

PILAS DE COMBUSTIBLE, UNA ALTERNATIVA IMPORTANTE EN EL DESARROLLO ENERGÉTICO

Dr. C. T. Eduardo Tomás Lincheta Mesa¹

1. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba.

Resumen

Los dispositivos electroquímicos conocidos como “pilas de combustible” son fuentes de energía eléctrica con muy bajos niveles de contaminación ambiental (estrictamente cero en el punto de uso), una alta eficiencia y un bajo nivel de ruido. Las aplicaciones en las que pueden emplearse estos dispositivos electroquímicos son muy variadas, abarcando desde las portátiles con micropilas como cargadores de móviles, suministro de energía para ordenadores portátiles hasta las estacionarias en unidades de alimentación ininterrumpida o de back-up, unidades de calor y potencia para casas y urbanizaciones; así como las móviles (automóviles, sillas de rueda, vehículos especiales y otros). Desde el 2007 hasta el presente el autor del presente trabajo ha colaborado con los especialistas del Laboratorio de Tecnologías de la Combustión de Zaragoza, España (LITEC) y del trabajo conjunto se han derivado diferentes diseños, de placas y terminales que aplicados en las pilas, han demostrado la posibilidad real de su introducción en la práctica, las que han sido registradas como patentes en Cuba y España. Los estudios experimentales por simulación numérica y en ensayos de laboratorio en escala real, han determinado valores de eficiencia que garantizan una distribución homogénea del flujo de los gases reactantes sobre las capas catalíticas, con mejor resultado que las variantes comerciales y otros diseños existentes; así como un arrastre eficiente del agua que se genera por reacción química en los cátodos de las pilas tipo PEM.

Palabras Clave: Pila de combustible, placas bipolares

Introducción

La escasez de las reservas petrolíferas sumadas al problema ambiental generado por las emisiones de gases de combustión, ha orientado la búsqueda hacia nuevas fuentes alternativas de energía que permitan resolver el primero de los problemas sin perturbar significativamente al ambiente. La problemática energética, ya prevista desde hace décadas, y la conciencia ambiental cada vez más activa conducen a una situación que debe resolverse de manera creativa en lo técnico y lo político para no ocasionar serios perjuicios a las economías no sólo de las empresas energéticas sino también de todas las actividades humanas. Por lo pronto es un hecho la conversión de las petroleras en empresas energéticas que puedan manejar las variadas alternativas que la producción y la gestión de la energía requerirá en un futuro muy próximo.

Un combustible elegido mundialmente para cumplir con los propósitos económicos y ambientales señalados, es el hidrógeno (H_2), que por no existir en esta forma química en la naturaleza, debe obtenerse a partir de otras fuentes de energía (p. ej. hidroeléctrica, eólica, solar, etc.) a partir de materia prima abundante, como por ejemplo el agua. En ese sentido el hidrógeno actuaría esencialmente como un transportador de energía que puede aprovecharse. Los motores de combustión interna basados en hidrógeno han adquirido en el presente un interesante grado de desarrollo y se están utilizando en sistemas experimentales.

Equivalencias caudal de hidrógeno - producción eléctrica*

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

*Basadas en poder calorífico inferior

Fuente: ARIEMA

Comparativa hidrógeno - otros combustibles

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

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

Fuente: ARIEMA

Por otro lado, se ha renovado el interés por la aplicación tecnológica de las llamadas pilas de combustible. Las pilas de combustible son dispositivos que producen electricidad y agua mediante el proceso inverso a la electrólisis, aportando ventajas, que de forma general se representa en la Fig. 1.

Estos son dispositivos que teóricamente tienen la capacidad de producir energía eléctrica de forma indefinida, mientras se suministra combustible y oxidante a los electrodos. Sólo la degradación o el mal funcionamiento de los componentes limitan la vida de operación práctica de las pilas de combustible.



Figura 1 Esquema mostrando la transformación de la energía química en eléctrica, por medio de los procesos tradicionales de generación eléctrica y por medio de una pila de combustible.

El principio de funcionamiento en el que se basan las pilas de combustible (Fig 2) es el inverso al de la reacción electrolítica; oxígeno e hidrógeno se combinan para formar agua con producción de energía

eléctrica y calor. Se trata, por lo tanto, de una reacción limpia, en la que el único subproducto es el vapor de agua que puede ser liberado a la atmósfera sin ningún peligro para el medio ambiente.



Figura 2 Esquema simple de componentes y reacciones en una Pila

En un sistema energético basado en el hidrógeno, los vectores energéticos serían el hidrógeno y la electricidad, mutuamente complementarios. La electricidad puede conseguirse a partir del hidrógeno en pilas y el hidrógeno puede obtenerse a partir de la electricidad mediante la electrólisis del agua. Este conjunto cumple las dos condiciones necesarias de un sistema energético sostenible, posibilita el almacenamiento de energía y es un producto energético que puede transportarse a largas distancias.

El estado actual del tema indica que las pilas de combustible están llamadas a constituir la forma de administrar energía en el futuro próximo, obtenida principalmente a partir de hidrógeno y oxígeno que, mediante el dispositivo electroquímico se combinan en forma indirecta para generar energía eléctrica y como excedente, agua. No se abandona sin embargo la posibilidad de emplear combustibles alternativos que impliquen menores problemas de seguridad en su manejo sin introducir daños ambientales.

Las pilas de combustible son dispositivos que permiten generar energía eléctrica, mediante procesos no contaminantes, y proporcionar energía térmica para varias aplicaciones. La potencia nominal de las pilas de combustible oscila desde algunos W hasta MW para unidades portátiles y estacionarias, respectivamente [1].

Estos dispositivos pueden utilizar varios tipos de combustibles ricos en hidrógeno, tales como el gas natural, gasolina, biogás, alcoholes o el propano. La utilización de hidrocarburos genera derivados tales como el CO y el CO₂, pero dada la elevada eficiencia de estos dispositivos, para cantidades equivalentes de energía eléctrica producida, las emisiones de CO₂ pueden ser reducidas a la mitad o menos, con el correspondiente beneficio medioambiental. Funcionan a diferentes presiones y temperaturas, las cuales varían desde la presión atmosférica, hasta 100 veces ésta y desde 20 °C hasta 1000 °C [2].

Por otra parte, las energías renovables y las tecnologías basadas en el hidrógeno, como vector energético, actualmente se consideran como una excelente alternativa para amortiguar, en parte, los aspectos negativos de un escenario energético altamente contaminante. En este sentido, los excedentes de

producción de energía eólica, solar o hidráulica, pueden destinarse a la producción de hidrógeno mediante un electrolizador y utilizar el mismo para inyectarlo en las pilas de combustible. La energía eléctrica generada por las pilas de combustible, puede apoyar a los sistemas interconectados en las horas punta o abastecer la red eléctrica en los sistemas aislados de potencia [3].

En este contexto, la tecnología de las pilas de combustible presenta numerosas características que les otorga un prometedor futuro. En relación con su elevada eficiencia, se puede destacar que además es poco dependiente del tamaño del sistema, permitiendo su utilización en diferentes rangos energéticos mediante diseños modulares. Por otra parte, pueden operar a media carga, manteniendo usos óptimos del combustible. Estas últimas precisiones favorecen su integración en sistemas de generación distribuida, trigeneración energética y tecnologías híbridas [4-5], concretamente en el diseño de Micro-redes eléctricas aisladas o interconectadas [6].

En la figura 3, se puede observar un resumen de las distintas tecnologías de pilas de combustible. En ella se observa que las modalidades de alta temperatura, SOFC (óxido sólido) y MCFC (carbonato fundido), presentan tiempos de arranque elevados y por eso son más interesantes para trabajar con carga constante. Las tecnologías de baja temperatura, PEMFC (con membrana de intercambio protónico), DMFC (con membrana de intercambio protónico), AFC (alcalina, hidróxido de potasio) y PAFC (ácido fosfórico), tienen tiempos de arranque inferiores y pueden trabajar como unidades generadoras.

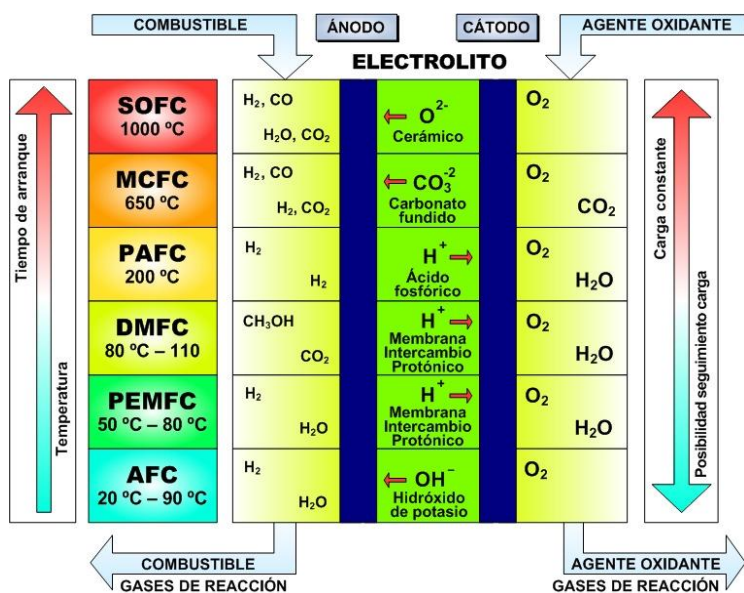


Figura 3. Tecnologías de pilas de combustible

Todo lo señalado anteriormente, refleja la necesidad e importancia de que por diferentes vías, se trabaje en esta línea de producción de energía y se profundice en el estudio, la investigación y en el desarrollo de ideas, para la creación de variantes en el diseño de sus componentes; así como en el desarrollo de proyectos que con participación internacional contribuyan a ir creando las condiciones tecnológicas, en el país, tanto de experimentación científica, como desde el punto de vista industrial; lo cual contribuirá a su vez, en la preparación de los técnicos y profesionales necesarios, para su integración a las nuevas tecnologías de posible aplicación en el futuro próximo.

Desarrollo

Antecedentes y perspectivas

A comienzos del siglo XIX, el hidrógeno fue utilizado como fuente de energía para la iluminación de las calles de París por Philippe Lebon, formando lo que hoy se llama “gas de síntesis”, una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, desplazando a las lámparas de aceite y petróleo utilizadas hasta entonces.

El primer motor de hidrógeno, descrito por el reverendo W. Cecil en 1820, se movía por la presión de la atmósfera sobre el vacío causado por la explosión de una mezcla de hidrógeno y aire. Entre 1860 y 1879, N. A. Otto, inventor del ciclo de su nombre, utiliza gas de síntesis como combustible en un motor de explosión para automóviles, pero el desarrollo del carburador impuso la utilización de la gasolina que había sido considerada más peligrosa en un principio que el gas. El hidrógeno también se ha utilizado como materia prima para la industria química, para aumentar el rendimiento de los motores de reacción y como combustible para cohetes.

El descubrimiento de la pila de combustible por William Robert Grove en 1839, abre nuevas posibilidades de uso final para el hidrógeno. La primera pila tenía electrodos de platino y utilizaba ácido sulfúrico como electrolito, con hidrógeno y oxígeno como combustible, para producir electricidad y agua. Sin embargo el desarrollo de las máquinas térmicas y las pilas convencionales disminuyeron el interés por esta tecnología.

En 1953, Francis Thomas Bacon, construyó un prototipo de pila utilizando hidrógeno y oxígeno con un electrolito alcalino, en lugar de electrolitos ácidos, y electrodos de níquel, más baratos que los de platino utilizados anteriormente, que fue la base para los diseños utilizados en los programas Geminis y Apolo por General Electric. Actualmente, la Lanzadera Espacial de la NASA, utiliza pilas de combustible para producir agua potable y electricidad para la tripulación.

Las primeras aplicaciones en vehículos fueron realizadas en Estados Unidos con pilas alcalinas, un tractor con una pila de 15 kW y un automóvil que usaba una pila de 6 kW como complemento a un sistema de propulsión eléctrico, el combustible era hidrógeno a presión y alcanzaba una autonomía de 300 km; no obstante lo alcanzado en esos momentos, no era competitivo desde el punto de vista económico con otros sistemas existentes cuyas fuentes eran derivados de la combustión del petróleo.

La crisis del petróleo de 1973 y la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía y proteger el medio ambiente, junto con las recientes y estrictas limitaciones en las emisiones de gases de efecto invernadero impuestas por los Protocolos de Kyoto y de otros eventos internacionales, que posteriormente se han desarrollado; obligan a buscar métodos de producción de energía alternativos a la combustión, todo lo cual ha impulsado el desarrollo de las investigaciones con diferentes procedimientos y tecnologías para obtener energía limpia y renovable, entre las que se encuentran los diferentes componentes de las pilas de combustibles, como son los materiales de fabricación y los diseños geométrico de las placas, electrodos, electrolitos, y en los sistemas periféricos, compresores, intercambiadores, sistemas para almacenar hidrógeno; entre otros recursos. Todo ello dirigidos al estudio y la experimentación de los modelos que se van obteniendo, para el análisis comparativo que determine una mayor eficiencia, con un mínimo de afectación al medio ambiente y en un costo comercial cada vez más factible para su aplicación generalizada.

En esta carrera científico técnica por alcanzar fuentes alternativas, competitivas desde el punto de vista económico y al mismo tiempo con resultados que permitan disminuir las afectaciones ambientales, se han generado múltiples proyectos y tareas de investigación en la mayoría de los países, como se puede apreciar, por ejemplo en lo siguiente: Japón fue el primer país en establecer un plan nacional para la

utilización del hidrógeno y las pilas de combustible como base de un nuevo sistema energético, en Estados Unidos desde enero del 2003 se desarrolla la “hydrogen fuel initiative” con un presupuesto de 1.200 millones y en Europa avanza la Plataforma Tecnológica del Hidrógeno y las Pilas de Combustible, todo ello con el objetivo de acelerar el desarrollo de tecnologías capaces de producir, transportar, almacenar y utilizar el hidrógeno paralelamente al desarrollo de pilas de combustible para vehículos, de manera que en el año 2030 el hidrógeno pueda ser competitivo en el sector del transporte.

Sobre esta base, se ha considerado importante analizar, en el presente trabajo uno de los tipos de pila de gran proyección para aplicaciones portátiles (ordenadores portátiles, teléfonos móviles, etc.) y para el transporte automotor, ya que tiene un tamaño reducido y trabaja a bajas temperaturas, es el sistema caracterizado por tener una membrana de intercambio de protones como electrolito, denominada como tipo PEM, según las siglas provenientes del idioma inglés. Con este tipo de pila de combustible se puede generar energía eléctrica con una elevada densidad volumétrica, másica o de potencia y su baja temperatura de funcionamiento le permite desarrollar ciclos de arranques prácticamente instantáneos.

PILA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO

Una pila PEM está formada, fundamentalmente por los sistemas membrana-electrodos (MEA según la literatura inglesa) y las placas. Si las MEAs son el corazón electroquímico de estos dispositivos, las placas (bipolares o monopolares refrigeradas) son los elementos mecánicos que definen su correcto funcionamiento. Además de éstos, son también necesarios una serie de elementos adicionales requeridos para su montaje final como son las placas terminales, las juntas y sellos, los tornillos y tuercas, así como otros elementos de conexión y aislamiento.

La pila de combustible de membrana de intercambio protónico o pila de combustible polimérica (PEM) ofrece densidades de corriente mucho mayores que las de cualquier otro tipo de pilas de combustible, con la excepción de algunas pilas alcalinas desarrolladas para aplicaciones espaciales. Las pilas PEM pueden ser alimentadas por combustibles reformados y con aire. La utilización de un polímero sólido como electrolito elimina la corrosión y los problemas de seguridad asociados a los electrolitos líquidos. Su temperatura de funcionamiento es baja, lo que permite arranques instantáneos. Los reactivos típicos utilizados en una pila de combustible, llamada también celda o célula de combustible del tipo PEMFC (proton exchange membrane fuel cell), son hidrógeno en el lado del ánodo y oxígeno en el lado del cátodo. Generalmente, los reactivos “*fluyen hacia dentro*” y los productos de la reacción “*fluyen hacia fuera*”.

Se consiguen densidades de corriente cercanas a los $900\text{mA}/\text{cm}^2$ a una tensión de 0,7 V por celda con hidrógeno y oxígeno a unas cuatro atmósferas de presión. Si el hidrógeno y el oxígeno se introducen a presión ambiente, se pueden alcanzar densidades de $530\text{ mA}/\text{cm}^2$.

En un stack (conjunto de celdas en serie que conforman una pila de 5kW, Ballard [7] ha alcanzado a 0,7 V densidades de corriente cercanas a $680\text{mA}/\text{cm}^2$. Las dimensiones del stack son 250 x 250 x 425 mm, por lo que en este caso se obtienen rendimientos de $190,7\text{ kW}/\text{m}^3$, aunque en la actualidad en los ensayos e investigaciones que se realizan se están alcanzando resultados con cifras que se aproximan a los $500\text{kW}/\text{m}^3$.

La eficiencia eléctrica de un stack depende mucho de la tensión a la cual cada monocelda opera. Para una misma tensión, una PEM es capaz de entregar más corriente y por consiguiente más potencia que pilas como las PAFC, MCFC o SOFC, o lo que es lo mismo, para una misma potencia una pila tipo PEM tiene tamaño más reducido y menor costo. Sin embargo, si utilizamos como combustibles hidrocarburos, la

eficiencia de las pilas como MCFC o SOFC es mayor, ya que el calor que producen se puede utilizar en el proceso de reformado de manera más eficiente, además de poder aprovechar este calor residual para producir más electricidad con cogeneración [7].

El principio de funcionamiento de las pilas se basa en la descomposición del combustible en el ánodo, gracias a la presencia de un catalizador, en electrones e iones. Un medio electrolítico líquido o sólido separa el ánodo del cátodo, y permite únicamente el paso de los iones a través del mismo, impidiendo que los electrones puedan atravesarlo. Cuando la corriente electrónica se hace circular por el exterior de la pila, el dispositivo actúa como generador de electricidad. Finalmente, electrones e iones se recombinan en el cátodo. Cuando el combustible es hidrógeno y el agente oxidante oxígeno, la reacción que se produce en el cátodo es la recombinación del oxígeno, protones y electrones, con lo que los únicos productos de la reacción son agua y calor, como se ejemplifica a continuación (Fig.4).

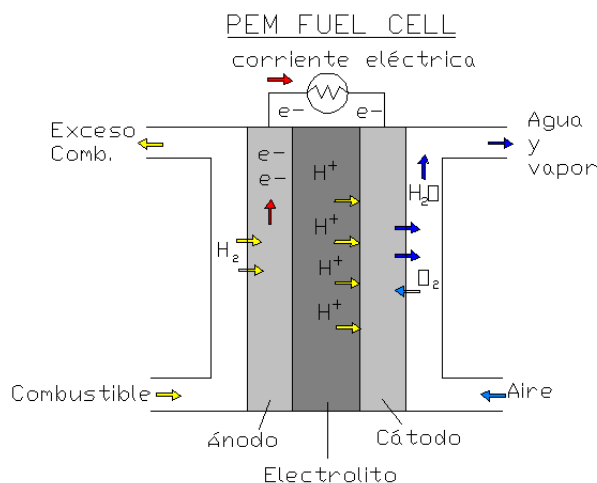


Figura 4 Esquema simple del funcionamiento de una célula de combustible

El hidrógeno (H_2) penetra por el electrodo negativo (ánodo) y se disocia, en presencia del catalizador, en iones positivos H^+ (protones) y electrones. El oxígeno (O_2) procedente del aire penetra por el electrodo opuesto (cátodo) y se disocia igualmente en presencia del catalizador en iones O_2^- . Los iones positivos del hidrógeno se escapan a través del electrolito en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo. Si existe un conductor eléctrico entre el ánodo y el cátodo los electrones lo recorrerán, produciendo corriente eléctrica. En el cátodo los iones de hidrógeno, el oxígeno y los electrones se vuelven a combinar para formar moléculas de agua. En este ejemplo, el único residuo es vapor de agua o agua líquida.

En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar el agua. Es importante mencionar que para que los protones puedan atravesar la membrana, esta debe estar convenientemente humidificada dado que la conductividad protónica de las membranas poliméricas utilizadas en este tipo de pilas depende de la humedad de la membrana. Por lo tanto, es habitual humidificar los gases previamente al ingreso a la pila.

La celda básica de la pila de combustible tipo PEM está integrada por la membrana polimérica, recubiertas por dos capas porosas de carbono o electrodos, impregnados con platino como sustancia principal; lo que en su conjunto se le conoce como un ensamble membrana electrodo (MEA en inglés). La MEA se fabrica prensando los dos electrodos a la membrana a una temperatura de $130^\circ C$ y presión de 2,16 Mpa por tres minutos. Las capas de difusión del gas que están en contacto inmediato con la membrana catalizadora, se hacen con papel o tela recubierta de carbón poroso hidrofobizado. La MEA se monta entre

dos placas, que en su parte frontal presentan ranuras con diferentes configuraciones geométricas, que permiten la conducción eléctrica y la distribución del combustible y el aire o el oxígeno para su funcionamiento (Fig. 5)

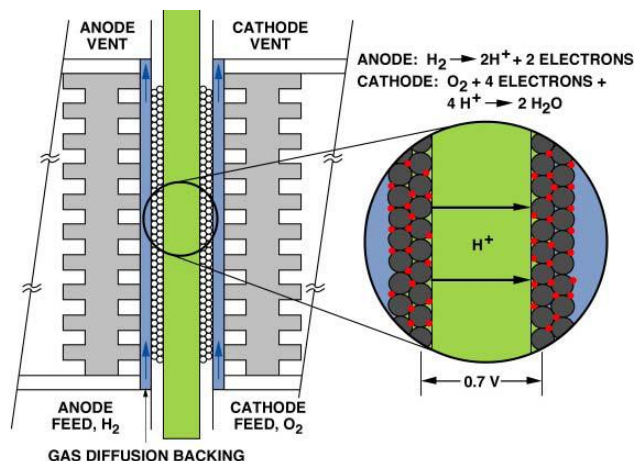


Figura 5 Esquema simple de componentes y reacciones en una celda

En la fabricación de las pilas de combustible, en sus diferentes variantes, actualmente se realizan considerables estudios con vista a lograr la eficiencia requerida con un mínimo costo de las mismas, por ello son múltiples los diseños que se evalúan a nivel de laboratorio, entre los que se destacan la configuración geométrica de las ranuras en las placas, ya sean monopolares o bipolares, con y sin enfriamiento; del sistema de juntas de sello entre placas, para evitar la fuga de gases y al mismo tiempo los ensayos para evaluar la correcta conducción eléctrica, la vida útil de los diferentes materiales posibles a aplicar en su fabricación, tanto en las placas, los terminales y los vinculados con los componentes de la MEA (Fig. 5A).

Si las MEAs son el corazón electroquímico de estos dispositivos, las placas (bipolares o monopolares refrigeradas) son los elementos mecánicos que definen su correcto funcionamiento. Además de éstos, son también necesarios una serie de elementos adicionales requeridos para su montaje final como son las placas terminales, las juntas y sellos, los tornillos y tuercas, así como otros elementos de conexión y aislamiento.

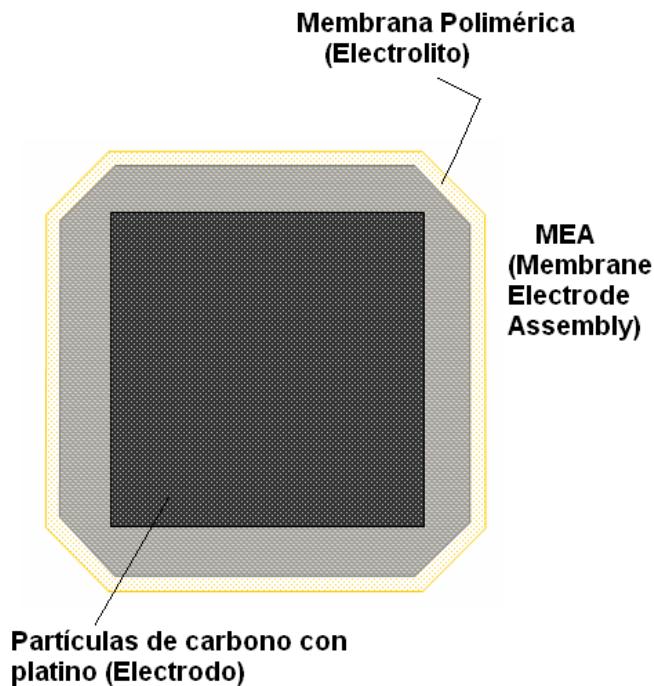


Figura 5A Imagen representativa de la MEA

PLACAS BIPOLARES

Las placas bipolares constituyen el elemento primario del sistema de distribución del flujo de gases reactantes en las pilas de combustible de tipo PEM. Estos elementos representan casi el 90% del peso total de una monocelda y cerca del 45% del de un stack, donde se montan en serie las diferentes celdas individuales que integran la pila. Las placas desempeñan diferentes funciones dentro de una pila, las que pueden resumirse como sigue:

- Distribución homogénea del flujo de gases sobre los electrodos.
- Ayudan a la evacuación del agua que se genera en el cátodo.
- Son los puentes de conducción eléctrica de la pila.
- Conforman las monoceldas en el stack.
- Ayudan a extraer el calor de las áreas activas (en ausencia de placas refrigerantes)

En el mercado existen gran variedad de diseños en placas bipolares (Figura 6) sin embargo, este componente es un objeto destacado en los proyectos de investigación que se realizan internacionalmente, pues en dependencia de su geometría y materiales de fabricación, así serán los resultados a alcanzar, donde se requiere de un material de bajo peso, buen conductor de la electricidad, resistente al desgaste y la corrosión; unido a la necesidad del menor costo posible, para lograr eficiencia y competitividad comercial. Los diferentes modelos de flujo que se emplean en las placas bipolares (conocidos como “topologías”) y los materiales que se utilizan facilitan estas funciones.

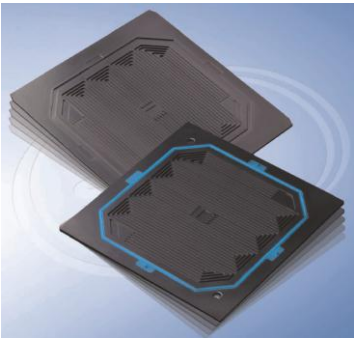


Figura 6 Placa de compuestos de grafito de la firma alemana Schunk

Tipos básicos de geometrías de flujos

Debe indicarse que, muchas veces, las placas bipolares que se emplean en los cátodos y en los ánodos pueden tener diferentes tipos de geometrías. La selección y optimización de las diferentes geometrías afectan fuertemente el comportamiento de la PEMFC, especialmente por el manejo del agua y la distribución del flujo de gases sobre los electrodos. Además del tipo de topología de flujo, el dimensionado de los canales y nervios deben ser tenidos muy en cuenta (Figura 7). Se ha demostrado que el espesor de los canales y de los nervios influye en la efectividad de la difusión de los gases y el manejo del agua en el cátodo. La capacidad de la membrana de intercambio de protones de soportar el diferencial de presiones también depende del ancho de los canales.

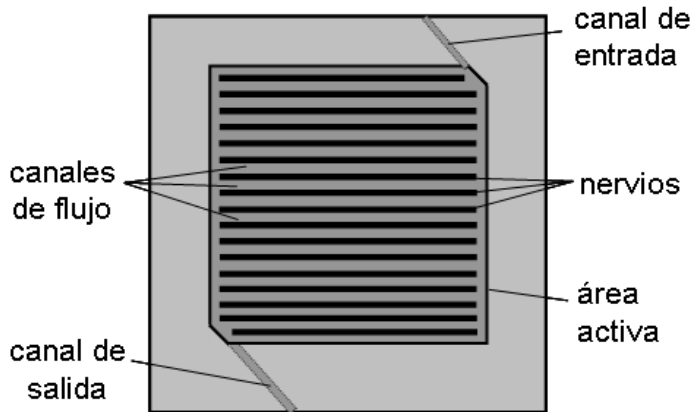


Figura 7 Esquema del área de flujo en una placa

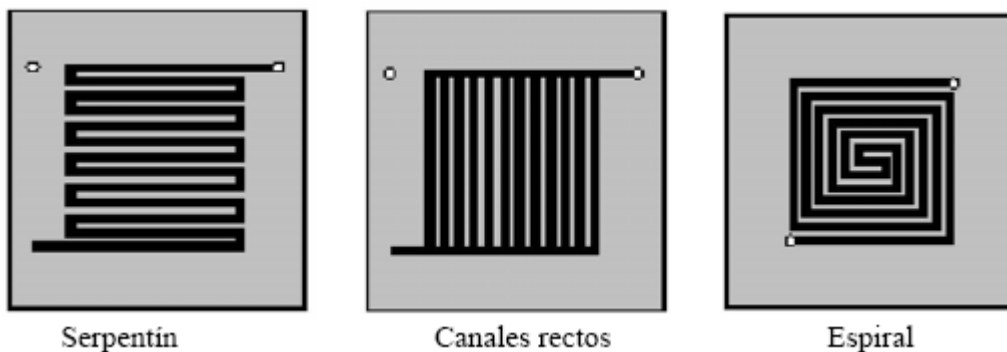


Figura 8. Esquemas de distribución de flujo de canales sin ramificar

Los esquemas de distribución de flujo más comunes que se utilizan pueden ser muy sencillos (sin ramificaciones) como los que se muestran en la Figura 8, o más complejos como los que se muestran en la Figura 9. Un canal muy simple que se emplea en las placas bipolares es el de tipo “serpentín”, en el cual existe una sola trayectoria del gas a través de toda la placa. Por ello, cualquier gota de agua que se acumule será rápidamente expulsada. Sin embargo, cuando placas con este tipo de geometría se disponen en un stack conectadas entre sí, existen múltiples trayectorias de los gases. Como rasgo distintivo de este esquema es que poseen una alta caída de presión entre la región de entrada y la de salida, lo cual redundará en una mala distribución del flujo de gases sobre los electrodos.



Figura 9.- Esquemas más complejos de distribución del flujo de gases

Los canales rectos o en serpentín-paralelo tienen la ventaja de provocar menores caídas de presión que los de serpentín simple. Un inconveniente obvio es que existen diferentes trayectorias para el flujo de gases, por lo que la eliminación del agua formada es más ineficiente al existir una distribución irregular del flujo en los diferentes canales. Cuando se utilizan canales paralelos rectos, el número de canales paralelos es generalmente grande, con áreas de flujo pequeñas y grande secciones transversales de los canales colectores y distribuidores. En los stacks pequeños, el aire se suministra al cátodo por convección libre o con la ayuda de un pequeño ventilador. Cuando se emplean estos métodos de suministro de aire, las placas bipolares de los cátodos suelen utilizar canales de tipo paralelo recto. Los canales se extienden hasta los extremos de la placa, quedando sus extremos abiertos al aire exterior.

La geometría en espiral de los canales es una alternativa interesante para las placas bipolares. En ella se combina la efectividad en la extracción del flujo de la geometría de serpentín sencillo con la ventaja de tener canales drenados y con gas catódico fresco en cada cara. Esto puede resultar potencialmente en una distribución más homogénea del oxígeno y el agua que la conseguida por la geometría de serpentín simple. Los canales discontinuos se han propuestos como una solución al problema de aumentar la difusión de gases a través de las capas difusoras. La discontinuidad de los canales fuerza a los gases hacia las capas difusoras, favoreciendo la extracción del agua. La optimización de las dimensiones de los canales para una geometría determinada es una tarea compleja en la que muchos factores tienen que ser balanceados, requiriendo un mayor esfuerzo en el caso de las placas bipolares empleadas en los cátodos.

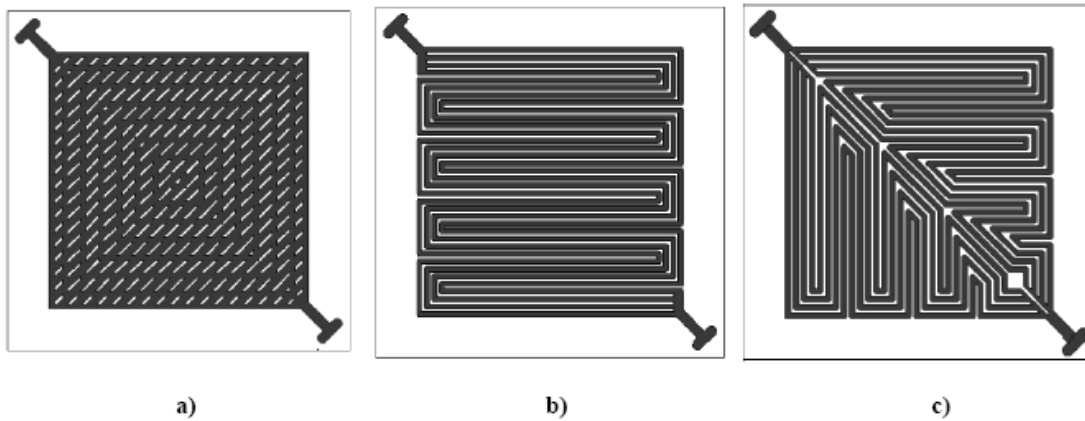


Figura 10 Variantes geométricas a) Cascada b) Serpentin c) Espina de pez

En la Fig. 10 aparecen algunas de las variantes que se estudian tanto en sistemas de simulación numérica, como en ensayos reales de laboratorio, en el LITEC, las que se valoran comparativamente y que más adelante se hacen referencias de sus resultados. La variante geométrica para la distribución de flujos, tipo cascada (a) está protegida por el registro de patente ES P200602547 (Barreras T. Félix) 2006 y la espina de pez (c) por el registro ES 201031092 (Lincheta M. Eduardo T.) 2010, ambos en España; la (geometría de serpentin (b) es la de uso comercial, en la actualidad y que se ha podido demostrar experimentalmente, que sus resultados son inferiores a las otras dos variantes.

Algunas recomendaciones que se han derivado de diferentes ensayos experimentales, efectuados en los laboratorios del LITEC de Zaragoza, España y de otras entidades, se indican a continuación:

- Disminuyendo el espesor de los nervios entre los canales se facilita el drenaje del agua y el paso de los gases hacia los electrodos. Se ha demostrado que el encharcamiento de los cátodos ocurre primero sobre los nervios, por lo que es de esperar que tengan una influencia importante en el encharcamiento del cátodo. Sin embargo, cuando se disminuye en exceso el área total de los nervios, la presión superficial ejercida por éstos sobre las capas difusoras aumenta, lo cual puede ser contraproducente para la difusión de los gases.
- Disminuyendo la sección transversal de los canales se aumenta la velocidad del flujo de gases, lo cual mejora la extracción del agua.
- La caída de presión en un canal favorece la eliminación de las gotas de agua depositadas. En este caso, en el caso de las placas bipolares que se empleen en los cátodos se recomienda una caída de presión entre 10-30 *mbar*. Una desventaja obvia del incremento de las pérdidas por presión es que la eficiencia del sistema disminuye debido al mayor consumo de potencia por el sistema de suministro de los gases.
- Aumentando el espesor de los canales se disminuyen las pérdidas de presión en los mismos, pero puede conllevar una distribución más irregular de los gases. De igual forma, las partes de la MEA en contacto con los canales puede que no tengan un soporte mecánico adecuado, aumentando el riesgo de rotura mecánica de la membrana.
- Aumentando la profundidad de los canales también ayuda a disminuir las pérdidas de presión, pero se aumenta el espesor de las placas bipolares, disminuyendo así la densidad de potencia del stack.

- Las pérdidas de presión en un colector deben ser al menos de un orden de magnitud menor que la pérdida de presión que tienen lugar en cada una de las monoceldas, con el objeto de distribuir homogéneamente los gases a cada una de ellas. La pérdida de presión de cada monocelda debe, obviamente, ser la misma, al igual que en cada uno de los canales individuales en las geometrías de flujo multicanales.
- La pérdida de presión también afecta a la densidad de corriente y la estequiometría a la cual se opera la pila.

Materiales empleados en las placas bipolares

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar materiales para ser usados en placas bipolares son las condiciones de explotación a la que estos componentes están sometidos.

Normalmente suelen trabajar en ambientes con un *pH* ácido (entre 2-3) y a temperaturas sobre los 80°C, por lo que están propensos a sufrir corrosión y disolución. Por ello, los requisitos que tienen que cumplir los materiales que se empleen en la fabricación de placas bipolares son: una buena conductividad eléctrica, que sean impermeables a los gases, una aceptable resistencia mecánica y estabilidad química tanto en las condiciones de oxidación como en la de reducción. Igualmente, deben ser baratos y adecuados para métodos de mecanizado de alto volumen. Los materiales que se emplean hasta ahora pueden clasificarse, en líneas generales como:

- **No-metálicos:** grafito no-poroso/electrografito
- **Metales:** sin- o con-revestimiento
- **Composites:** polímeros con base carbonosa o metálica

El grafito sólido es un material que satisface los requisitos técnicos tanto cuando se impregna o se reviste de una resina para bloquear su porosidad natural. Tradicionalmente éstos han sido los materiales que mayormente se emplean en la fabricación de las placas bipolares porque tiene una excelente estabilidad química y muy baja resistividad, resultando en la más alta potencia de salida electroquímica. Sin embargo, el grafito tiene un alto coste, una resistencia mecánica baja y necesita maquinarse para la formación de la geometría del flujo. Es por ello que un gran esfuerzo de los investigadores en PEMFC se dedica a la búsqueda de materiales más baratos y métodos de fabricación económicos.

Los metales, en forma de láminas, son también excelentes candidatos para placas bipolares por su buena estabilidad mecánica, su conductividad eléctrica es alta y pueden ser fácilmente mecanizados o estampados para albergar los canales de flujo. A pesar de esto, los iones metálicos disueltos debido a las condiciones de operación previamente discutidas pueden conllevar al envenenamiento de la membrana y a disminuir su conductividad iónica. Además, una capa de corrosión sobre la superficie de la placa incrementa la resistencia eléctrica y disminuye su potencia de entrega. A la luz de estos aspectos, dos tipos de placas metálicas están siendo investigados, con- y sin- capa protectora. Los metales investigados son el aluminio, el acero inoxidable, el titanio y el níquel.

El acero inoxidable es el único material que se puede considerar dentro de los “no-revestidos”, debido a su elevada resistencia, buena estabilidad química, baja permeabilidad de gases, amplio rango de selección en las aleaciones y buena posibilidad de producción masiva a muy bajo coste. Los mayores inconvenientes encontrados corresponden con la corrosión y la resistencia al contacto de la película superficial de

pasivación. Pese a ello, los estudios han demostrado que en ciertas aleaciones las tasas de corrosión son muy bajas y la entrega de potencia de las celdas es muy estable durante miles de horas. Entre esas aleaciones destacan la austenítica 349TM y la ferrítica AISI446 con alto contenido, lo cual ha sido comprobado por el National Renewable Energy Laboratory en Goleen (USA). Debe indicarse que, en el caso de la AISI446, aún debe mejorarse la resistencia de contacto.

Como ya se ha indicado antes, para evitar la corrosión se requiere que las placas bipolares metálicas sean revestidas con capas protectoras. Los revestimientos deben ser buenos conductores y adherirse fácilmente a la superficie del metal. Además, el coeficiente de expansión térmica entre el metal y el revestimiento debe ser muy similar para evitar la formación de microporos y microgrietas en las capas protectoras debido a la desigual expansión. Actualmente existen revestimientos de dos tipos: con base carbonosa (grafito, polímeros conductores, carbón tipo diamante y monopolímeros orgánicos auto-organizados) y con base metálica (metales noble y con nitruros y carburos).

Los compuestos poliméricos (composites) ofrecen otras alternativas entre los materiales a seleccionar para fabricar placas bipolares. Estos materiales son muy ligeros y pueden ser moldeados dentro de cualquier forma y tamaño, lo cual lo hace especialmente atractivo para los stacks. Sin embargo, como norma general, los materiales composites tienen más baja conductividad eléctrica que

el grafito sólido, lo que se traduce en altas pérdidas ohmicas, y también una baja resistencia mecánica.

Para solventar estos inconvenientes, suelen adicionarse metales o materiales carbonos, por lo que los composites se pueden dividir en de base metálica o de base carbonosa. El personal investigador de “Los Alamos National Laboratory” (USA) ha desarrollado un composite con base metálica para placas bipolares basado en un grafito poroso, policarbonato plástico y acero inoxidable. Así, a la excelente resistencia a la corrosión que le da el grafito poroso a la placa bipolar, el acero le reporta mejoras a la rigidez y una mayor resistencia mecánica. El policarbonato por su parte le proporciona una mejor resistencia química y lo hace impermeable a los gases, pudiendo ser moldeado en muchas formas, proporcionando los canales de flujo y los colectores para el suministro de los gases. Los compuestos poliméricos con base carbonosa, por otra parte, se fabrican empleando termoplásticos (polipropileno, polietileno o fluoruro polivinílico), o resinas compuestas térmicamente (fenólicas, epoxy, o ésteres vinílicos) con relleno y con/sin refuerzos fibrosos. Debe también indicarse que compuestos poliméricos de grafito están actualmente disponibles en el mercado y son vendidos por compañías como DuPont, H2Economy, ICM Plastics, NedStack, etc., lo que demuestra que este camino está madurando.

Desde el punto de vista de los costes de producción, se ha descrito en la literatura la posibilidad de tener compuestos poliméricos de un coste muy bajo (~ \$3/kg) y moldeado por inyección. Sin embargo, el objetivo es lograr placas bipolares con un coste final entre \$4-6/kg, aunque se cree que llegar hasta \$10/kg (para potencias de 1kW/kg) es apropiado siendo, además, económicamente competitivas.

Tareas de investigación y experimentación

En el Laboratorio de Investigación en Tecnologías de la Combustión, LITEC, de Zaragoza, España un grupo de especialistas ha estado trabajando en el diseño y desarrollo de pilas de combustibles, para su aplicación en equipos de transporte ligeros de diferentes tipos, cuestión que se realiza en colaboración con diferentes empresas de producción y otros centros de investigación. Desde el 2007, el autor de este trabajo ha participado desde la materialización del primer prototipo (Fig. 11) de experimentación, diseñado y fabricado en el LITEC con esos fines, así como con el aporte de diferentes variantes de diseño (Fig. 12, 13) tanto de las placas, como de los terminales; las que se encuentran en aplicación experimental con

resultados muy prometedores, tanto desde el punto de vista funcional, como por sus perspectivas en la disminución del peso, materiales, espacio geométrico de aplicación y costo.



Figura 11 Prototipo desarrollado por investigadores del LITEC-UMCC 2007

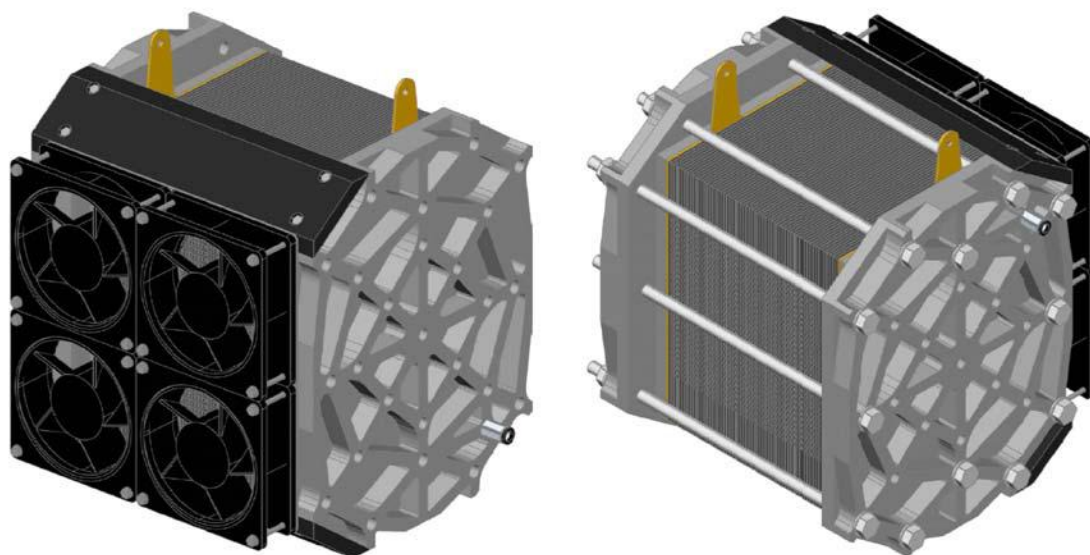


Figura 12 Pila de combustible con refrigeración por aire desarrollada en el LITEC con el trabajo conjunto de especialistas de España y Cuba



Figura 13 Banco de ensayos Dual para pilas tipo PEM diseñado y fabricado por especialistas del LITEC.

En el mercado existen gran variedad de diseños en placas para pilas de combustible, sin embargo, éste componente sigue estando sometido a una intensa investigación por parte de muchos grupos internacionales, tanto en el diseño de nuevas geometrías de flujo, como en la búsqueda de nuevos materiales. Las geometrías de flujo (o topologías) son importantes para garantizar la distribución homogénea de los gases reactantes sobre las capas catalíticas (electrodos), mientras que los materiales definen el método de fabricación a emplear y, en menor o mayor medida, el coste total de la pila. Los materiales deben tener una baja densidad, ser buenos conductores de la electricidad y el calor, y deben presentar una buena resistencia a la corrosión ácida.

Las placas bipolares son fundamentales para garantizar la eficiencia y competitividad de las pilas de tipo PEM como dispositivos comerciales, tal y como lo reflejan las diferentes patentes registradas con este fin, como son por ejemplo: US 143967P (Teledyne Energy System, Inc.) 1999, US 3 801 374 (2000), GB 1 135 076 (2001), US 4 117 065 (2002), US 4 360 485 (2002), DE 103 43 267 (Martin GMBH) 2003, US 6 764 786 B2 (Aaron W. Morrow) 2004, FR 2 810 795 A1(2004), ES 2 235 915 T3 (Braun, James, C.) 2005, ES P200602547 (Barreras T. Félix) 2006, ES 2 280 641 T3 (Muller, Alwin) 2007, US 7419739 (Lai; Yeh-Hung) 2008. En estos diferentes registros patentados se reflejan variantes en sus diseños geométrico y en la composición del material para la fabricación de placas de las pilas de combustible, sin embargo en ninguno de los casos registrados se refleja el desarrollo de dos áreas para el desplazamiento de los gases sobre una misma superficie de la placa y tampoco, la característica de canales múltiples con

simetría doble en la diagonal del área de trabajo, como la creada por el autor en colaboración con los especialistas del LITEC y que ha sido registrada como patente en Cuba y España [9, 10, 11].

La ventaja de la placa con dos áreas objeto de la referida invención es que cada unidad individual produce el doble de corriente del que aportan los diseños actuales utilizando MEAs de la misma superficie, por lo que se puede disminuir el espacio final que ocupa la pila, requieren de menos elementos de fijación, un menor gasto de material en su fabricación y por tanto, menores costes para una misma generación de potencia eléctrica. Unido a ello, en la presente invención se presenta una nueva geometría para la distribución de los gases reactantes y que para su identificación se le ha dado el nombre de “espina de pez” (o herringbone en inglés), por su similitud de forma con el espinazo de un pez. En esta geometría, el conducto de entrada se divide en varios canales situados simétricamente a ambos lados de la diagonal, para converger finalmente en un único canal de salida. La misma presenta ventajas cuando se compara con otras empleadas en pilas de combustible comerciales como la de serpiente-paralelo, entre otras.

El dispositivo objeto de la invención (Figura 14) es una placa con dos áreas (1) y con sendas geometrías de flujo de tipo “espina de pez” para ser empleadas en pilas de combustible.

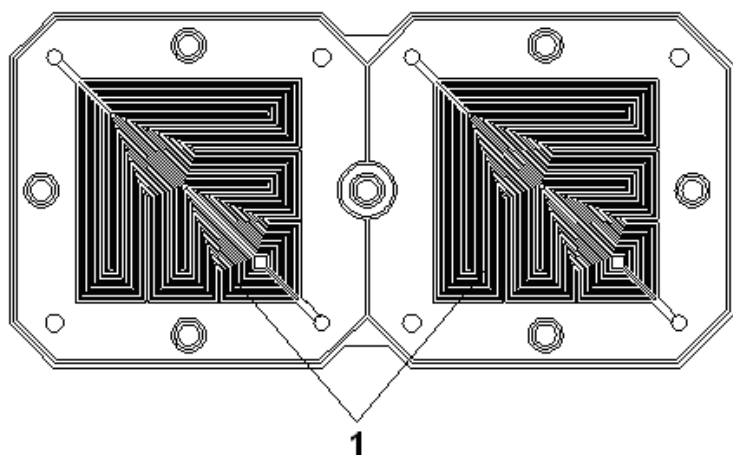


Figura 14 Placa para pila de combustible con dos áreas de reacción química y geometría de flujo de espina de pez, con protección de patente en Cuba y España.

La placa consta de un sistema de distribución del flujo de combustible o de oxidante con dos canales de entrada y dos de salida de forma simétrica formando dos áreas activas de reacción química. En cada área, el canal de entrada de gas se ramifica en múltiples canales simétricamente en dos zonas a ambos lados de la diagonal de la misma superficie, formando una disposición de tipo “espina de pez” convergiendo todos los canales de las dos áreas en un único conducto de salida. El ancho de los canales, su número y el espesor de los nervios dependerá del área activa de electrodo a cubrir, la cual define la de la geometría de flujo de la placa. Este tipo de placa y su geometría de flujo se pueden emplear tanto en placas bipolares como en monopolares refrigeradas Fig 15.

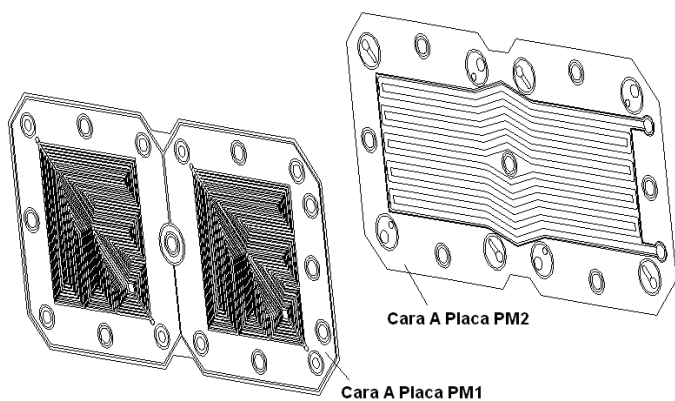


Figura 15 Placa Monopolar con áreas de distribución de flujos reactantes, por una cara y canales de refrigeración, por la otra, que al unirse componen una placa bipolar.

En este último caso, una placa bipolar está formada por dos placas monopolares que se unen por las caras de refrigeración. En placas con geometría cuadrada o rectangular los conductos de entrada y salida se dispondrán en los dos extremos de una diagonal. El sentido de circulación del fluido así como el ángulo definido por los nervios con la horizontal podrá ser cualquiera y se fijará de acuerdo con las aplicaciones específicas. De acuerdo a los criterios de diseño y construcción, el dispositivo se puede fabricar por mecanizado, moldeado o estampado, empleando placas de metal, compuestos poliméricos (composites), grafito o cualquier otro de los materiales que típicamente se utilizan en la fabricación de placas bipolares.

Con la geometría de tipo “espina de pez” (o herringbone en inglés) Fig. 16, se logran unos campos homogéneos y una caída de presión tal que facilita a la vez la distribución uniforme de los gases y el arrastre del agua formada en los cátodos. La geometría consiste en un canal de entrada (4) de gas a la placa el cual se ramifica en múltiples canales (3) localizados simétricamente en dos áreas a ambos lados de la diagonal de la misma superficie, confluyendo todos los canales de las dos áreas en un único conducto de salida (5) generando una estructura de tipo “espina de pez”. El ancho de los canales (3), su número y el espesor de los nervios (2) dependerá del área activa de electrodo a cubrir, la cual define la de la geometría de flujo de la placa. Toda esta geometría se engloba dentro de un área definida por un cuadrilátero con diagonales iguales o de diferentes dimensiones, o por una superficie de perímetro curvo.

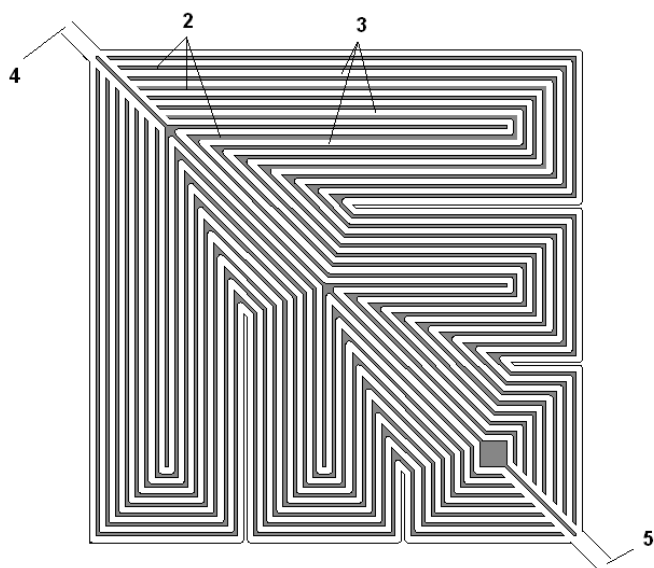


Figura 16 Geometría de flujo tipo Espina de Pez para placas de PEMFC

Resultados del estudio comparativo por simulación numérica realizado en tres variantes de geometrías de flujo: Serpentin paralelo (3 y 4 vías), Espina de Pez y Cascada; en las variables de presión y velocidad de flujo

La placa bipolar que se describe en este ejemplo tiene unas dimensiones externas de 90 x 90 mm y con un área activa de 49 cm². Se desarrolló un estudio de simulación numérica en el cual la misma área activa fue ocupada por tres tipos de geometrías de flujo (Figura 10), una de cascada (10a), formada por 33 canales de 2 mm de ancho y 1 mm de profundidad, una de serpentin paralelo (10b), formado por 4 canales también de 2 mm de ancho por 1 de profundidad y una de tipo “espina de pez” (10c), también formado por 4 canales de 2 mm de ancho por 1 mm de profundidad.

Las características del flujo cuando un fluido circula por estas placas se estudiaron mediante simulaciones numéricas. Durante el estudio computacional se consideró un flujo isotérmico, incompresible y laminar, obteniéndose una solución final de estado estacionario, condiciones éstas que coinciden con las condiciones experimentales reales de trabajo de los gases reactivos de las pilas de tipo PEM. Las ecuaciones empleadas para simular el proceso son las de Navier-Stokes para la conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Dada la geometría simple del problema, la solución de las mismas se obtuvo discretizándolas con el empleo del método de volúmenes finitos. Para mejorar el acoplamiento velocidad-presión en estas ecuaciones, se empleó una malla cartesiana decalada, la cual se implementó numéricamente utilizando el algoritmo SIMPLE. Finalmente, para realizar la solución iterativa del sistema de ecuaciones lineales resultante se aplicó una técnica de gradiente conjugado. Pese a que el flujo real es estacionario, el esquema numérico requiere una condición inicial para comenzar la simulación. Por ello, se impuso una velocidad constante muy pequeña (en módulo) e igual para todos los canales como condición inicial del proceso. Este valor numérico se ha seleccionado de forma que la condición de conservación de la masa fuese satisfecha.

Los resultados obtenidos (Fig. 17 y 18) demuestran que la placa con geometría de tipo “espina de pez” presenta unos campos de presión y velocidad que alcanza valores intermedios comparados con la de cascada y la de serpentin-paralelo. Así, el valor del gradiente máximo de presiones en la placa de cascada fue de 39,1 Pa, para la de “espina de pez” de 72,1 Pa y para la de serpentin-paralelo de 267 Pa. Para el

caso del campo de velocidad, los valores medios de este parámetro fueron de 1,4 m/s para la de cascada, 1,9 m/s para la de “espina de pez” y 2,75 m/s para la de serpentín-paralelo.

Estos resultados demuestran que la placa con geometría de flujo de tipo “espina de pez” (o herringbone en inglés) agrupa las ventajas de las otras dos placas. Es decir, por una parte garantiza un campo de velocidades homogéneo como la de serpentín-paralelo, pero provocando una caída de presión mucho menor al paso del flujo, con valores que están en el mismo rango que la de cascada. Estos valores garantizan una distribución homogénea del flujo de gases reactantes sobre las capas catalíticas, así como un arrastre eficiente del agua que se genera por reacción química en los cátodos de este tipo de pilas.

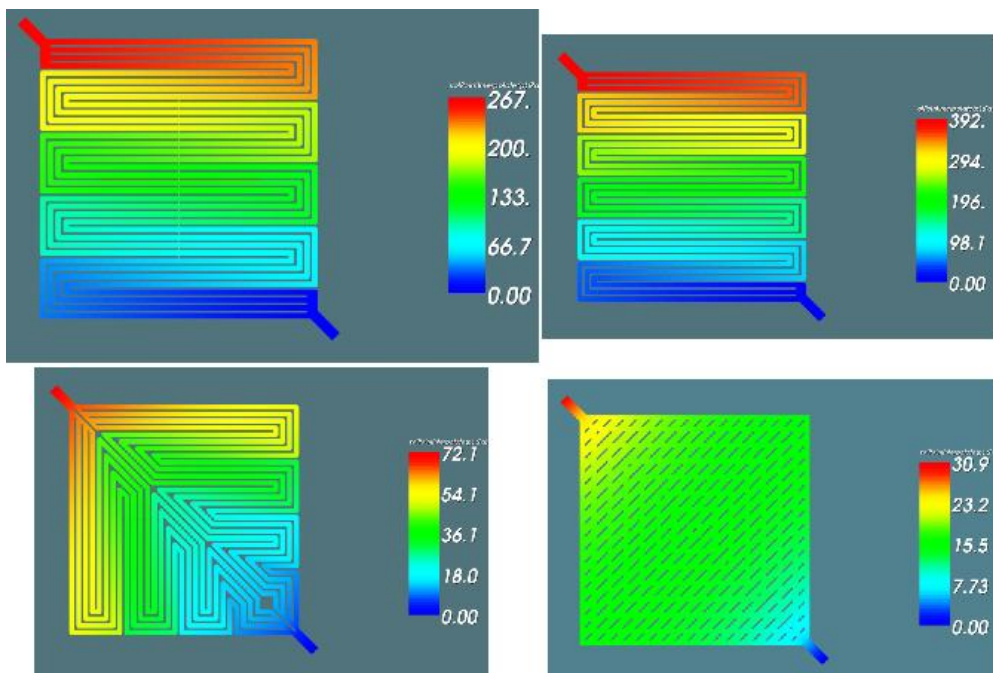


Figura 17 Imágenes de la simulación numérica de Presiones

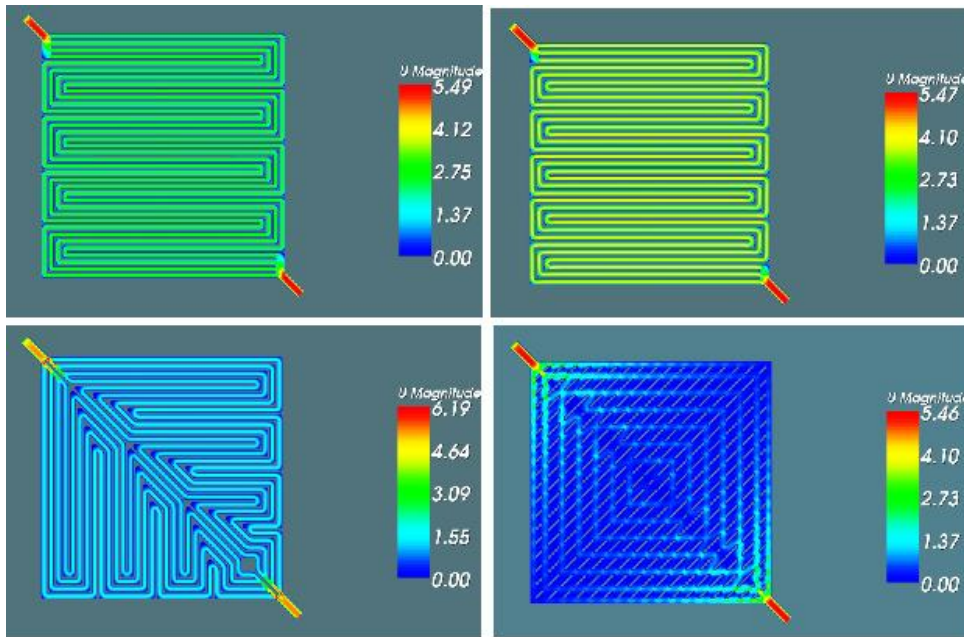


Figura 18 Imágenes de la simulación numérica de Velocidad

Componentes del sistema para el funcionamiento de una PEMFC.

Existen internacionalmente diferentes desarrollos y estructuras que en su conjunto permiten el funcionamiento de las pilas de combustible, con diferentes fuentes de suministro de los gases reactantes y del sistema refrigerante, en los tamaños que lo requieren. En algunos casos se aprovecha el aire, mediante diferentes dispositivos, acoplados al sistema, como la fuente del oxígeno y también, en otros casos se aplican balones de oxígeno para aplicación directa. De igual forma, las fuentes de suministro del hidrógeno pueden ser por diferentes vías, aunque una de las que se reflejan como las más convenientes por seguridad, espacio y transportación, son los balones de hidruros metálicos. Por otra parte, el sistema se compone por diferentes dispositivos reguladores de la presión de los gases reactantes, convertidores electrónicos para control de la corriente y otros; cuestiones importantes que se deben seguir profundizando por todos los interesados en el desarrollo y aplicación de las pilas de combustible, como una fuente de gran importancia en las energías renovables y sin afectación al medio ambiente.

Para una idea general del espacio que pudiera ocupar una pila de combustible tipo PEM, con sus fuentes de suministro y de operación, cuyas placas tengan un área de reacción química de 100 X 100 mm, se puede apreciar un esquema representativo en la Fig. 17.

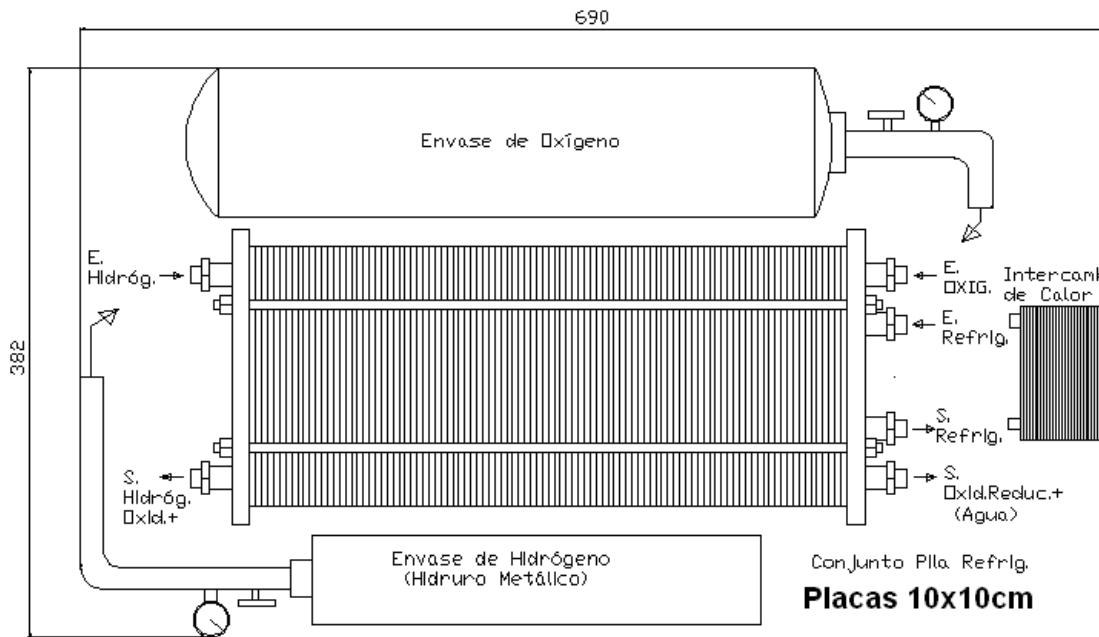


Figura 17 Esquema simple de componentes en una PEMFC con refrigerante.

EJEMPLO DE CÁLCULO EN PILA COMBUSTIBLE

- Pilas con membrana de intercambio de protones (PEMFC)

Ejemplo 1: Flujo de combustible necesario para producir una corriente de 1 A con una pila

- Cada molécula de H_2 reacciona liberando 2 e-, $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$, en el ánodo
- Debe conocerse que 1 eq. e- = 1 g mol e- = 6.022×10^{23} e- (N° Avogadro) y que esta cantidad de electrones tiene la carga 96 487 C (constante de Faraday). Así, la carga de 1 e- = 1.602×10^{-19} C
- 1 A = 1 C/s

Por lo tanto, los moles de H_2 que se tienen que liberar para producir 1 A son:

$$n_{H_2} = 1 A \left[\frac{1 C/s}{1 A} \right] \left[\frac{1 eq. e^-}{96487 C} \right] \left[\frac{1 g mol H_2}{2 eq. e^-} \right] \left[\frac{3600 s}{1 h} \right] = 0.018655 \frac{g mol H_2}{h}$$

$$m_{H_2} = 0.018655 \frac{g mol H_2}{h} \left[\frac{2.0158 g}{1 g mol} \right] = 0.0376 \frac{g H_2}{h} = 0.0376 \frac{kg H_2}{h - kA}$$

Ejemplo 2: Dimensionar un stack de 5 kW y cálculos de los flujos de aire y combustible

Un stack de pilas de 5 kW se opera con un voltaje por celda de 700 mV empleando H_2 puro con una utilización del combustible UF= 80%.

- calcule el número de monoceldas (y área de intercambio) del stack
- ¿cuánto H₂ es necesario para obtener esa potencia?
- ¿Qué flujo de flujo de aire se necesita para una utilización (UO) del 25%?

Consideremos para resolver el problema, que las monoceldas que componen el stack están conectadas en serie

- La corriente que circula por cada monocelda es la misma
- El voltaje del stack es la suma de los voltajes de cada monocelda
- Se conoce que el voltaje óptimo a manejar en los stacks está alrededor de los 36 V, entonces:

$$N_{\text{monoceldas}}^{\circ} = \frac{36 \text{ V}}{0.7 \text{ V}} \cong 50$$

Para obtener una potencia de 5 kW con 50 monoceldas, tiene que circular por la pila una corriente

$$P = I \cdot V \Rightarrow I = \frac{5000 \text{ W}}{36 \text{ V}} = 139 \text{ A}$$

Como ya se ha visto, la densidad de corriente a obtener de una monocelda para trabajar en la zona de pérdidas Óhmicas está en el alrededor de los 300 mA/cm², por tanto

$$j = \frac{I}{A} \Rightarrow A = \frac{139 \text{ A}}{0.3 \text{ A/cm}^2} = 463 \text{ cm}^2$$

es decir, la superficie activa en cada monocelda será de 21x21 cm

b)- En una monocelda, la masa de H₂ a consumir en una monocelda es:

$$m_{H_2, \text{consum}} = 139 \text{ A} \left(0.0376 \frac{\text{g H}_2}{\text{h} \cdot \text{A}} \right) = 5.226 \frac{\text{g H}_2}{\text{h}}$$

Por lo que la masa total de H₂ es:

$$m_{H_2, \text{consum}} = 5.226 \frac{\text{g H}_2}{\text{h}} \times 50 = 261.3 \frac{\text{g H}_2}{\text{h}}$$

Para garantizar que esa masa total de H₂ se consuma en la reacción electroquímica, es necesario suministrar una masa adicional que viene determinada por el coeficiente estequiométrico (λ) o de utilización

$$U_F = \lambda = \frac{H_{2,consum}}{H_{2,IN}} \Rightarrow m_{H_2,IN} = \frac{m_{H_2,consum}}{\lambda} = \frac{261.3}{0.8} = 326.7 \frac{g H_2}{h}$$

Lo que reporta un flujo volumétrico TOTAL de H₂ (condiciones normales),

$$Q_{H_2,IN} = \frac{m_{H_2,IN}}{\rho_{H_2}} = \frac{0.3267}{0.0674} \approx 5 \frac{Nm^3}{h}$$

- c) Para calcular la cantidad de O₂ necesario, es necesario considerar que estequiométricamente se necesitan 2 átomos de H₂ por cada átomo de O₂ para producir H₂O, por ello,

$$n_{O_2,consum} = 326.7 \frac{g H_2}{h} \left(\frac{1 g mol H_2}{2.0158 g H_2} \right) \left(\frac{1 g mol O_2}{2 g mol H_2} \right) = 81 \frac{g mol O_2}{h}$$

como el coeficiente de estequiométrico del oxígeno es 4 (25% de utilización), el número de moles de O₂ a suministrar al stack es,

$$n_{O_2,IN} = 81 \frac{g mol O_2}{h} \times 4 = 324 \frac{g mol O_2}{h}$$

como el aire tiene 21% de O₂,

$$m_{aire,IN} = 324 \frac{g mol O_2}{h} \left(\frac{1 g mol aire}{0.21 g mol O_2} \right) \left(\frac{28.85 g aire}{1 g mol aire} \right) = 44 \frac{kg aire}{h}$$

resultando,

$$Q_{aire,IN} = 36.7 \frac{Nm^3}{h}$$

En RESUMEN:

Las características de un stack de monoceldas que entreguen 5 kW de potencia con las condiciones dadas (700 mV/celdas y conectadas en serie) serán:

- 50 monoceldas con un área activa de 463 cm² (21x21 cm)

- Se consumirán 5 m³/h de H₂ y 36.7 m³/h de aire

CONCLUSIONES

- Se logró demostrar que la geometría de flujo de Espina de pez aporta mayor eficiencia que las variantes de serpentin y cascada en el campo de presiones y velocidades de los gases reactantes.
- La variante de placa con dos áreas de reacción en la misma superficie, disminuye el costo y espacio de ubicación de las PEMFC, en comparación con las de igual potencia, pero en stack independientes.
- Las posibilidades para el desarrollo de las pilas de combustible como fuente de energía limpia y renovable, están creadas internacionalmente y avanzan con celeridad hacia una aplicación inmediata.
- Es determinante para los diferentes países y en especial para los menos desarrollados, el estudio profundo de las condiciones necesarias y los recursos existentes en cada lugar, para la elaboración de proyectos encaminados a la implantación de las pilas de combustible, como fuente energética.
- La dedicación y creación conjunta de los profesionales de las diferentes ramas, que se han podido vincular con las nuevas tecnologías, ha demostrado que se posee un alto potencial y suficiente voluntad para el diseño de variantes cada vez más eficientes y por tanto, los trabajos conjuntos de los especialistas de países más y menos desarrollados, es un motor impulsor para lo que se pretenda alcanzar en el futuro.

Bibliografía

1. M. Farooque, H.C. Maru, "Fuel Cells: The clean and efficient power generators", Proceedings of the IEEE, Vol.89, Issue 12, pp.1819-1829, 2001.
2. W.L. Hughes, "Comments on the hydrogen fuel cell as a competitive energy source", Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting IEEE, Vol.1, pp.726-730, 2001.
3. K. Rajashekara, "Hybrid Fuel Cell Strategies for Clean Power Generation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41, No.3, 2005.
4. I. Pilatowsky, R.J. Romero, C.A. Isaza, S.A. Gamboa, W. Rivera, P.J. Sebastian, J. Moreira, "Simulation of an Air Conditioning Absorption Refrigeration System in a Cogeneration Process Combining a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", International Journal of Hydrogen Energy, 2007.
5. T.W. Song, J.L. Sohn, J.H. Kim, S.T. Ro, K. Suzuki, "Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell/microgas turbine hybrid power system based on a quasi-two dimensional model", Journal of Power Sources, 2004.
6. I. Zamora, J.I. San Martín, A.J. Mazón, J.J. San Martín, V. Aperribay, "Emergent Technologies in Electrical Microgeneration". International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol.3, Issue 2, Article 1092, pp.1-28, October 2005.

7. Martos Amanzana, Manuel. Las pilas de combustible, un posible futuro energético. Revista Técnica Industrial 257-Eficiencia Energética México 2006
8. Fuel Cell Handbook (Seventh Edition) By EG&G Technical Service, Inc. National Energy Technology Laboratory. Morgantown, West Virginia 26507-0880. 2004.
9. Lincheta Mesa, E.T. Placa con dos áreas y geometría de flujo de espina de pez para pilas de combustible. Registro de patente de invención No 2010-0114. OCPI. Junio- 01-2010 Cuba.
10. Lincheta Mesa, E.T., Barreras Toledo, F.; Lozano Fantoba, A.; Valiño García, L.;Mustata Oroviceanu, R. Placa de pila de combustible con geometría de flujo de espina de pez. Registro de patente en España P201031092. LITEC-CSIC. Julio-16-2010.
11. Lincheta Mesa, E.T., Barreras Toledo, F.; Lozano Fantoba, A.; Valiño García, L.;Mustata Oroviceanu, R. Placa de pila de combustible con varias áreas de reacción química. Registro de patente en España P201031093. LITEC-CSIC. Julio-16-2010.
12. Martos Amanzana, M. Las Pilas de Combustible un posible futuro energético. Técnica Industrial 259. Eficiencia Energética. Nov.2005. México.
13. Azcarate, E. Ezponda, I. Agote. Hidrógeno y Pilas de Combustible: Estado actual y perspectiva inmediata. Universidad Pontificia de Comillas. INASMET. Mayo 2007. Madrid, España.
14. Martínez Sánchez, J.J. Análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño de las placas bipolares de una pila de combustible tipo PEM. CONAPICE. España 2008.
15. Documentación Científica de la Red de Pilas de Combustible del CSIC, España, 2007 – 2009.
16. Pilas de combustible de membrana de intercambio protónico. ENERXE. Plataforma Tecnológica Gallega de Energía. www.enerxe.org. 2009. España.
17. Gil, M.; Barreras, F.; Lozano, A.; Valiño, L.; Mustata, R. Efecto de la geometría del flujo de distribución de los gases reactantes en el manejo del agua en pilas tipo PEM. III Congreso Nacional de Pilas de Combustible CONAPPICE. Sept. 2008 Zaragoza, España.
18. Mustata, R.; Valiño, L.; Barreras, F.; Lozano, A.; Gil, M. Estudio de la distribución del aire en una pila PEM de 400 W. III Congreso Nacional de Pilas de Combustible. CONAPPICE. Sept. 2008. Zaragoza, España