

Pilas de combustible y su desarrollo¹

Fuel Batteries and Their Development²

Pilhas de combustível e seu desenvolvimento³

Código SICI: 0123-2126(201206)16:1<247:PCYSD>2.3.TX;2-L

Laura-Milena Corredor-Rojas⁴

¹ Fecha de recepción: 19 de abril de 2011. Fecha de aceptación: 23 de septiembre de 2011. Instituto Colombiano del Petróleo, Santander, Colombia.

² Submitted on April 19, 2011. Accepted on September 23, 2011. Instituto Colombiano del Petróleo, Santander, Colombia.

³ Data de recepção: 19 de abril de 2011. Data de aceitação: 23 de setembro de 2011. Instituto Colombiano do Petróleo, Santander, Colômbia.

⁴ Ingeniera química, magíster en Ingeniería Química y estudiante del Doctorado en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Empleada del Instituto Colombiano del Petróleo (Ecopetrol S. A.), Santander, Colombia. Correo electrónico: laura.corredor@ecopetrol.com.co.

Resumen

El pronosticado cenit del petróleo, las regulaciones ambientales y el precio del crudo han incentivado la búsqueda de nuevos dispositivos para producir energía de forma eficiente y poco contaminante. Sin lugar a dudas, las pilas de combustible son dispositivos que cumplen estas características, pues son más eficientes que la mayoría de máquinas de combustión y generan menos emisiones. Gracias a estas ventajas, el mercado de las pilas de combustible se ha venido ampliando. En este artículo se revisa el mercado potencial de las pilas de combustible y los retos a los cuales se enfrentan sus desarrolladores para poder posicionarlos en el mercado. También se mencionan algunos de los productos disponibles comercialmente y las actividades internacionales para su desarrollo.

Palabras clave

Industria del petróleo y productos derivados, mercadeo de celdas de combustible.

Abstract

The forecast zenith of oil, the environmental regulations and the price of oil have encouraged the search for new efficient and not-so-polluting energy-producing devices. Undoubtedly, fuel batteries are devices that comply with these characteristics since they are more efficient than most combustion machines and generate fewer emissions. Thanks to these advantages, the fuel batteries market has been widening its scope. This article reviews the potential market for these batteries and the challenges faced by their inventors in order to position them in the market. The article it also mentions some of the commercially available products and international activities related to their development.

Keywords

Petroleum industry and trade derivatives, fuel cells marketing.

Resumo

O pronosticado zênite do petróleo, as regulamentações ambientais e o preço do petróleo tem incentivado a busca de novos dispositivos para produzir energia de forma eficiente e pouco contaminante. Sem dúvida nenhuma, as pilhas de combustível são dispositivos que cumprem estas características, pois são mais eficientes que a maioria de máquinas de combustão e geram menos emissões. Graças a estas vantagens, o mercado de as pilas de combustível vem ampliando-se. Neste artigo é revisado o mercado potencial das pilas de combustível e os desafios com os quais se enfrentam seus desenvolvedores para poder posicioná-los no mercado. Também são mencionados alguns dos produtos disponíveis comercialmente e as atividades internacionais para seu desenvolvimento.

Palavras chave

Indústria do petróleo-produtos derivados, células de combustíveis-marketing.

Introducción

La primera pila de combustible fue construida en 1839 por *sir* William Grove; sin embargo, el verdadero interés en estos dispositivos generadores de energía se dio en la década de los sesenta, cuando el programa espacial de Estados Unidos las utilizó para suministrar electricidad y agua a las naves espaciales Gemini y Apollo. Hoy en día, la aplicación espacial ya no es su único mercado, puesto que las pilas de combustible están alcanzado una etapa tecnológica que las acerca a poder competir con las tecnologías convencionales de generación eléctrica (Cano, 1999).

Diversas razones han impulsado la implementación de las pilas de combustible, entre ellas las altas eficiencias, debido a que —a diferencia de las máquinas térmicas— no están regidas por el ciclo Carnot; generan bajas emisiones de contaminantes, bajos costos de mantenimiento y amplios rangos de energía (desde algunos vatios hasta cientos de megavatios), y permiten la diversificación del suministro de energía global (Báez y Rodríguez, 1999).

Sin embargo, existen limitaciones que deben superarse para que se intensifique el uso de este tipo de dispositivos, dentro de las que se encuentran el costo de capital, el cual debe pasar de US\$3.000 a US\$4.000 por kW a US\$1.000 por kW (Lloyd, 1999); las limitaciones en los materiales de fabricación, por cuanto es preciso desarrollar materiales resistentes al estrés térmico, a la acción de los contaminantes en el combustible y en el oxidante y al efecto corrosivo de los electrolitos, y, por último, la distribución y almacenamiento de combustible como el metanol, hidrógeno, etc., para los cuales no se cuenta actualmente con la infraestructura de transporte y ni de suministro.

1. Principios básicos y tipos de pilas

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica y calórica. Consta de un electrolito, el cual puede ser sólido o líquido en contacto con un ánodo y un cátodo

porosos. Los gases combustibles y oxidantes fluyen a través del ánodo y cátodo, respectivamente, y reaccionan electroquímicamente en la región límite donde se encuentran las tres fases, gas/electrolito/interface electrodo poroso (Cano, 1999).

Una sola pila de combustible puede producir una diferencia de potencial entre 0,5 y 1 voltio de corriente continua, por lo cual para aplicaciones prácticas se deben realizar combinaciones en serie y en paralelo de tal forma que se aumente la tensión y la densidad de corriente (Handschin, 1999).

Existe una amplia variedad de pilas de combustible que se pueden clasificar teniendo en cuenta el tipo de combustible, el tipo de electrolito que utilizan como medio conductor de los iones o de acuerdo con el rango de temperatura en el cual opera (Fuel Cells Org, 2000). A continuación se enuncian los aspectos principales de cada tipo de pila.

1.1. Pilas alcalinas (AFC)

Como electrolito utilizan una solución acuosa alcalina de hidróxido de potasio retenida en una matriz. Este tipo de electrolito permite que la reacción en el cátodo sea más rápida, lo que significa mayor desempeño. Pueden alcanzar eficiencias de generación de potencia de hasta 70% y operan entre 150 y 200 °C.

1.2. Pilas de ácido fosfórico (PAFC)

El electrolito es ácido fosfórico líquido integrado a una matriz porosa. Generan electricidad con una eficiencia del 40% y cerca del 85% si el vapor producido es empleado en cogeneración. Operan a una temperatura alrededor de 200 °C, debido a que a temperaturas menores el ácido fosfórico es un conductor iónico pobre o se produce el envenenamiento severo en el ánodo por monóxido de carbono. Su uso es muy apropiado para generación estacionaria o móvil de gran dimensión. Se han construido plantas que generan entre 1 y 5 MW; sin embargo, la mayor parte de las plantas producen entre 50 y 200 KW (U. S. Department of Energy Office, 2004). Las PAFC son la tecnología más madura.

1.3. Pilas de membrana polimérica (PEMFC)

Estas pilas operan alrededor de 950 °C, su eficiencia está entre 40% y 50%. Su comportamiento interno es similar a las PAFC, tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su potencia de salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones en las cuales se requiere una demanda inicial rápida, tal como el caso de los automóviles (Meta y Cooper, 2003).

1.4. Pilas de carbonato fundido (MCFC)

Operan aproximadamente a 1200 °C para alcanzar suficiente conductividad del electrolito. La operación a alta temperatura hace que sea innecesario el uso de catalizadores para los procesos electroquímicos de oxidación y de reducción. Las MCFC tienen una eficiencia del 60%, la cual puede ser incrementada al 80% si el calor producido es utilizado para cogeneración. Actualmente, las unidades de demostración han producido hasta 2 MW, pero existen planes para unidades de 50 a 100 MW.

Las complejidades de este tipo de pilas son el manejo del electrolito líquido y el agotamiento de los iones del carbonato del electrolito en las reacciones al ánodo, lo cual se compensa con la inyección de anhídrido carbónico en el cátodo (<http://worldwide.fuelcells.org>; Cheperly et ál., 2005).

1.5. Pilas de óxido sólido (SOFC)

Operan entre 600 y 1000 °C. Tienen como electrólito un óxido metálico sólido, no poroso que generalmente es itria estabilizada con zirconia ($Y_2O_3-ZrO_2$). El ánodo es un cerametal Ni-ZrO₂ y el cátodo es LaMnO₃ dopada con estroncio (Xu et ál., 2007). Las SOFC permiten la conversión de una amplia gama de combustibles. De hecho, los sistemas con SOFC (reformador + pila de combustible) presentan las eficiencias más altas de cualquier sistema de producción de energía.

1.6. Pilas de metanol directo (DMFC)

Estas pilas son similares a las pilas PEM, ya que ambas usan una membrana de polímero como electrolito. Sin embargo, en las pilas DMFC el catalizador del ánodo obtiene el hidrógeno del metanol líquido, lo que elimina la necesidad de un reformador de combustible (Dohle et ál., 2000). Operan entre 90 y 120 °C, con una eficiencia del 30% (Dillon et ál., 2004).

1.7. Pilas de carbón directo (DCFC)

En las DCFC, el carbón sólido (combustible derivado del carbón, coque de petróleo o biomasa) se utiliza directamente en el ánodo, sin un paso intermedio de gasificación. La termodinámica de las reacciones en una pila DCFC permite una eficiencia muy alta, por lo que si la tecnología se desarrolla, tendrá un impacto significativo en la producción de energía a base de carbón (Domínguez, 2002; Ca et ál., 2007).

1.8. *Pilas microbianas*

Convierten un sustrato biodegradable directamente a electricidad. Esto se consigue cuando las bacterias, a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como la glucosa, a un aceptor de electrones. Este tipo de pila tiene ventajas como la conversión directa de sustrato a electricidad (altas eficiencias de conversión), operan eficientemente a temperatura ambiente, no requieren el tratamiento del biogás generado en la pila, no precisan energía extra para airear el cátodo y tienen aplicación potencial en lugares alejados con ausencia de infraestructura eléctrica (Alzate et ál., 2008; Logan y Regan, 2006; De Schampelaire et ál., 2008; Dewan et ál., 2008).

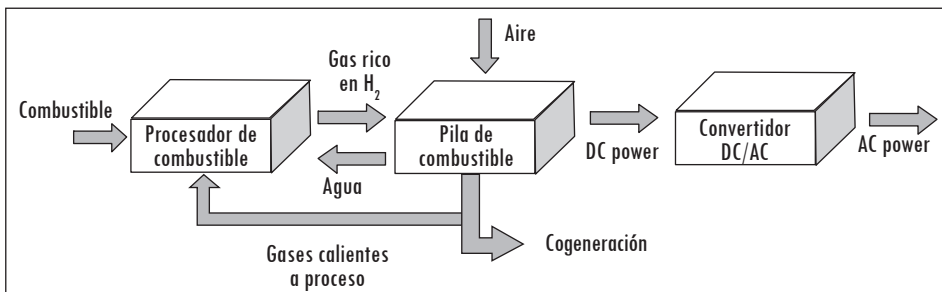
1.9. *Pilas regenerativas*

Las pilas regenerativas son atractivas por ser un tipo de generación de potencia de ciclo cerrado. El agua es separada en hidrógeno y oxígeno mediante un electrolizador solar, los cuales son alimentados a la pila de combustible y generan electricidad, calor y agua. El agua producida es recirculada hacia el electrolizador alimentado con energía solar y el proceso comienza de nuevo (Mitlitsky et ál., 1998).

2. Sistemas de pilas de combustible

Los sistemas de pilas de combustible, generalmente, se componen de un procesador de combustible, de la sección de generación y de conversión de la energía y de un sistema de cogeneración. Los combustibles suministrados al sistema pueden ser gasolina, diésel, gas natural, gas licuado de petróleo (LGP), etanol, metanol (Taylor et ál., 2007; Palo et ál., 2007), carbón y biogás (Schmersahl et ál., 2007; Xuan et ál., 2009).

Figura 1. Configuración de un sistema de pilas de combustible



Fuente: presentación propia de los autores.

El gas natural es el combustible más atractivo por su disponibilidad, alta conversión y porque cuenta con la infraestructura de transporte y suministro. La gasolina tiene, además de la disponibilidad de la infraestructura, la aceptación pública de su utilización; sin embargo, los desarrolladores deben superar las barreras tecnológicas para poder utilizar este combustible en los sistemas de las pilas de combustible (Bowers et ál., 2005 y 2006). El diésel es de especial interés para las unidades auxiliares de suministro de energía de camiones militares; pero su uso se encuentra limitado por la formación de coque y el envenenamiento del catalizador utilizado en el reformador. Las principales desventajas del biogás proveniente de la pirólisis de la biomasa o de la digestión anaerobia es su composición variable y los altos contenidos de impurezas (Qui et ál., 2007).

El uso del hidrógeno en las celdas de combustible está limitado, porque a pesar de ser uno de los elementos más abundantes en el universo, no representa una fuente de energía, sino un vector energético (es decir, un portador de energía), puesto que debe ser producido a partir de combustibles primarios, como el gas natural y el carbón.

Los procesos más comúnmente utilizados para la conversión y el acondicionamiento de los combustibles utilizados en las pilas son el reformado con vapor (SR), la oxidación parcial catalítica (CPO) o no catalítica (POX), el reformado autotérmico (ATR) y el *Water Gas Shift* (WGS). Otros procesos que pueden ser utilizados son el plasma *reforming* del metano (Bromberg et ál., 1998) y los procesos de remoción del monóxido de carbono (oxidación preferencial, metanización y membranas de purificación) (Siddle et ál., 2003).

El SR es una tecnología madura que involucra la reacción catalítica de hidrocarburos con vapor de agua. Se usa para la conversión de nafta, gas natural e hidrocarburos livianos (propano y butano). Mediante el SR se obtiene cerca del 96% de la demanda mundial de hidrógeno. El reto de los desarrolladores de esta tecnología es llevar el SR a una escala menor, para lo cual deberán mejorar la transferencia de calor desde el sistema de combustión hacia el catalizador (Qi et ál., 2007).

En la POX se convierten hidrocarburos pesados, asfaltos y carbón, en presencia de oxígeno, en un gas crudo que posteriormente es tratado para la remoción del sulfuro de hidrógeno. Los aspectos que restringen su implementación en las pilas de combustible son el requerimiento de suministro de oxígeno puro, la elevada temperatura (1300-1500 °C) y la presión de operación (20-40 atm). En la CPO se utiliza aire como oxidante y vapor para regular la temperatura. La CPO ocurre a temperaturas menores (400-500 °C y 900 °C en la zona caliente), con lo cual se usan materiales del reactor menos costosos y se reduce la formación de NOx (Siddle et ál., 2003).

Durante el ATR ocurren muchas reacciones; estas incluyen comúnmente la oxidación parcial o total, el SR, el reformado del dióxido de carbono, el craqueo de hidrocarburos, el WGS y la metanización. Sin embargo, muchos autores han encontrado conveniente describir las reacciones del ATR simplemente como una combinación del POX y del SR, seguida por la reacción WGS (Siddle et ál., 2003). Sin embargo, opera a una relación oxígeno-carga más baja y trabaja a menor temperatura que la POX.

El WGS se utiliza para convertir el monóxido de carbono en dióxido de carbono y para incrementar la producción de dihidrógeno. El WGS se puede realizar a alta (HTS) o baja temperatura (LTS). El HTS utiliza Fe/Cr/Al₂O₃ como catalizador, el cual es económico y resistente a impurezas, pero necesita trabajar a temperaturas superiores a 350 °C para mantener su actividad. El LTS utiliza Cu/Zn/Al₂O₃ como catalizador, el cual presenta buena actividad a temperaturas inferiores a 200 °C, pero es costoso y susceptible a envenenamiento (Papadías et ál., 2006; Sundmacher, 2010).

Para la desulfurización de los combustibles se usan procesos como el rectisol, selexol, hidrodesulfurización (HDS), MEROX, lavado con aminas y purisol. El proceso rectisol fue licenciado por Linde y Lurgi (Papadías et ál., 2006), usa metanol como solvente y es comúnmente utilizado en el tratamiento del gas de síntesis (H₂, CO), producido por la gasificación de carbón o de hidrocarburos pesados. El proceso selexol, licenciado por UOP LLC usa como solvente una mezcla de dimetiléteres y polietilenglicol.

Como se observa en la tabla 1 la tolerancia de cada pila a los contaminantes es diferente, razón por la cual los procesos utilizados para la conversión del combustible dependerán no solo de su composición, sino de los requerimientos técnicos de las pilas de combustible.

Tabla 1. Tolerancia de las pilas de combustible a diferentes compuestos

Gas	PEM	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
CO	Contaminante > 10 ppm	Contaminante > 50 ppm	Contaminante > 0,5-1%	Combustible	Combustible
CH ₄	Diluyente	Diluyente	Diluyente	Diluyente/combustible	Diluyente/combustible
CO ₂	Diluyente	Contaminante > 50 ppm	Diluyente	Diluyente	Diluyente
H ₂ S	Contaminante	-	Contaminante > 50 ppm	Contaminante > 0,5 ppm	Contaminante > 1 ppm

Fuente: (Papadías et ál., 2006).

3. Pilas de combustible comerciales

Actualmente se encuentran en el mercado pilas de combustibles desde 100 W hasta 2800 KW que pueden usarse en equipos portátiles, en el transporte de personas o de mercancías y para generación de energía (tabla 2).

4. El mercado de las pilas de combustible

La motivación para que las pilas de combustible entren en el mercado de las baterías se debe a que estas últimas no pueden competir hoy con los motores de combustión interna ni con la turbinas de vapor/gas por sus altos costos, su menor desempeño en generación de potencia y energía y su reducida vida útil (< 3000 h) (Dyer, 2002).

La mayor ventaja de las pilas de combustible frente a las baterías es que tienen mayor densidad de energía. Las baterías recargables de Li-ion, que son las más utilizadas actualmente en los equipos portátiles por su gran capacidad de almacenamiento de energía, tienen un densidad de energía de 1680 KWh/m^3 ; mientras que las pilas de combustible que consumen gasolina, gas natural o hidrógeno (estos dos últimos en estados líquido) tienen densidades de 11000 , 5800 y 2380 KWh/m^3 , respectivamente (Winter y Brodd, 2004). Este factor, unido a los largos tiempos de recarga y la contaminación por la disposición final, afectan la incursión de las baterías en el transporte automotor y potencializa la aplicación de las pilas de combustible (Veziroglu y Macario, 2011; Kleijn y Van der Voet, 2010).

La necesidad de energía confiable y de alta calidad y los efectos medioambientales han impulsado la reestructuración del sector eléctrico en los países desarrollados, a fin de migrar desde los monopolios centralizados a estructuras organizacionales descentralizadas y privadas, que cambien las grandes centrales de generación por pequeñas unidades distribuidas estratégicamente, orientadas por el mercado y el consumidor. Este cambio también ofrece un nicho de mercado para las pilas de combustible (Brown et ál., 2007).

En la tabla 3 se presentan el resumen de los mercados más probables para el uso de pilas de combustible. A fin de posicionarlas, las pilas deberán ofrecer ventajas como:

- En el campo de los equipos portátiles, las pilas de combustible deberán reducir el tiempo de recarga, asegurar el suministro de combustible de manera compacta y segura, reducir el peso y el volumen e incrementar la duración entre recargas. Adicionalmente, el modo de recarga con cartuchos de combustible deberá ser accesible y más fácil de manejar que una segunda batería (Dyer, 2002).

Tabla 2. Características de las pilas de combustible comercialmente disponibles

Compañía	Producto	Aplicación	Combustible	Potencia (KW)	Eficiencia (%)	Sitio web
Ballard	FCvelocity 9 SSL	Montacargas	Hidrógeno	4,4-19,3	47-71	http://www.ballard.com
	FCvelocity HD6	Buses	Hidrógeno	75 y 150	62-71	
	FCGen 1020 ACS	Energía de respaldo	Hidrógeno	0,3-3,4	51-67	
	FCGen 1300	Energía auxiliar	Hidrógeno o reformado	2,3-11,3	54-64	
	FCGen 1030	Cogeneración	Hidrógeno o reformado	1,2	54-63	
FuelCell Energy	DFC 300MA	Generación distribuida	Gas natural	300	47	http://www.fuelcellenergy.com
	DFC 1500MA	Generación distribuida	Gas natural	1400	47	
	DFC 3000	Generación distribuida	Gas natural	2800	47	
	HyPM XR módulos	Energía de respaldo	Hidrógeno	4,5-12,5	> 55	
Hydrogenics Corporation	HyPM HD módulos	Transporte	Hidrógeno	4,5-100	> 50	http://www.hydrogenics.com
	Sistema HyPX	Montacargas	Hidrógeno	30	-	
Idatech	ElectraGen H2-1	Energía de respaldo	Hidrógeno	2,5-5,0	-	http://www.idatech.com
	ElectraGen ME	Energía de respaldo	Metanol + agua	2,5-5,0	-	
Jadoo Power	XRT 150	Portátil	Hidrógeno	150	-	http://www.jadoodpower.com
	Andromeda	Transporte	Hidrógeno	50-127	-	
Nuvera	Power flow	Vehículos industriales	Hidrógeno	2,5-5,0	56	http://www.nuvera.com
	HDL-82 power módulo	Transporte	Hidrógeno	82	> 54	

Continúa

Compañía	Producto	Aplicación	Combustible	Potencia (KW)	Eficiencia (%)	Sitio web
Reli-On	E-200	Energía de respaldo	Hidrógeno	0,175-0,5	-	http://www.relion-inc.com
	E-1100	Energía de respaldo	Hidrógeno	1,1-9,9	-	
	E-2500	Energía de respaldo	Hidrógeno	2,5	-	
	T-1000	Energía de respaldo	Hidrógeno	0,1-1,2	-	
	T-2000	Energía de respaldo	Hidrógeno	0,1-12	-	
Teledyne Energy Systems Inc.	NG-2000	Espacial, generación distribuida y portátil	Hidrógeno o reformado	1,4-11,1	-	http://www.teledyneenergysystems.com
UltraCell	XX-25	Micro/portátil	Metanol + agua	0,025	-	http://www.ultracellpower.com
	XX-55	Micro/portátil	Metanol + agua	0,055	-	
UTC Power	PureCell Modelo 400	Generación distribuida	Gas natural	400	> 40	http://www.utcpower.com

Fuente: presentación propia de los autores.

- Para su aplicación en las fuentes de alimentación continua, en los equipos médicos y de navegación deberán demostrar alta confiabilidad y bajos requisitos de mantenimiento.
- Para las fuentes de energía de respaldo deberán tener la capacidad de proveer energía rápidamente en caso de una falla de la fuente primaria.
- Para la utilización de las corrientes ricas en hidrógeno provenientes de diferentes procesos de la industria química o de la gasificación del carbón, las pilas deberán ser resistentes a los contaminantes que hacen parte de dichas corrientes con el fin de evitar inversiones en sistemas de tratamiento.
- Para su implementación en los sistemas de transporte deberán poder utilizar casi cualquier tipo de combustible, reducir la frecuencia de carga y ser ligeras, compactas, confiables y económicas (Veziroglu y Macario, 2011).

Tabla 3. Mercados para las pilas de combustibles

Mercado	Consideraciones
Educación	Mercado enfocado en incrementar el conocimiento sobre pilas de combustibles
Unidades auxiliares de energía (APU) para carros	Mercado beneficiado por el interés en APU con cero emisiones
Energía de alta calidad	Competencia con tecnologías de menor costo
Cámaras de televisión	Comercialmente es viable porque el precio de la pila no afecta el costo total de la cámara
Actividades al aire libre	Competencia con tecnologías de menor costo
3C (computadores, celulares y videocámaras)	Mercado prometedor si se construyen pilas más ligeras y con precios similares a los de las baterías Para su comercialización deben superar problemas de almacenamiento, espacio y recarga de combustible
Transporte pesado	Competencia con las baterías
Equipos para navegación	Es un mercado pequeño, pero puede asumir los costos de las pilas de combustible
Energía portable	Competencia con tecnologías de menor costo. Su ventaja comercial es la reducción de vibración, ruido y emisiones
Equipos médicos	Las pilas de combustible ofrecen energía confiable
Industria química	Se aprovecharían corrientes (residuales) procedentes de la industria. Comercialización limitada por los altos costos de ingeniería
Transporte personas	Beneficios medioambientales comparados con los motores de combustión interna
UPS	Compite con las baterías. Las pilas deben demostrar confiabilidad y cortos periodos de mantenimiento

Continúa

Mercado	Consideraciones
Transporte y equipo marítimo	Es un mercado fuerte para los motores diésel, por costo y por espacio disponible para la instalación de los sistemas de generación
DC/ <i>stand-by</i>	A corto y mediano plazo las pilas de combustible no se consideran aptas para generación de DC a gran escala. En sistemas <i>stand-by</i> , compiten con los motores diésel
Gasificación de carbón	Los sistemas integrados gasificador-pila de combustible requieren gran capital inicial, por lo que son comercialmente viables para sistemas que generen más de 500 Mwe
APU para aviones	Las pilas de combustible no compiten técnica ni comercialmente con las turbinas de gas

Fuente: (Department of Trade and Industry, 2000).

5. Actividad internacional para el desarrollo de las pilas de combustible

Japón, Estados Unidos, Francia, Alemania, Italia, España, China, Taiwán, Corea e India son algunos de los países que invierten mayor presupuesto en la investigación de tecnologías para la producción y almacenamiento de hidrógeno, en sistemas de distribución de este combustible, en el desarrollo de vehículos con pilas de combustible (FCV) y en pilas para generación distribuida.

Japón invirtió entre el 2003 y el 2011, MUS\$300 en investigación, destinados específicamente a la prueba de diversas pilas de combustible para vehículos o para plantas de generación distribuida (<http://www.usfcc.com>). El objetivo del gobierno japonés para el 2015 es tener en circulación en las cuatro principales ciudades (Tokio, Nagoya, Osaka y Fukuoka) gran cantidad de FCV y cerca de cien estaciones suministradores de hidrógeno. A este objetivo se han unido tres compañías del sector automotor (Honda, Toyota y Nissan) y diez compañías japonesas del sector energético. Estas últimas se enfocarán en el desarrollo de la red de suministro de hidrógeno necesaria para la exitosa adopción de estos vehículos (<http://www.nissanlac.com>).

Se predice que China tendrá la mayor cantidad de FCV en el 2050, si se adoptan sus ambiciosas políticas de cambio climático y de seguridad energética, según publicaciones realizadas por la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo y la Agencia Internacional de Energía. La investigación y el desarrollo de las tecnologías de la pila de hidrógeno y del hidrógeno han sido impulsadas por el gobierno central para reducir las emisiones atmosféricas debidas al transporte, para realzar la seguridad energética y para mejorar la competitividad nacional. La inversión en investigación entre el 2008 y el 2010 correspondió a US\$500 millones (Zhang y Cooke, 2010). Además de lo anterior,

el gobierno chino ofrece en trece ciudades un monto de US\$37.000 por la compra de un FCV. El objetivo en el 2011 era contar con veinte buses y cuatrocientos autos con pilas de hidrógeno y con dos o cuatro estaciones de suministro.

Korea destinó MUS\$600 entre el 2009 y el 2015 para la investigación de pilas de combustible aplicadas a sistemas de generación distribuida comercial y residencial. Adicionalmente, el gobierno coreano provee un soporte financiero que se encuentra entre 0,23 y 0,28 US\$/KWh, a los sistemas que operan con biocombustible y cubre el 80% del capital de inversión para sistemas residenciales (Butler, 2010). En cuanto al transporte de personas, se espera que en el año 2015 se hayan instalado en Seúl cincuenta estaciones de suministro de hidrógeno y que estén en circulación 3000 FCV y 200 buses usando hidrógeno.

Taiwán, junto con otros países asiáticos, se han enfocado desde hace varios años en la implementación de las pilas de combustible en los vehículos con motores de dos tiempos, debido a la contaminación que estos generan (Wang et ál., 2000). Taiwán espera tener en circulación cerca de 100000 vehículos eléctricos de este tipo en el año 2014. En Europa también se han desarrollado proyectos con el mismo objetivo (Fresco Project coordinado por Energy Research Centre of the Netherlands).

Los gobiernos federales y regionales de Alemania invertirán entre el 2007 y el 2017 MUS\$200 en el desarrollo de las pilas de combustible y en los sistemas de suministro de combustible. La meta para el año 2017 es contar con mil estaciones de suministro de hidrógeno y con 15000 FCV en circulación (Musiolik y Markard, 2011).

Los países EU25+ invierten más de M€200 en investigación relacionadas con producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, en aplicaciones estacionarias, portátiles y para el transporte (Seymour et ál., 2007).

6. Conclusiones

Existe una gran variedad de mercados en los cuales las pilas de combustible pueden incursionar. Sin embargo, los mercados iniciales serán nichos en los cuales los altos costos actuales de esta tecnología puedan ser compensados por sus ventajas competitivas frente a otras tecnologías (motores de combustión interna) o dispositivos de conversión de energía (baterías).

Actualmente, los mercados más prometedores son los equipos portátiles, los sistemas de generación distribuida y el sector de transporte. Para su posicionamiento en dichos mercados, las pilas de combustible deberán ofrecer tiempos de recarga cortos, ser livianas, resistentes a los contaminantes de los combustibles

empleados, incrementar su vida útil, generar mayores densidades de energía y ofrecer energía de alta calidad y confiabilidad. También se requieren mejoras en el diseño de los sistemas de conversión de combustibles, con el fin de lograr una mejor integración energética, hacerlos más compactos, menos complejos y de menor costo.

La dificultad en la consecución del hidrógeno de forma limpia y masiva es otro de los principales obstáculos. Las empresas del sector automotor están invirtiendo recursos en investigación y desarrollo (I+D) en estos temas y están trabajando en el desarrollo de pilas de combustible para sus prototipos de vehículos propulsados por hidrógeno.

Referencias

- ALZATE, L. et ál. Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *Interiencia* [documento en línea]. 2008, vol. 33, núm. 7. <<http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v33n7/art08.pdf>>.
- BÁEZ, V. y RODRÍGUEZ, V. Celdas de combustible: presente, futuro y su impacto en la industria petrolera. *Acta Científica Venezolana*. 1999, vol. 50, núm. 1, pp. 26-33.
- BALLARD [web en línea]. <<http://www.ballard.com>>.
- BOWER, B. et ál. *Performance of an onboard fuel processor for PEM fuel cell vehicles* [documento en línea]. SAE International. 2004. <<http://www.sae.org/congress/2004/>>.
- BOWERS, B. et ál. *Advanced onboard fuel processor for PEM fuel cell vehicles* [documento en línea]. SAE International. 2005. <<http://www.sae.org/congress/2005/>>.
- BROMBERG, L.; COHN, D. y RABINOVICH, A. Plasma reforming of methane. *Energy y Fuels*. 1998, vol. 12, núm. 1, pp. 11-18.
- BROWN, J.; HENDRY, C. y HARBONE, P. An emerging market in fuel cells?: Residential combined heat and power in four countries. *Energy Policy*. 2007, vol. 35, pp. 2173-2186.
- BUTLER, J. *Report: 2010 Survey of Korea* [documento en línea]. <<http://www.fuelcelltoday.com>>.
- CA, D. S. y WANG, G. Direct carbon fuel cell: Fundamentals and recent developments. *Journal of The Power Sources*. 2007, vol. 167, núm. 2, pp. 250-257.
- CANO, U. Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. *Boletín IEE*. 1999, septiembre-octubre.
- CHEPERY, N. et ál. Direct conversion of carbon fuels in a molten carbonate fuel cell. *Journal of the Electrochemical Society*. 2005, vol. 152, pp.1-29.
- DE SCHAMPHELAIRE, L. et ál. microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science and Technology*. 2008, vol. 42, núm. 8, pp. 3053-3058.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. *Fuel cells niche market: applications and design studies* [document en línea]. 2000. pp 1-1085. <<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+/http://www.berr.gov.uk/files/file15219.pdf>>.

- DEWAN, A.; BEYENAL, H. y LEWANDOWSKI, Z. Scaling up microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*. 2008, vol. 42, núm. 20, pp. 7643-7648.
- DILLON, R. et ál. International activities in DMFC RyD: status of technologies and potencial applications. *Journal of the Power Sources*. 2004, vol. 127, núm. 1, pp. 112-126.
- DOHLE, H. et ál. Process engineering of the direct metanol fuel cell. *Journal of the Power Sources*. 2000, vol. 86, núm. 1, pp. 469-447.
- DOMÍNGUEZ, J. Celdas de combustible. *Anales de Mecánica y Electricidad*. 2002, mayo-junio.
- DYER, C. Fuel cells for portable applications. *Journal of Power Sources*. 2002, vol. 106, pp. 31-34.
- FUEL CELLS 2000. *Technology update* [documento en línea]. 2000. <<http://www.fuelcells.org>>.
- FUEL CELLS [web en línea]. <<http://worldwide.fuelcells.org>>.
- FUELCELL ENERGY [web en línea]. <<http://www.fuelcellenergy.com>>.
- HANDSCHIN, E. *Memorias curso "Celdas de Combustible"*. Piedecuesta: Instituto de Investigaciones Guatiguará-UIS, 1999.
- HYDROGENICS [web en línea]. <<http://www.hydrogenics.com>>.
- IDATECH [web en línea]. <<http://www.idatech.com>>.
- JADOO POWER [web en línea]. <<http://www.jadoodpower.com>>.
- KLEIJN, R. y VAN DER VOET, E. Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, vol. 14, pp. 2784-2795.
- LLOYD, A. The future of fuel cells. *Scientific American*. 1999, July, pp 64-69.
- LOGAN, B. y REGAN, J. Microbial fuel cells—challenges and applications. *Environmental Science and Technology*. 2006, vol. 40, núm. 17, pp 5172-5180.
- LURGI [web en línea]. <<http://www.lurgi.com>>.
- META, V. y COOPER, J. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of the Power Sources*. 2003, vol. 114, pp. 32-53.
- MITLITSKY, F.; MYERS, B. y WEISBERG, A. Regenerative fuel cell systems. *Energy y Fuels*. 1998, vol. 12, pp. 56-71.
- MUSIOLIK, J. y MARKARD, J. Creating and shaping innovation systems: Formal networks in the innovation system for stationary fuel cells in Germany. *Energy Policy*. 2011, vol. 39, pp.1909-1922.
- NUVERA [web en línea]. <<http://www.nuvera.com>>.
- PALO, D.; DAGLE, R. y HOLLADAY, J. Methanol steam reforming for hydrogen production. *Chemical Reviews*. 2007, vol. 107, pp. 3992-4021.
- PAPADIAS, D.; LEE, S. y CHMIELEWSKI, D. Autothermal reforming of gasoline for fuel cell applications: a transient reactor model. *Industrial and Engineering Chemical Research*. 2006, vol. 45, pp. 5841-5858.
- QI, A.; PEPPEY, B. y KUNAL, K. Integrated fuel processors for fuel cell application: A review. *Fuel Processing Technology*. 2007, vol. 88, pp. 3-22.
- RELION, Inc. [web en línea] <<http://www.relion-inc.com>>.

- SCHMERSAHL, R.; MUMME, J. y SCHOLZ, V. Farm-based biogas production, processing, and use in Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cells. *Industrial and Engineering Chemical Research*. 2007, vol. 46, pp. 8946-8950.
- SEYMOUR, E.; BORGES, F. y FERNANDES, R. Indicators of European public research in Hydrogen and fuel cells-An input-output analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007, vol. 32, pp. 3212-3222.
- SIDDLE, A.; POINTON, R.; JUDD, R. y JONES, S. *Fuel processing for Fuel Cells-A status review and assessment of prospects* [documento en línea]. 2003, pp. 1-124. <<http://web.archive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/files/file15218.pdf>>.
- SUNDMACHER, K. Fuel cell engineering: toward the design of efficient electrochemical power plants. *Industrial and Engineering Chemical Research*. 2010, vol. 49, pp. 10159-10182.
- TAYLOR, C.; HOWARD, B. y MYERS, C. Methanol conversion for the production of hydrogen. *Industrial and Engineering Chemical Research*. 2007, vol. 46, pp. 8906-8909.
- TELEDYNE ENERGY SYSTEMS, Inc. [web en línea]. <<http://www.teledyneenergysystems.com>>.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF FOSSIL ENERGY. *Fuel cell handbook*. 7a ed. s. l., 2004.
- Ultracell [web en línea]. <<http://www.ultracellpower.com>>.
- UOP [web en línea]. <<http://www.uop.com>>.
- US Fuel Cell Council-Industry Overview 2010 [web en línea]. <<http://www.usfcc.com>>.
- UTC POWER [web en línea]. <<http://www.utcpower.com>>.
- VEZIROGLU, A. y MACARIO, R. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, vol. 36, pp. 25-43.
- WANG, J.; CHIANG, W. y SHU, J. The prospects—fuel cell motorcycle in Taiwan. *Journal of Power Sources*. 2000, vol. 86, núms. 1-2, pp. 151-157.
- WINTER, M. y BRODD, R. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical Reviews*. 2004, vol. 104, pp. 4245-4269.
- XU, Z. et ál. LaCrO₃-VO_x-YSZ anode catalyst for solid oxide fuel cell using impure hydrogen. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007, vol. 111, pp. 16679-16685.
- XUAN, J.; LEUNG, M.; LEUNG, D. y NI, M. A review of biomass-derived fuel processors for fuel cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, vol. 13, pp. 1301-1313.
- ZHANG, F. y COOKE, P. Hydrogen and fuel cell development in china: a review. *European Planning Studies*. 2010, vol. 18, núm. 7, pp.1153-1168.