdas consecutivas lo que provoca una circulación electrónica global a través del sistema.

Las reacciones electroquímicas descritas anteriormente pueden formularse como:



El funcionamiento descrito aquí está muy simplificado y, como es de esperar, en la práctica presenta muchas dificultades técnicas. La gestión del agua y el calor son actualmente los principales problemas que presentan estos dispositivos. Tanto un exceso como un defecto de agua o calor perjudican las propiedades de la membrana, afectando directamente el correcto funcionamiento de la pila. Debido a estas dificultades surge una nueva rama de investigación de pilas de combustible: las pilas PEM de alta temperatura [16].

Si empleamos la teoría electroquímica, para una pila de combustible de tipo PEM que emplee H_2/O_2 a 25°C, el *potencial teórico* que puede producir la misma será de 1,23 V, con una eficiencia del 83%. Sin embargo, el *potencial real* de una pila disminuye respecto de su valor teórico (ideal) debido a las pérdidas irreversibles que tienen lugar. Aunque los ingenieros mecánicos y eléctricos prefieren usar el término de *pérdidas de voltaje*, los ingenieros (electro) químicos usan términos como *polarización* o *sobrepotencial*. Todas ellas tienen el mismo significado: la diferencia entre el potencial del electrodo y el potencial de equilibrio.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



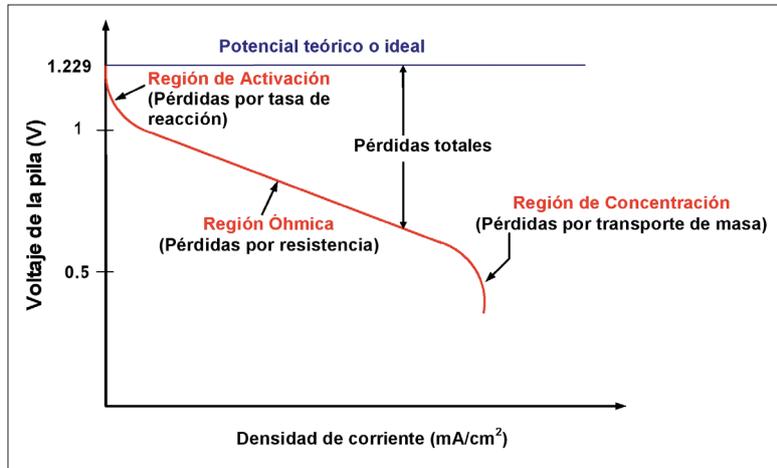


Figura 6. Curva típica de polarización (funcionamiento real) de una pila de tipo PEM.

Para los ingenieros químicos esta diferencia es la que controla la reacción, y para los mecánicos y eléctricos representa las pérdidas de la potencia final entregada por la pila. De forma general, estas pérdidas son:

- **Pérdidas por activación:** provienen de la energía de activación de las reacciones electroquímicas en los electrodos. Depende del material y la microestructura del electrocatalizador y de la actividad química de los reactantes (y, por tanto, su utilización).
- **Pérdidas Óhmicas:** se deben a la resistencia iónica en el electrolito y los electrodos, a la resistencia electrónica en los electrodos y colectores y a la resistencia de contacto. Son proporcionales a la densidad de corriente y dependen del tipo de material utilizado, la geometría de la pila y la temperatura.
- **Pérdidas por concentración (transporte de masa):** son el resultado de las limitaciones, debido a las tasas finitas de transferencia de masa de los reactantes y dependen fuertemente de la densidad de corriente y la estructura de los electrodos y las placas.

El efecto de todas estas pérdidas se puede apreciar en una gráfica V-I de la figura 6, que se conoce como curva de polarización de la pila.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

5. Componentes de una pila PEM

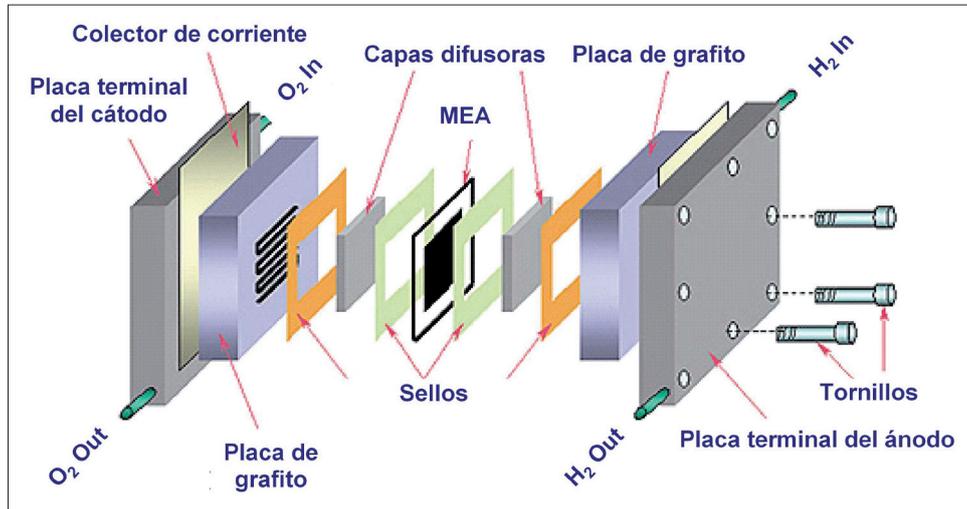


Figura 7. Elementos que componen una monocelda de una pila de tipo PEM.

Como se muestra en la figura 7, una pila de combustible tipo PEM está compuesta por varios elementos, los cuales deben de estar diseñados y optimizados para que se favorezca el desarrollo de los fenómenos físicos y químicos en el sistema. Aunque el sistema global de la pila incluya equipos auxiliares de suministro de reactantes, gestión de calor y control, en este apartado se van a describir brevemente los elementos que componen una celda propiamente dicha: el electrolito, los electrodos, las capas difusoras y las placas bipolares.

Electrolito

Las pilas PEM se caracterizan precisamente por la naturaleza polimérica de su electrolito. Se trata de una membrana sólida compuesta por un polímero sulfonado de politetrafluoroetileno (PTFE). En las pilas de tipo PEM de baja temperatura, el electrolito comercial más común es el Nafion® desarrollado por Dupont. Estas membranas se caracterizan por poseer un alto grado de conducción protónica a través de ellas, ser impermeables a los gases y aislantes eléctricos. Sin embargo, todas estas características no se cumplen absolutamente, o se dan sólo en condiciones de operación específicas, convirtiéndose en las principales causas de pérdidas de voltaje en la pila.

Aunque todavía no se tiene un conocimiento exacto de cuál es el mecanismo de transporte de los protones a través de la membrana, sí se ha comprobado que la cantidad de agua contenida en el polímero es determinante en el funcionamiento de una pila. Una correcta hidratación fomenta la circulación protónica al formarse mayor número de clusters conductivos o dipolos reorientados y, por tanto, disminuye la existencia de resistencias iónicas. Estos aspectos convierten la gestión del agua en una de las principales claves en el desarrollo de las pilas.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

Capas catalíticas

Básicamente el electrodo es una delgada capa catalítica localizada entre la membrana y las capas difusoras, tanto en el ánodo como en el cátodo. Los electrodos están formados por un material carbonoso altamente poroso (alta superficie específica) en el cual se soportan las moléculas de catalizador homogéneamente distribuidas. Es en estos centros activos donde se producen las reacciones electroquímicas del ánodo y del cátodo. En general, cuanto mayor sea el número de estos puntos de contacto, mayor número de reacciones podrán producirse simultáneamente, siendo el voltaje efectivo obtenido también más alto.

El soporte carbonoso debe poseer una elevada conductividad eléctrica, una alta porosidad y una alta estabilidad química y mecánica. Por otro lado, es necesario que la fase activa o catalizador tenga un elevado número de centros activos (deben ser partículas pequeñas y muy bien dispersas), así como una alta actividad intrínseca de los sitios activos para que sea capaz de superar los sobrepotenciales de reacción anódica y catódica, las resistencias óhmicas y las de transporte de masa.

Capas difusoras

Las capas difusoras sirven de soporte mecánico a los electrodos. Están formadas por materiales porosos buenos conductores de la electricidad, de forma que distribuyan los gases uniformemente sobre las capas catalíticas, favorezcan la extracción del agua líquida de la capa catalítica catódica y sirvan de conexión eléctrica entre las capas catalíticas y las placas bipolares.

Los principales parámetros que caracterizan a los materiales con los que se fabrican las capas difusoras son la porosidad, la compresibilidad, la permeabilidad y la conducción eléctrica y térmica. Normalmente se utilizan telas carbonosas o papeles carbonosos, capaces de dar el necesario soporte mecánico a la membrana y a la capa catalítica. Para evitar que se acumule el agua en su interior y bloquee la circulación de gases, suelen incorporar un material hidrófobo (normalmente teflón).

Normalmente, estos tres elementos (membranas poliméricas, las dos capas catalíticas y las dos capas difusoras) forman una única unidad llamada "sistema membrana-electrodo" (MEA según la literatura inglesa). Las capas catalíticas se pueden depositar empleando diferentes métodos tanto sobre ambas caras de una membrana polimérica (formando una MEA de tres-capas) o sobre las caras de las dos capas difusoras. En cualquiera de los dos métodos, para la formación de las MEAs de 5-capas hay que emplear sistemas de presión en frío o caliente.

Placas bipolares, monopolares, colectores de corriente y terminales

En el caso de monoceldas únicamente existen dos placas que encierran entre sí al resto de componentes. En estos casos, estas placas deben poseer las conexiones de entrada y salida de gases, los canales para la distribución de gases en la superficie del electrodo, así como

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



del sistema de cierre. Sin embargo, en pilas formadas por varias celdas la configuración de los elementos mecánicos se divide en diferentes tipos según su función. Éstos son:

- Placas bipolares y monopolares:

Son los elementos que forman las celdas ubicadas entre las placas terminales. A diferencia de las bipolares, las cuales tienen celdas a ambos lados, las monopolares son aquellas que sólo tienen una celda en una de sus caras, mientras que la otra está en contacto con el colector de corriente de una de las placas terminales. Sus principales funciones imponen los requisitos o características principales que deben tener los materiales, tal como se muestra en la tabla 2.

Función	Característica del material
Conectar eléctricamente celdas adyacentes	Material buen conductor eléctrico
Distribuir eficientemente los gases sobre los electrodos a través de los canales y favorecer la evacuación del agua	Fácilmente conformables, para poder crear las geometrías de canal óptimas
Extraer el calor generado en las áreas activas	Material buen conductor térmico
Dar soporte estructural a los electrodos sin incrementar excesivamente el peso	Materiales rígidos, resistentes a la compresión y ligeros
Separar gases de celdas adyacentes	Estabilidad química e impermeabilidad

Tabla 2. Funciones de las placas bipolares y requisitos necesarios de los materiales.

Actualmente existen varios materiales que cumplen los requisitos mencionados en la **Tabla 3**. Algunos de los más comunes son los electrografitos, los materiales compuestos (composites), el acero inoxidable y otros materiales metálicos, como el aluminio, a los que se aplican tratamientos superficiales con recubrimientos especiales para evitar la corrosión y la disolución de iones.

- Colectores de corriente:

Este elemento tiene como función cerrar el circuito eléctrico de la pila y permitir la conexión con la aplicación exterior que demande la corriente eléctrica generada. Incluso en el caso de monoceldas suelen ser un elemento independiente separado de las placas terminales. Por lo general, suelen estar hechos de un material muy buen conductor, como cobre, o bien de otro metal recubierto con una fina capa de oro para mejorar la conducción.

- Placas terminales:

En los casos en los que existen colectores de corriente como elementos individuales, las placas terminales quedan exentas de esta función y pueden ser fabricadas en materiales no conductores. Sobre ellas recae la responsabilidad del cierre y hermeticidad de la pila, por tanto su diseño debe estar enfocado para permitir un apriete homogéneo de todos los ele-

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



mentos interiores. Un cierre ineficiente puede contribuir a la existencia de fugas al exterior de los gases reactantes con los consiguientes peligros que conlleva, y al aumento de las resistencias de contacto, disminuyendo la eficiencia global de la pila. Además deben incluir las conexiones para la entrada y salida de reactivos y productos.

- Sellos y juntas

Los sellos y juntas forman parte del sistema de sellado de las pilas. Son los elementos encargados de evitar las fugas de gas al exterior de la pila o el cruce de gases de una cara a otra de una misma celda. Pueden ser elementos individuales o componentes integrados en el propio electrodo.

Los materiales más comunes para su fabricación son polímeros termoplásticos capaces de soportar las condiciones de operación de la pila, como el teflón (PTFE), caucho de etileno propileno dieno (EPDM), fluoruro de vinildieno (VDF), siliconas, etc.

6. Formación de una pila (*stack*)

Una vez visto que una monocelda puede entregar un voltaje real que oscila entre 0,45 - 0.55 V (véase figura 6) podríamos preguntarnos, ¿qué aplicación práctica requiere sólo de ese pequeño voltaje?, o ¿cómo podemos garantizar una potencia determinada a un consumidor dado con un voltaje tan pequeño?

Ponga por ejemplo, que a una monocelda se le requiere entregar una potencia de 1 kW. Para ello sería necesario generar una corriente eléctrica mayor de unos 2.000 A, la cual se podría conseguir con un área activa de aproximadamente unos 4.000 cm², ya que la densidad de corriente no es mayor de 0,5 A/cm². En efecto, esta idea no es práctica, ni siquiera posible. Una solución más efectiva sería la de conectar eléctricamente varias unidades en serie, de forma que el área activa del electrodo (y por tanto la corriente generada) se reduzcan proporcionalmente con el número de celdas que se conecten.

A este proceso descrito se le conoce como *formación de una pila* (o un *stack* según la literatura inglesa) y se muestra de forma esquemática en la figura 8. El mismo consiste en una sucesión de celdas individuales, cada una de ellas formadas por las placas bipolares y los conjuntos membrana electrodos.

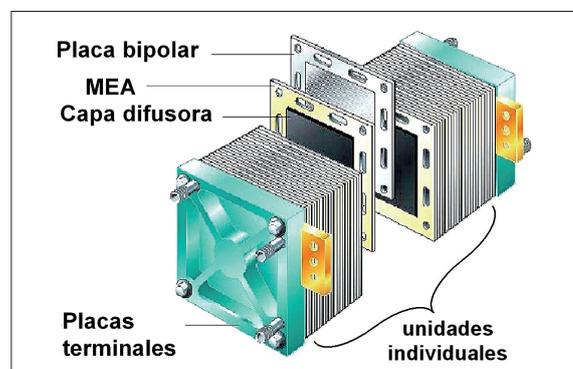


Figura 8.
Apilamiento de varias celdas individuales en serie formando una pila (*stack*).

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

El primer paso para diseñar una pila es definir el tamaño del área activa y el número de unidades que la formarán. En efecto, cuando un *stack* se diseña para una aplicación dada, los datos del diseño vienen impuestos por los requerimientos de la aplicación a la cual se va a entregar la energía eléctrica que se produzca, tales como el voltaje y la potencia, quedando fijada la corriente a generar por la ecuación,

$$I_{Total} = \frac{P}{V_{Total}} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde P es la potencia, V_{Total} es el voltaje de la pila, e I_{Total} la corriente total. En el proceso de apilamiento en serie de las celdas, el voltaje total de la pila es la suma de todos los voltajes individuales, o el producto del voltaje promedio por el número total de celdas,

$$V_{Total} = \sum_{i=1}^{N_{celdas}} V_i = \bar{V} \cdot N_{celdas}, \quad (\text{Ec. 5})$$

mientras que el área activa de electrodo se puede calcular como,

$$A_{electrodo} = \frac{I_{Total}}{j}, \quad (\text{Ec. 6})$$

donde j es la densidad de corriente, cuyo valor normalmente oscila entre 0,3 - 0,5 A/cm².

De forma general, el potencial de la pila y la densidad de corriente no son parámetros independientes, sino que están relacionados a través de la curva de polarización. Estas curvas normalmente se determinan de forma experimental en bancos de ensayos demandando a la pila diferentes potencias empleando para ello cargas electrónicas dinámicas. Un ejemplo de curva de polarización tanto para una monocelda como para un *stack* se muestra en las gráficas de la figura 9.

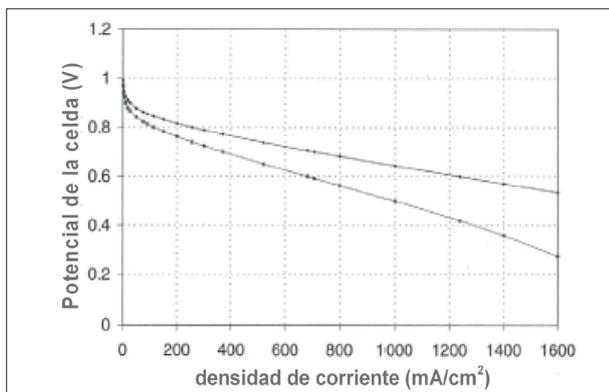


Figura 9. a) Curva de polarización típica de una monocelda.

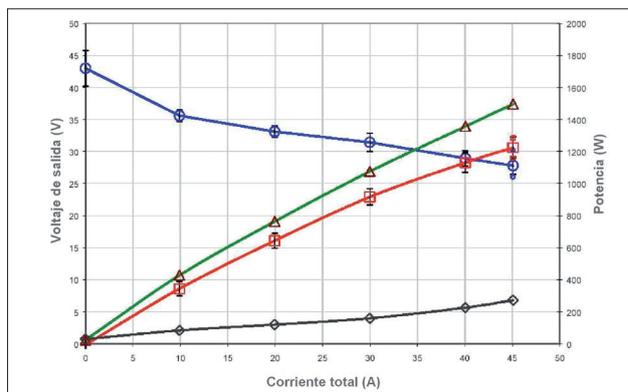


Figura 9. b) Stack.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



Tanto el número de celdas como el tamaño del área activa tienen límites físicos o tecnológicos. Por ejemplo, un número muy grande de celdas con áreas muy pequeñas dificultan el alineamiento y el ensamblaje de la pila, mientras que un número pequeño de unidades individuales con áreas activas muy grandes resulta en una combinación de elevada corriente/bajo voltaje que elevaría las pérdidas resistivas en los cables de conexión. Pilas con áreas activas de hasta 1.000 cm² (aunque el rango más típico de trabajo está entre los 50 y los 600 cm²) y con 200-250 celdas se han probado satisfactoriamente. Para áreas de electrodo grandes es muy difícil garantizar la distribución uniforme de los gases reactantes sobre las capas catalíticas, mientras que el número máximo de celdas está limitado por las fuerzas de compresión, la rigidez estructural y la pérdida de presión en la circulación de los gases que ocasionan largos conductos.

7. ¿Por qué se necesitan las pilas de combustible?

Evidentemente, las pilas de combustible son una tecnología energética muy prometedora con infinidad de posibles aplicaciones. Son precisamente las diferentes propiedades que tienen estos dispositivos las que las convierten en muy atractivas, sobre todo cuando se comparan con otras tecnologías convencionales de conversión de la energía. Éstas son:

- **Alta eficiencia:** la eficiencia de una pila es mucho más alta que la de los actuales motores de combustión interna (MCI), por lo que los dispositivos electroquímicos son muy prometedores para su uso en automóviles. Además, la eficiencia de un sistema de pila de combustible es tan alta como la de las centrales térmicas, por lo que pueden emplearse como sistemas de generación descentralizados.
- **Bajas (o cero) emisiones:** al emplear hidrógeno como combustible, las emisiones resultantes de una pila son *cero*, si el mismo se producen mediante energías renovables o empleando energía nuclear, porque sólo generan como subproductos calor y agua. Esta característica las hace atractivas también para aplicaciones en espacios cerrados, así como en submarinos. Sin embargo, las tecnologías actuales para obtener hidrógeno, principalmente el reformado por vapor de hidrocarburos, hace que existan emisiones de dióxido de carbono, pero muy inferiores a las producidas por combustión.
- **Estrategia política:** el hidrógeno necesario para operar un sistema de pila de combustible se puede obtener a partir de fuentes autóctonas de energía (energías renovables, nuclear, biomasa o carbón). Por ello, el uso de estos sistemas reduciría nuestra dependencia del petróleo y del gas natural. Sin embargo, el uso generalizado del hidrógeno tiene que venir aparejado con el desarrollo de toda la infraestructura necesaria para su producción y distribución, lo que se hace llamar «economía del hidrógeno».
- **Simplicidad y (promesa de) bajos costes:** las pilas de combustible son sistemas extremadamente simples, compuestos de distintas «capas» de elementos repetitivos y no tienen

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



partes móviles. Debido a esto, las pilas tienen la posibilidad de ser producidas de forma masiva con unos costes iguales o menores que los de las tecnologías de conversión de energía actuales. Hoy en día, las pilas son caras debido al uso de materiales costosos como las membranas poliméricas y los metales nobles, como el platino, usados en los catalizadores.

- **Vida útil larga:** al no tener partes móviles, se puede esperar que las pilas sean muy duraderas. Los sistemas que se emplean actualmente en aplicaciones automotrices tienen una vida aceptable (3.000-5.000 horas), pero esta durabilidad debe aumentar en un orden de magnitud para que sean competitivas en sistemas estacionarios, donde se requieren entre 40.000 y 80.000 horas.
- **Modular:** por naturaleza, las pilas de combustible son modulares, pudiendo aumentar la potencia generada simplemente aumentando el número de unidades. Por ello, la producción masiva de los sistemas de pilas pueden ser significativamente menos costosos que las tradicionales centrales térmicas
- **Silenciosas:** esta propiedad hace a estos sistemas muy atractivos a una gran variedad de aplicaciones como unidades portátiles, sistemas de *backup* o aplicaciones militares.
- **Tamaño y peso:** existen pilas de combustibles de tipo PEM de todas las potencias, desde microvatios a megavatios. El tamaño y peso para aplicaciones en automóviles es similar al de los MCI, mientras que la relación potencia/peso es mucho mejor que la de otros sistemas como las baterías de plomo-ácido, por ejemplo.

8. Algunas aplicaciones de las pilas de combustible

Gracias a todas estas propiedades, las pilas de combustibles ya se han ensayado en una gran variedad de aplicaciones. Entre éstas están:

- Automóviles:

La mayoría de compañías fabricantes de coches han probado y desarrollado al menos un prototipo movido por esta nueva tecnología, mientras otras tienen ya varias «generaciones» de estos vehículos. Algunas compañías trabajan en el desarrollo de sus propias tecnologías (General Motors, Toyota, Honda), mientras otras (DaimlerChrysler, Ford, Nissan, Mazda, Hyundai, etc.) compran los sistemas de pilas a fabricantes como Ballard, UTC Fuel Cells, y DeNora.



Texto publicado en la página web www.energia2012.es

Año internacional de la Energía Sostenible para todos

- Motos *scooters* y bicicletas:

Varias compañías como Palcan, Asian Pacific, Manhattan Scientific, etc., han demostrado la posibilidad de emplear estos sistemas en motos y bicicletas, usando el hidrógeno almacenado tanto en botellas como en forma de hidruros metálicos, o usando pilas de metanol directo.



- Coches para campos de golf y vehículos utilitarios:



Energy Partners enseñó el primer prototipo de estos coches en 1994, para su uso dentro de la villa olímpica en los Juegos de Los Ángeles 1996. Esta compañía también convirtió tres vehículos utilitarios modelo *Gator de John Deere* a sistemas de pilas de combustible, siendo empleados en el aeropuerto de Palm Spring (1996).

- Sistemas de *backup* y regenerativos:

Ballard lleva desde el año 2002 comercializando, conjuntamente con *Coleman* sistemas de *backup* de 1 kW de potencia. Asimismo, combinando su tecnología de electrolizadores con pilas *Nexa de Ballard*, *Proton Energy System* demostró este tipo de sistemas, los cuales generan su propio hidrógeno en los periodos de exceso de electricidad.



- Sistemas portátiles:



Muchas compañías como MTI, Motorola, NEC, Fuji, Matsushita, Medis, Manhattan Scientific y Polyfuel desarrollan sistemas miniaturizados de pilas de tipo PEM para reemplazar a las baterías en diferentes dispositivos electrónicos y militares. La mayoría de éstos emplean metanol directo o incorporan micro-reformadores en pilas tipo PEM.

- Industria aeronáutica:

En 2004 Boeing probó un sistema en el cual modificó un aeroplano movido por un motor reemplazándolo por una pila de combustible conectada a un motor eléctrico, regresando al sistema de hélice. En España, en el año 2008 voló por primera vez un pequeño avión tripulado de hélice con una pila de combustible de hidrógeno. El vuelo se realizó en el aeródromo de Ocaña, a 60 kilómetros de Madrid. El aparato, una avioneta biplaza convencional *Dimona* fabricada en Austria pero modificada por un equipo de ingenieros madrileños del Centro de Investigación y Tecnología de Boeing, se mantuvo en el aire durante 20 minutos utilizando un sistema híbrido formado por una pila de combustible y baterías de ión-litio.



Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



• Trenes, barcos y submarinos:



El *Propulsion Research Institute* creó un consorcio que demostró el uso de una locomotora movida por una pila desarrollada por *DeNora*. De igual forma, la empresa alemana *MTU Friedrichschaffen* desarrolló un velero de forma conjunta con *Ballard* movido por una pila de 20 kW, el cual probó en el lago Constanza. El buque de pasajeros *FCS Alsterwasser* (que aparece en la foto de la derecha) es el primero del mundo impulsado por un motor híbrido que utiliza una pila de combustible a base de hidrógeno. Desde el año 2008 navega en las aguas del puerto de Hamburgo.



En 1989 *Perry Technologies* desarrolló de forma satisfactoria el primer submarino comercial movido por un sistema de pila de combustible, el sumergible de dos personas *PC-1401*, usando una pila de *Ballard*. Siemens también suministra sistemas de este tipo para submarinos grandes usados por las marinas de Alemania, Canadá, Italia y Grecia. En España, el astillero de *Navantia* en Cartagena (Murcia) ha recibido la pila de combustible del sistema *AIP (Air Independent Propulsion)* correspondiente al *S-81*, el primero de los submarinos de la serie 80 que la empresa pública española está construyendo para la Armada. La pila de combustible ha sido desarrollada por la empresa estadounidense *UTC*, una de las empresas líderes mundial en el sector.

Para saber más

De forma general, puedes consultar las principales referencias bibliográficas que hemos empleado para complementar este texto. Estas son:

- [1] Annual Energy Review, U.S. Energy Information Administration, 2008.
- [2] Statistical Review of World Energy 2010, U. S. Energy Information Administration, 2010.
- [3] La energía y el medio ambiente en la Unión Europea, Agencia Europea de Medio Ambiente, Copenhague, 2002.
- [4] Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2009. Tracking progress towards Kyoto targets, European Environment Agency, Copenhague, 2009.
- [5] J.M. García-Camús, J.Á. García-Laborda, Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, Informe de vigilancia tecnológica, Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), Madrid, 2006.
- [6] M.H. Westbrook, The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars, Institution of Electrical Engineers, London, 2005.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



- [7] Clean Air Act, U.S. Environmental Protection Agency, EPA, 1990,
- [8] Directiva UE 89/458/EEC, European Environment Agency (EEA),
- [9] G.J. Offer, D. Howey, M. Contestabile, R. Clague, N.P. Brandon, Energy Policy 38 24-29.
- [10] Grove, W. R., On Voltaic Series and the Combination of Gases by Platinum, London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 3, 14, pp. 127-130-420, 1839.
- [11] Bossel, U., The Birth of the Fuel Cell 1835-1845 , in European Fuel Cell Forum, Oberrdorf, Switzerland, 2000.
- [12] Nernst, W., Über die electklytische leitung fester köper bei sehr hohen temperaturen, Z. Elektrochem., 6(2), 41-3, 1899.
- [13] Grove, W. R., On a Gaseous Voltaic Battery, London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 3, 21, pp. 417-420, 1842.
- [14] Barbir F., Fuel Cells-Theory and Practice, Ed. Elsevier Academic Press, 2005.
- [15] Nadal, M. and F. Barbir, Development of a Hybrid Fuel Cell/Battery Powered Electric Vehicle, in D. L Block and T. N. Veziroglu (editors). Hydrogen Energy Progress X, Vol. 3 (International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL, 1994) pp. 1.427-1.440.
- [16] J. Zhang, Z. Xie, J. Zhang, Y. Tang, C. Song, T. Navessin, Z. Shi, D. Song, H. Wang, D.P. Wilkinson, Z.-S. Liu, S. Holdcroft, Journal of Power Sources 160 (2006) 872-891.

O también, puedes explorar en internet y acceder a las siguientes páginas, donde podrás encontrar más información. Ten en cuenta que algunas están en inglés y que a veces el lenguaje puede resultar poco claro porque no se han escrito con fines divulgativos. Estas son:

http://www.es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible

<http://www.fuelcells.org/>

<http://www.fuelcelltoday.com/>

http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/diccionario/celulas_de_combustible.htm

<http://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/alternative-fuels/fuel-cell.htm>

<http://www.fueleconomy.gov/feg/fuelcell.shtml>

Texto publicado en la página web **www.energia2012.es**



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA

