

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GO-KART HÍBRIDO PILA DE COMBUSTIBLE PEM / BATERÍA RECARGABLE

Karina SUÁREZ-ALCÁNTARA, Andrés RODRÍGUEZ-CASTELLANOS y Omar SOLORZA-FERIA

Departamento de Química, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Apartado Postal 14-740, 07360 México D.F., México. Correo electrónico: k.suarez.alcantara@gmail.com

(Recibido diciembre 2007, aceptado junio 2008)

Palabras clave: pila de combustible PEM (membrana de conducción protónica), hidrógeno, energía limpia

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y la construcción de un go-kart híbrido pila de combustible con membrana de conducción protónica tipo PEM (Proton Exchange Membrane, por sus siglas en inglés) y pila recargable. El diseño de los colectores de corriente de la pila se realizó utilizando el programa AutoCAD y la construcción mediante una fresadora con control numérico, CNC. Los ensambles membrana-electrocatalizador de la pila están formados por membranas Gore-Select y por electrodos de Pt soportado en tela de carbón al 20 %peso/C con carga de 0.5 mg /cm², en ánodo y cátodo. Los platos colectores de corriente fueron manufacturados en grafito de alta densidad con espesor de 5 mm. La caracterización de la pila de combustible se realizó mediante ensayos de polarización potencióstática. El peso total del go-kart y una persona a bordo es de 120 kg. La potencia del go-kart es generada por un motor de corriente directa de 20 V y 5 A (100 Watts). Para tal efecto, se construyeron tres pilas de combustible de 30 W cada una, con un respaldo de baterías recargables comerciales de Pb/ácido para energizar equipos periféricos.

Key words: proton exchange membrane (PEM) fuel cell, hydrogen, clean energy

ABSTRACT

An hybrid Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC-Rechargeable Battery Go-kart has been designed and manufactured using AutoCAD software for the design and a CNC mechanical machine for the manufacture of components of the fuel cell. The membrane-electrode assemblies, MEAs, were integrated with a Gore-Select membrane and carbon cloth with Pt (20 wt % /C) 0.5 mg/cm² anode and cathode electrode catalysts loading. High density graphite collector plates with 5mm thickness were used as collector plates. The estimated weigh of the go-kart with a driver is about 120 kg. The demand of the motor of the go-kart is 20 V and 5 A (100W), supplied by an hybrid system integrated by three 30Watts PEMFC. The commercially available Pb/acid rechargeable battery supplies energy for peripheral equipment.

INTRODUCCIÓN

La combustión de combustibles fósiles en el sector del auto transporte es la responsable de más de la mitad de las emisiones de gases invernadero, consume dos tercios de los recursos petroleros mundiales (Ogden *et al.* 2002) y también contribuye con la emisión de otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno y de azufre. Actualmente existen en circulación a nivel mundial alrededor de 750 millones de automóviles y para el año 2050 se espera que esta cifra se triplique, debido principalmente a las demandas energéticas de China e India (Ogden *et al.* 2006). Datos recientes publicados por la Agencia Internacional de Energía, indican que México emite alrededor de 400 millones de toneladas de CO₂ anuales. A la fecha se ha propuesto una variedad de combustibles alternativos que podrían ayudar a afrontar los retos de suministro de energía, sin dañar el ambiente. Entre estos combustibles se incluyen gasolinas y diesel reformulados, biodiesel, metanol, etanol, gasolinas sintéticas producidas a partir de gas natural o carbón, gas natural comprimido y por supuesto hidrógeno.

De los combustibles mencionados anteriormente, el hidrógeno como portador energético presenta los mejores beneficios ambientales, puesto que su uso en las pilas de combustible no genera emisiones contaminantes. El producto de las reacciones electroquímicas que ocurren en una pila de combustible que opera con hidrógeno y oxígeno es agua, calor y energía eléctrica (Solorza-Feria 2007). Así como la electricidad, el hidrógeno es una forma versátil de transportar energía y este puede ser producido a partir de una variedad de recursos primarios disponibles. Si el hidrógeno es producido a partir de fuentes renovables de energía y su sistema de distribución es eficiente, las emisiones contaminantes en todo el ciclo productivo serán casi nulas. En un futuro cercano, los sistemas de energía estarán basados en la generación de electricidad a base de hidrógeno, la llamada economía del hidrógeno, donde se contempla una solución energética a largo plazo reduciendo al mínimo los problemas ambientales (Ogden *et al.* 2002).

En corto y mediano plazos se pueden reducir las emisiones contaminantes mejorando la eficiencia de los motores, disminuyendo el uso de los automóviles y usando combustibles reformulados. Sin embargo, las reducciones en las emisiones de contaminantes serán sobrepasadas fácilmente por el aumento en el número de automóviles en circulación o bien por el deseo personal de poseer un auto con

mayor potencia. A largo plazo se debe considerar el desarrollo de vehículos híbridos, que sean eficientes en el uso de la energía a través de diferentes tipos de tecnologías. Un primer paso es el desarrollo de híbridos gasolina-eléctrico (pila recargable) y posteriormente híbridos pila de combustible-pila recargable. Se pronostica que este tipo de tecnologías tendrá un gran impacto al menos dentro de 55 años, con más de un tercio de la producción de vehículos nuevos (Heywood *et al.* 2006). Para llegar a esta etapa tecnológica es necesario resolver algunos problemas como son el transporte del hidrógeno dentro de una red de distribución y su almacenamiento eficiente, tanto a bordo del automóvil como en las estaciones de servicio. En esencia ya es posible implementar la tecnología pilas de combustible con membrana de conducción protónica (PEMFC, por sus siglas en inglés) y baterías (o supercapacitores) siendo esta una combinación sinérgica poderosa; la combinación de estas dos tecnologías provee un mejor desempeño, durabilidad y menor costo de lo que cada una ofrece por separado.

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte eficientemente la energía química de un combustible directamente a energía eléctrica, siendo el hidrógeno el combustible con el que se obtiene el mayor desempeño. En la **figura 1** se muestra de forma esquemática el principio de operación de una pila de combustible H₂/O₂. En el ánodo tiene lugar la oxidación electroquímica del hidrógeno a protones y electrones. Los protones migran a través de la membrana de conducción protónica; mientras tanto, los electrones fluyen por un circuito externo a la pila de combustible. Elec-

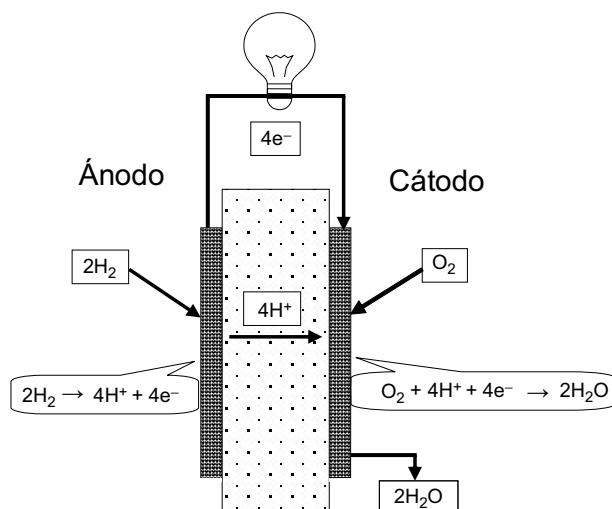


Fig. 1. Principio de operación de una pila de combustible H₂/O₂

trones y protones convergen en el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno para formar agua y liberar energía en forma de calor. El **cuadro I** muestra las reacciones anódica, catódica y global. Al conjunto de electrodo anódico, membrana de conducción protónica y electrodo catódico, se le conoce como ensamble membrana-electrocatalizador (EME). Una pila unitaria de combustible básica (monopila) consiste de un EME, localizado entre un par de difusores de gases. El difusor de gases le confiere al EME una resistencia mecánica adicional y como su nombre lo indica es el medio de difusión de los gases reactantes hacia los electrodos. A su vez el EME y los difusores de gases se localizan entre los colectores bipolares por donde fluyen los gases (**Fig. 2**) (Gottesfeld *et al.* 1997). Los platos colectores de corriente o bipolares proporcionan el cuerpo de la pila de combustible.

CUADRO I. SEMIRREACCIONES EN UNA PILA DE COMBUSTIBLE CON MEMBRANA DE CONDUCCIÓN PROTÓNICA

Reacción anódica	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	(1)
Reacción catódica	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	(2)
Reacción global:	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{calor} + \text{energía eléctrica}$	(3)

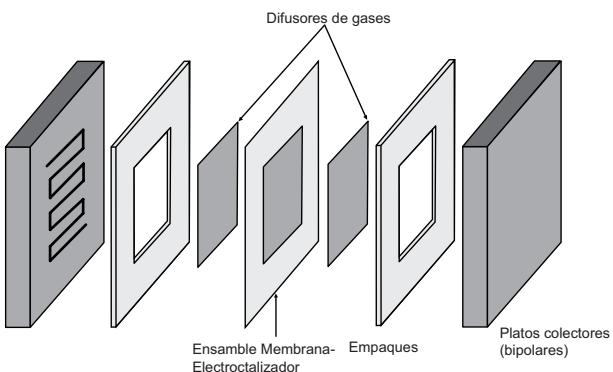


Fig. 2. Componentes básicos de una pila de combustible con membrana de conducción protónica

Un arreglo de pilas o “stack” es un conjunto de monopilas conectadas entre sí. El arreglo permite cubrir las necesidades de corriente, potencial y potencia, requeridos para la operación de un sistema de energía. En los arreglos, los platos bipolares son el contacto eléctrico entre el ánodo de un EME y el cátodo del siguiente EME. En la **figura 3** (Cifrain *et al.* 2003) se

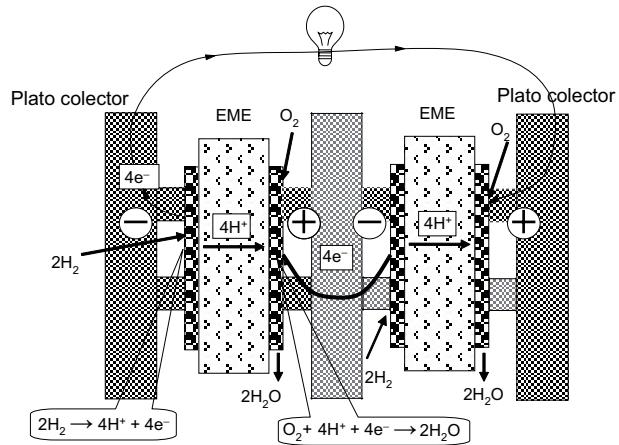


Fig. 3. Principio de operación de un arreglo o “stack” de pilas de combustible

muestra de forma esquemática el principio de operación de un arreglo. Sobre el primer ánodo se produce la oxidación electroquímica del hidrógeno molecular a protones y electrones. Los protones fluyen a través de la membrana de conducción protónica hacia el primer cátodo. Mientras tanto los electrones fluyen por un circuito externo a la pila del combustible hacia el último cátodo del arreglo. Los protones generados en el último ánodo y transportados a través de la membrana de conducción protónica, conjuntamente con los electrones del primer ánodo y el oxígeno molecular reaccionan electroquímicamente para formar agua en el último cátodo. Los electrones liberados en el último ánodo fluyen a través del plato bipolar hacia el penúltimo cátodo, donde reaccionan con los protones del penúltimo ánodo y el oxígeno para producir también agua y liberar calor. Este proceso es repetido hasta que los electrones liberados en el segundo ánodo llegan al primer cátodo cerrando el ciclo en todo el arreglo.

La **figura 4** muestra en forma esquemática como las pilas de combustible y baterías recargables trabajan juntas en un auto híbrido. Las flechas punteadas indican un flujo de materia ya sea gases de reacción o bien de agua como producto de la reacción. Las flechas sólidas indican el flujo de corriente eléctrica desde las baterías recargables o de la pila de combustible, al sistema de control electrónico y hacia el motor eléctrico. En el diseño de este tipo de sistemas híbridos, las baterías recargables tienen dos funciones: 1) soporte eléctrico para el arranque y aceleración del motor y 2) alimentación eléctrica de los sistemas periféricos. La pila de combustible entra en servicio cuando se está en un régimen de velocidad constante. En sistemas más avanzados se puede adaptar un generador de corriente para

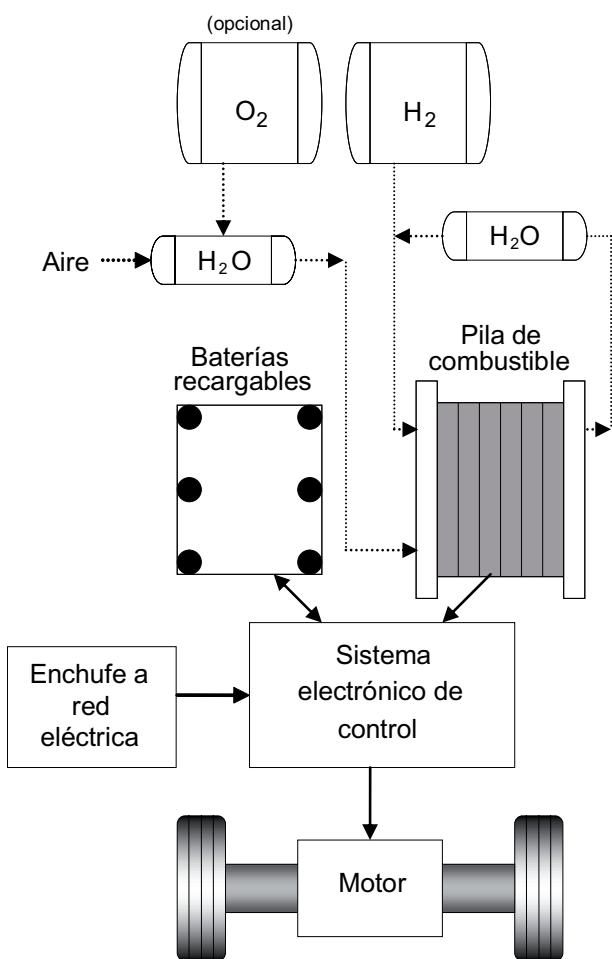


Fig. 4. Ilustración del sistema de potencia de un go-kart híbrido pila de combustible-batería recargable

alimentar las baterías recargables cuando se frena el vehículo. Las pilas de combustible desarrolladas en el presente trabajo pueden operar con oxígeno del aire, por lo que el tanque de almacenamiento de oxígeno es opcional. Para un mejor desempeño de las pilas de combustible se cuenta para este trabajo con un sistema de acondicionamiento de la temperatura y la humedad de los gases reactantes. El sistema mostrado en la figura 4 fue usado para el diseño y construcción de un go-kart híbrido pila de combustible-baterías recargables. Este diseño es fácilmente expandible a sistemas más grandes con el fin de lograr la potencia deseada (Suppes *et al.* 2005).

METODOLOGÍA

Diseño mecánico del go-kart

El diseño mecánico y la construcción del chasis se llevó a cabo según los planos de construcción que

se pueden encontrar reportados en www.kartbuilding.net (Fig. 5a y b). Sin embargo, es importante notar que se realizaron algunas adecuaciones al diseño original con el fin de adaptarlo a la operación en una conjunción pilas de combustible y baterías recargables. También es importante señalar que por lo menos el 30 % de las piezas utilizadas en la construcción del go-kart fueron de reuso y ajustadas según nuestro propio diseño.



Fig. 5. Diseño mecánico del go-kart, (a) diseño de chasis, (b) go-kart construido

Control electrónico del go-kart

Se diseñó un control electrónico semiautomático, como se muestra en la figura 4. Este control permite la utilización de la carga almacenada en las baterías recargables como respaldo de la pila de combustible cuando se registran picos de corriente; es decir durante el arranque y la aceleración en superficies demandantes (subidas). El mismo control electrónico no permite el flujo de corriente de las baterías a la pila de combustible, esto es con el fin de proteger de daños por sobrecarga a la pila de combustible. El sistema de baterías de respaldo utilizado en este trabajo consiste de tres baterías comerciales, recargables selladas de plomo/ácido de 6 V y 12 Ah conectadas en serie. Las baterías de plomo ácido presentan la desventaja de ser de alto peso, sin embargo fueron utilizadas debido a su disponibilidad comercial. Para futuras aplicaciones se deberán integrar baterías recargables de última generación (baterías recargables de litio) o supercapacitores. Fundamentalmente se requiere que este sistema de respaldo/ alimentación posea elevada densidad energética, alta eficiencia y ciclos de carga rápidos.

Diseño e instalación de las pilas de combustible

Para cubrir las necesidades energéticas del motor empleado se construyeron tres arreglos de pilas de combustible con 11 ensambles membrana-



Fig. 6. Diseño de los campos de flujo de los platos bipolares del arreglo

electrocatalizador conectados en serie. La **figura 6** muestra el diseño de los campos de flujo en los platos bipolares. Los campos de flujo del ánodo y del cátodo son iguales. Se trata de un diseño en forma de serpentín triple que corre a lo largo del plato bipolar. El área del serpentín es de 35 cm^2 ($8.4 \text{ cm} \times 4.2 \text{ cm}$). El ancho y la profundidad de los canales de flujo es de 1.5 mm, con una separación entre canal y canal de 1.0 mm. Los flujos de gases de reacción, esto es, hidrógeno y oxígeno/aire, son en paralelo. El diseño de los platos bipolares se realizó utilizando el programa AutoCAD y el maquinado mediante una fresadora con control numérico, CNC. Los platos colectores de corriente fueron manufacturados en grafito de alta densidad (“fuel cell store”), con espesor de 5 mm.

Los EME fueron formados con membranas comerciales Gore-Select (~51 μm). Los electrodos y difusores de gases fueron de tela de carbón (ElectroChem) depositada con catalizador de Pt (20%peso/C) con cargas de 0.5 mg/cm^2 , en ánodo y cátodo. En los métodos de ensamble convencionales los EME son formados por un proceso de prensado en caliente en un paso previo al armado del arreglo. En el presente diseño los EME fueron acoplados directamente durante el armado por medio de una presión de sellado aplicada para mantener unido el arreglo. El área geométrica de los electrodos fue de 35 cm^2 ($8.4 \text{ cm} \times 4.2 \text{ cm}$) para cada ánodo y cátodo, siendo esta igual al área del serpentín en el plato bipolar. La caracterización se realizó mediante ensayos de polarización potencióstática en un módulo de prueba especializado (Fuel Cell Test System 890B de ElectroChem). Los sellos y empaques utilizados fueron diseñados y fabricados en nuestras propias instalaciones del CINVESTAV.

La **figura 7** muestra una vista posterior y un acercamiento a las pilas de combustible, motor y tanques de almacenamiento de hidrógeno. Adyacente a las pilas de combustible se encuentra el sistema de



Fig. 7. (a) Fotografía del go-kart. (b) Fotografía de los arreglos de pilas de combustible

humidificación de gases reactantes. Se demostró en pruebas de campo que el diseño e instalación de las pilas de combustible y equipos periféricos son completamente funcionales. El hidrógeno y el oxígeno del aire pasaron primero por el sistema de humidificación, donde los gases reactivos secos adquirieron la humedad necesaria para el balance correcto de agua y el buen desempeño de la pila de combustible. Los gases reactantes húmedos se suministraron a los tres arreglos de pilas de combustible en paralelo, impulsados por un sistema de bombeo. La energía requerida por el sistema de bombeo o circulación de gases fue provista por las baterías recargables. Con el fin de aumentar la utilización del hidrógeno, el que no reaccionó se recirculó enviándolo al humidificador y de ahí nuevamente a los tres arreglos de pilas de combustible. El flujo de oxígeno (aire) no fue recirculado, cada arreglo contó con su salida de oxígeno abierta a la atmósfera, junto con el agua producto de la reacción electroquímica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **figura 8** muestra las curvas de desempeño (corriente-voltaje-potencia) del arreglo a 60°C y bajo presión atmosférica en la alimentación de gases. La temperatura de operación del arreglo fue alcanzada con el calor liberado por el propio arreglo. El desempeño fue obtenido empleando como alimentación de gases hidrógeno y oxígeno de alta pureza o aire, a temperatura ambiente y presión atmosférica. El resultado obtenido en esta pila es semejante al desempeño obtenido en las otras dos pilas de combustible (no mostrado). Se observa como a medida que la corriente en la pila se incrementa por las reacciones electroquímicas, el voltaje de la pila disminuye. En

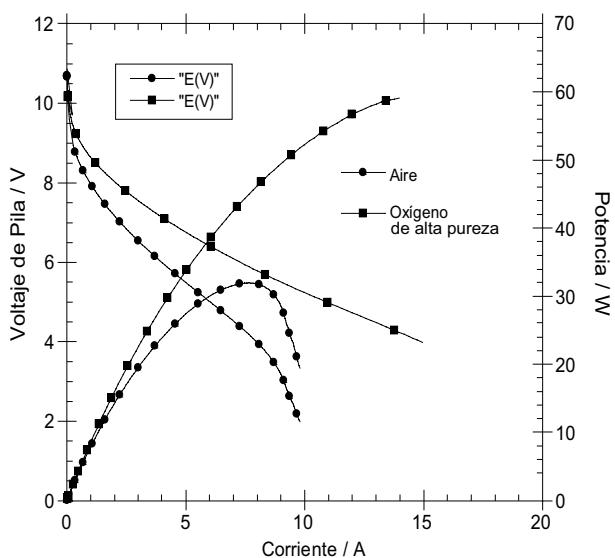


Fig. 8. Desempeño del arreglo de pilas de combustible

esta misma figura se observa que el desempeño de la pila con oxígeno de alta pureza, genera casi el doble de potencia en comparación con la obtenida cuando se alimenta aire a la pila. Aunque el desempeño con oxígeno de alta pureza es mayor, la operación con oxígeno involucra el costo de este gas mientras que en la operación con aire, el oxígeno es sin costo. Los sistemas de pilas de combustible deben ser capaces de operar con alta eficiencia utilizando oxígeno del aire.

Para la operación del prototipo go-kart se construyeron tres arreglos o pilas de combustible de 30 W conectadas eléctricamente en serie y operadas con hidrógeno de alta pureza y oxígeno del aire. El sistema completo descrito anteriormente ha sido probado bajo diferentes condiciones y se ha demostrado que el diseño e instalación de las pilas de combustible y equipos periféricos es completamente funcional. La velocidad promedio que alcanza el go-kart es de 5 km/h con una carga total de 120 kg. El diseño de este sistema es escalable a sistemas de mayor potencia y velocidad. Sin embargo, es posible hacer un uso más eficiente de la energía mediante la optimización del diseño del go-kart y del uso de materiales de construcción más ligeros, por ejemplo realizar un diseño aerodinámico y utilizar un chasis de aluminio o de fibra de carbón. Este prototipo ha sido presentado en diferentes foros y ha sido distinguido con el primer lugar en el Certamen Nacional Juvenil de Ciencia y Tecnología 2007, en el área de medio ambiente, organizado por el Instituto Nacional de la Juventud.

CONCLUSIONES

Se construyeron tres arreglos o pilas de combustible de 30 W cada una, capaces de operar con hidrógeno de alta pureza y oxígeno del aire. Las pilas de combustible construidas tienen la capacidad de suministrar la potencia a un prototipo go-kart. Este go-kart fue diseñado y construido aplicando una nueva tecnología con capacidad de solucionar los problemas ambientales de contaminación, debido a que se trata de una tecnología de cero emisiones contaminantes. El desarrollo de este trabajo ha contribuido a obtener experiencia en nuestro grupo de trabajo en el diseño, construcción, puesta a punto y operación de pilas de combustible de 30 Watts. También ha sido una herramienta importante en foros de difusión de nuevas tecnologías tanto para un público especializado como para el público en general. El desarrollo y la aplicación de la tecnología del hidrógeno y pilas de combustible se ha planteado como una tarea multidisciplinaria e involucra el trabajo conjunto de científicos, tecnólogos, ingenieros, economistas, gobierno, académicos, empresarios, etc.

Como principales perspectivas para el mejoramiento y posible aplicación en mayor escala de este proyecto se requiere: 1) La sustitución de los materiales de construcción del chasis del go-kart por materiales más ligeros. 2) Reemplazar las baterías de plomo ácido por baterías recargables de litio. 3) Desarrollar un sistema electrónico de control para disminuir el número de pilas de combustible necesarias y aumentar la vida útil de todo el conjunto. 4) Mejorar el diseño de la pila de combustible, de modo que se tenga un manejo eficiente de los gases reactivos, especialmente del hidrógeno. 5) Utilizar hidruros metálicos como sistema de almacenamiento de hidrógeno a bordo, ya que estos sistemas garantizan una operación segura y en varios sentidos más eficiente que el almacenamiento gaseoso del hidrógeno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, CONACYT (Ref. 46094) y al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, ICYTDF (Ref. OCF-OSF). KSA agradece al CONACyT la beca (No. 180560) de tesis doctoral. Los autores agradecen de manera especial al Ing. José Anaya Izquierdo (Praxair de México) por su contribución en el suministro de hidrógeno de alta pureza para el desarrollo del presente proyecto.

REFERENCIAS

- Cifrain M. y Kordesch K. (2003). Hydrogen/oxygen (air) fuel cells with alkaline electrolytes. En: *Handbook of fuel cells – Fundamentals, Technology and Applications.* (W. Vielstich, A. Lamm y H.A. Gasteiger, Eds.). John Wiley, Inglaterra, 1, 267-280.
- Gottesfeld S. y Zawodzinski T. (1997). Polymer electrolyte fuel cell. En: *Advances in Electrochemical Science and Engieneering.* (R.C. Alkire, H. Gerischer, D.M. Kolb y C.W. Tobias, Eds.). Wiley-VCH, Weinheim, 5, 195-301.
- Heywood J.B. (2006). Fueling our transportation future. *Sci. Am.* 295, 60-63.
- Ogden J.M. (2002). Hydrogen: the fuel of the future? *Phys. Today.* 55, 69-75.
- Ogden J.M. (2006). High hopes for hydrogen. *Sci. Am.* 295, 94-101.
- Solorza-Feria O. (2007). Hidrógeno y celdas de combustible. <http://www.relaq.mx/RLQ/h2.html>
- Suppes G.J. (2005). Plug-in hybrid with fuel cell battery charger. *Int. J. Hydrogen Energ.* 30, 113-121.