

Celdas de combustible de Óxido Sólido..... ¿Una de las soluciones al problema energético?

Rodrigo Mayén-Mondragón¹

Resumen

Las celdas de combustible de óxido sólido parecían ser hace algunos años una tecnología que contribuiría fuertemente a la solución de la crisis energética que se aproxima. Sin embargo, en los últimos años ha caído poco a poco la esperanza que se tenía en ella. ¿Cuáles son los problemas que bloquean el camino hacia la comercialización? En este artículo se explora, de una manera general y desde un punto de vista técnico, el estado de esta tecnología en el 2010.

Palabras clave: energía, celdas de combustible, óxido sólido.

Summary

Fuel cells of solid oxide seem to be a high end technology years ago. It was thought that could contribute for a solution to the emerging energetic problem. However, in recent years the hope of this alternative had decreased. What issues might difficult its commercialization? In the present article we caught a glimpse of the status of this technology in 2010, generally and technically speaking.

Keywords: energy, fuel cells, solid oxide.

¹ Doctor en Ciencia de Materiales del Cinvestav Querétaro. Estancia postdoctoral en la misma institución, colaborando en un proyecto con Hitachi GST sobre el pulido nanométrico de cabezas magnéticas lectoras. Trabajó 3 años en la Universidad de Saarland, Alemania, en la construcción de un sistema de caracterización de celdas de combustible de óxido sólido y en el desarrollo de un método para la fabricación de dichas celdas mediante técnicas electroforéticas y plantillas de cristales coloidales. Actualmente está de regreso en México en búsqueda de una posición permanente. rmayen@hotmail.com

Introducción

En un mundo donde la inminente crisis energética se aproxima, algunos países redoblan esfuerzos en la búsqueda de posibles soluciones que les permitan, por lo menos, seguir manteniendo su posición económica y tecnológica en el futuro. Otros países, sin embargo, han hecho muy poco al respecto.... Detrás de los escenarios, se encuentra latente un mercado centrado en la venta de una tecnología que será imprescindible para todos: la generación de energías alternativas.

Hace varios años, las celdas de combustible de óxido sólido (SOFCs, por sus siglas en inglés) ascendieron para encabezar la lista de tecnologías que podrían contribuir mayormente a resolver la crisis energética futura. Sin embargo, parece ser que en los últimos años se ha ido perdiendo el interés en dichos dispositivos. En Alemania, por ejemplo, uno de los principales promotores de esta tecnología en Europa, la investigación se diluyó a partir de que algunas compañías automotrices clave recortaron presupuestos de inversión en proyectos de SOFC. En consecuencia, instituciones como el Centro de Investigación Jülich (*Forschungszentrum Jülich GmbH*) y el Instituto Tecnológico de Karlsruhe se enfrentaron con dificultades para el arranque de nuevos proyectos en esta área.

La problemática que bloquea el camino a la comercialización es variada y depende de la aplicación final planeada para las celdas. *Grosso modo*, para aplicaciones móviles (como en vehículos de transporte, computadoras, etc.), la temperatura de operación es todavía demasiado alta y los dispositivos no son lo suficientemente compactos. Por otro lado, para aplicaciones estacionarias, la tecnología sigue siendo costosa y no permite suministrar energía a precios competitivos con los de suministro actual por medio de tecnologías convencionales (*Solid State Energy Conversion Alliance of the United States Department of Energy* [SECA], 2010). Dicha problemática se tocará con más detalle en las secciones 4, 5 y 7. Cabe mencionar que a pesar de las predicciones negativas, el 2010 vio el valiente lanzamiento de algunos módulos de celdas de combustible de óxido sólido al mercado. Un ejemplo interesante es el “BlueGen” de la empresa *Ceramic Fuel Cells Limited* (www.cfcl.com.au). Sin embargo, se trata solamente de unas cuantas unidades. En este sentido, queda abierta la pregunta: ¿verán algún día las celdas de combustible de óxido sólido la luz en el mercado de la generación de energía? Mientras haya grupos de investigación trabajando todavía en este campo, hay esperanza....

Celdas de Combustible de Óxido Sólido

Las celdas de combustible de óxido sólido no son una tecnología reciente; tienen sus orígenes en el siglo XIX, alrededor de 1890. Se atribuye a Nernst el descubrimiento de la conductividad iónica a alta temperatura en algunos materiales cerámicos, como la zirconia estabilizada con itria (YSZ), que son aislantes eléctricos a temperatura ambiente (Singhal y Kendall, 2004). A finales de los 1930's, ya existía un primer modelo de laboratorio de celda de combustible de óxido sólido: el presentado por Baur y Preis (Singhal y Kendall, 2004). Sin embargo, no fue sino hasta los 1950's que se reconoció el potencial de dicha tecnología y comenzó realmente su desarrollo. Desde entonces ha habido avances considerables en este campo. En cualquier caso, algunos de los elementos integrados en los diseños iniciales, han probado ser irremplazables hasta la fecha.

Las celdas de combustible de óxido sólido, al igual que los otros tipos de celdas de combustible, se basan en el principio de generación de energía eléctrica a partir de una reacción química acompañado por un intercambio de electrones. Este tipo específico de reacciones químicas se conoce como "RedOx", pues uno de los reactivos se "Reduce" al recibir los electrones que el otro cede (y, por ello, se "Oxida"). Las reacciones

RedOx son comunes en la naturaleza, pero necesitan ser manipuladas para poder generar una corriente eléctrica beneficiosa. La clave yace en almacenar los reactivos en compartimentos "independientes" y conectarlos entre sí mediante un conductor eléctrico. De esta manera los electrones cedidos por el reactivo que se oxida fluyen a través del conductor para llegar al reactivo que se reduce. El resultado es una corriente eléctrica que puede alimentarse a un circuito externo para mover un motor o encender un foco, por ejemplo.

En este sistema donde los reactivos están en compartimentos independientes, la acumulación de especies iónicas en cada uno de ellos llevará a una cancelación prácticamente inmediata de la reacción. Por ello, en la práctica, los compartimentos se interconectan entre sí a través de una membrana de intercambio iónico. Dicha membrana, como su nombre la indica, permite el paso de especies cargadas ("Oxidada" y/o "Reducida"), pero no el paso de los reactivos en su forma original. Así, las cargas generadas se neutralizan entre sí y, con ello, la reacción puede seguir su curso.

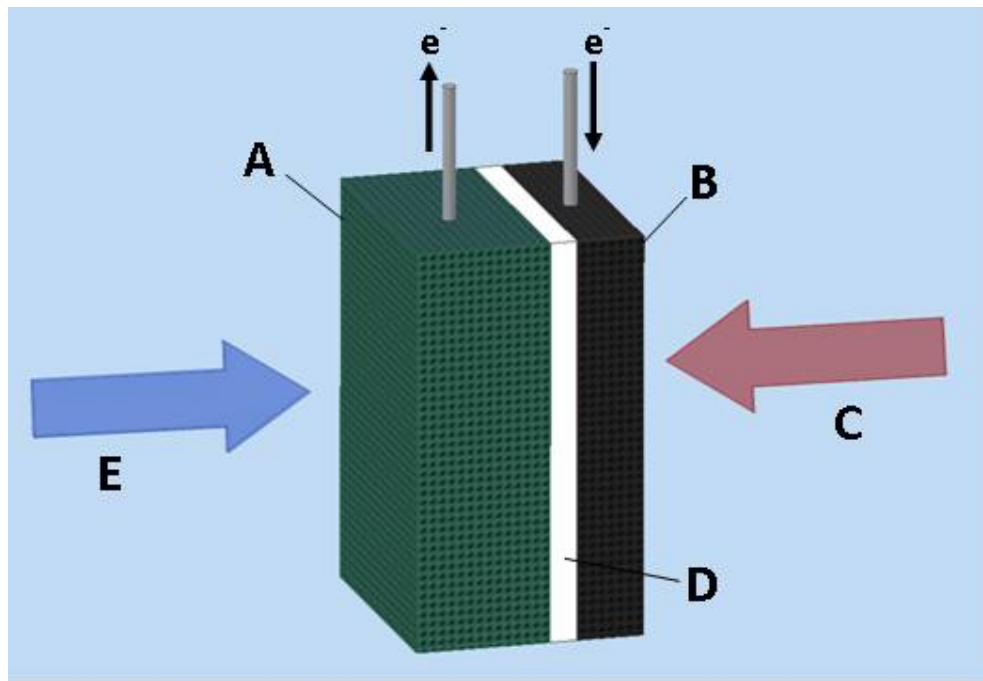
La descripción anterior es muy simplificada puesto que, en realidad, muchos otros parámetros intervienen en el proceso. Pero nos ayuda a comprender la forma más básica de una celda de combustible. Este es también

el principio de operación de una batería. La diferencia entre ambas tecnologías es que en las celdas de combustible, el combustible se alimenta continuamente.

La Figura 1 presenta un esquema simplificado de una celda de combustible. Se observa la membrana o electrolito (D), una corriente de combustible (E) que se Oxida al

perder electrones (e^-) y una corriente de oxígeno (C), por ejemplo, que se reduce al ganar electrones. También se observan dos electrodos: el ánodo (A) y el cátodo (B), que promueven la pérdida y ganancia de electrones de los reactivos y conducen/reciben los electrones hacia/de el circuito externo a través de los colectores.

Figura 1. Esquema de funcionamiento básico de una celda de combustible



Fuente: elaboración propia.

Notas: A) ánodo, B) cátodo, C) Aire, D) Electrolito, E) Combustible, e^- = electrones.

En su configuración más básica, una celda de combustible se alimenta con hidrógeno y oxígeno (o aire), y el único producto de reacción es agua. En este sistema, se tienen las siguientes ventajas:

1. El producto de reacción no es únicamente benéfico, sino también ecológicamente compatible.
2. El oxígeno no cuesta, pues se puede tomar directamente del aire.
3. El hidrógeno no requiere ser producido necesariamente a partir de

combustibles fósiles. Se puede generar, por ejemplo, mediante electrólisis de agua de mar, en un proceso comparativamente limpio.

Una importante desventaja de este esquema es el alto grado de explosividad de la mezcla hidrógeno-oxígeno: ¿quién quiere transportarse en un vehículo con un tanque lleno de hidrógeno? Para reducir dicho riesgo, diversos grupos de investigación trabajan en el tema de almacenamiento de hidrógeno. El objetivo es almacenar el compuesto en formas más seguras (como en hidruros metálicos o dentro de nanofibras de grafito, por ejemplo) y liberarlo a la forma gaseosa durante la alimentación a la celda.

Ventajas del empleo de celdas de combustible de óxido sólido

Utilizando hidrógeno como combustible, las celdas de membrana de intercambio de protones (PEMFC) trabajan eficientemente y su relación tamaño/potencia las hace candidatas ideales para aplicaciones móviles. De hecho, se han desarrollado prototipos de autos que operan con esta tecnología, tales como el Nekar 1 y el Nekar 2 de Daimler AG. Características principales de las celdas son: electrolito de membrana polimérica y funcionamiento normalmente a temperaturas por debajo de 100°C.

Sin embargo, esta tecnología presenta una desventaja mayor, lo cual abre las puertas a las celdas de combustible de óxido sólido: la poca flexibilidad para el procesamiento de combustibles a base de carbono. Por un lado, el hidrógeno tiene una densidad energética relativamente baja, por lo que genera una menor cantidad de energía eléctrica por kilogramo de combustible procesado (Evans, Bieberle-Hütter, Galinski, Rupp, Ryll, Scherrer, Tölke y Gauckler, 2009). Por otro lado, las celdas PEMFC no pueden operar con otros combustibles, pues se envenenan incluso con pequeñas cantidades de monóxido de carbono (Singhal y Kendall, 2004). Debido a ello, requieren de una costosa unidad externa de pre-procesamiento de hidrógeno. En comparación, la alta temperatura de operación en conjunto con los materiales constituyentes de las celdas de combustible de óxido sólido favorecen el procesamiento de combustibles tales como el gas natural, el gas de síntesis (mezcla de CO y H₂), propano, butano e incluso carbón en polvo (“Coal”, 2009). De hecho, está comprobado que la operación con propano resulta en una mayor densidad energética normalizada a peso (o volumen) que la de una PEMFC o DMFC (celda de combustible de metanol directo) (Evans *et al.*, 2009). Además, el empleo de combustibles corrientes permite aprovechar directamente la tecnología ya establecida para contenedores, sistemas de procesamiento y sistemas de

suministro de combustible (Evans *et al.*, 2009).

Naturalmente, el empleo de combustibles basados en carbono resulta en la generación de dióxido de carbono como subproducto. Aunque la relación entre la emisión de dicho compuesto y el calentamiento global está todavía bajo discusión, parecería a primera vista que las SOFC no prometen grandes ventajas sobre los sistemas convencionales de generación de energía por combustión. Sin embargo, comparando la eficiencia de conversión energética (η) de dichas tecnologías, las SOFCs resultan evidentemente superiores ($\eta \approx 60\%$ para SOFCs comparado con $\eta \approx 30\%$ típico de una planta de generación de energía a partir de carbón). En otras palabras, la eficiencia de conversión de una SOFC es 100% mayor a la de una planta de carbón. De esta manera, se tiene un ahorro de combustible del 50% para generar la misma cantidad de energía. El siguiente cálculo da una idea de cantidades típicas de combustible involucradas ("Coal", 2009):

- un foco de 100 W operando día y noche durante un año consume 876 KWh (100 Watts x 365 días x 24 horas). El contenido energético típico del carbón es de 6.67 KWh/Kg. Pero, con una eficiencia de conversión del 30%, sólo se obtienen 2 KWh/Kg. En estas condiciones, se requiere quemar ¡438 Kg de carbón! para la operación

anual del foco. Comparativamente, al emplear una SOFC con eficiencia de conversión energética de 60%, se requieren únicamente 219 Kg (nuevamente, un ahorro del 50%).

Dicha cantidad consumida disminuye aún más, empleando combustibles con mayor contenido calórico que el carbón. La flexibilidad de intercambio de combustibles no impacta únicamente en el consumo de combustible, también en la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) generado. El índice de emisión de CO₂ (Kilogramos de CO₂ producido por Kilowatt-hora generado) es, por ejemplo cerca de 1 para el carbón comparado con 0.5 del gas natural.

En comparación con sistemas avanzados de baterías Li-Ion, algunos tipos de SOFC tienen también densidades energéticas anticipadas mayores (Evans *et al.*, 2009). De hecho, se calcula que una computadora portátil operaría por tiempos de cuatro a cinco veces más largos con una micro-SOFC. Además, las SOFC no sufren de los tiempos muertos inevitables en las baterías durante el proceso de recarga.

Desventajas asociadas a la temperatura de operación en celdas de combustible de óxido sólido

La operación a alta temperatura de las SOFCs, que por un lado otorga a estos dispositivos flexibilidad en el procesamiento de combustibles, tiene algunas desventajas asociadas. Una de ellas es el requerimiento de empleo de materiales avanzados para la fabricación de los componentes. Primero, las aleaciones metálicas mejor calificadas para operación a alta temperatura son costosas y, por ello, inconvenientes para la comercialización de esta tecnología. Debido a esto, la selección de materiales se reduce a un puñado de cerámicos (para los componentes principales de la celda) cuyo costo es comparativamente menor, y al empleo de aleaciones metálicas más económicas (para los componentes secundarios) algunas de ellas diseñadas específicamente para esta aplicación (como el CroFer 22 APU, desarrollado en el centro de investigación Jülich).

Por otro lado, la implementación de materiales cerámicos tiene consecuencias sobre las propiedades mecánicas del sistema, ya que dichos materiales suelen ser quebradizos y, en general, malos conductores del calor. Esto impone restricciones

importantes en el diseño y operación de las celdas.

En esta dirección, aparece en escena uno de los parámetros que ha ejercido mayor influencia negativa para la comercialización: el famoso “tiempo de arranque” (tiempo de precalentamiento). Al inicio de cada ciclo de trabajo, la celda requiere un precalentamiento hasta la temperatura de operación. Además del gasto térmico que esto implica, dicho proceso debe ser efectuado lentamente para evitar someter los componentes cerámicos a gradientes térmicos tales que generen fracturas. Debido a ello, los tiempos de precalentamiento pueden extenderse (por ejemplo, hasta 60 minutos para calentar a 750°C en algunas unidades estacionarias (Xin, 2006). De hecho, este es uno de los factores principales que ha limitado la implementación de este tipo de sistemas en la industria automotriz (otro es la alta temperatura de operación). Al ser excluidas del mercado automotriz, sus posibilidades de aplicación comercial se reducen enormemente.

Finalmente y en cualquier caso, las propiedades mecánicas de los materiales se

degradan con la temperatura, y la probabilidad de contaminación por reacciones entre los distintos componentes aumenta. El resultado es eventualmente una reducción del tiempo de vida útil.

Panorama Mundial de las Celdas de Combustible de Óxido Sólido

Hasta el 2007 (Crawley, 2007) la mayoría de la investigación y desarrollo efectuados en SOFCs estaba repartido entre Estados Unidos y Europa. Desde entonces, Japón se ha consolidado como un competidor fuerte, contribuyendo con desarrollos impresionantes, particularmente en el área de celdas microtubulares (ver sección 6.2).

El trabajo en este campo se ha efectuado en esencia dentro de grupos multi-institucionales (*Japan National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* [AIST], 2009; *Forschungszentrum Jülich GMBH* [FZJ], 2005; FZJ, 2006; *Solid State Energy Conversion Alliance of the United States Department of Energy* [SECA], 2010). Por ejemplo, en Estados Unidos, la Alianza de Conversión en Estado Sólido de Energía (SECA) del Departamento de Energía (DOE) coordina las actividades en SOFCs. Dicha alianza está formada por el gobierno y la industria, pero su operación se sustenta en la

investigación efectuada por las universidades. Sus objetivos principales son la reducción del costo de las celdas de combustible y el desarrollo de sistemas de celdas de combustible con gasificación integrada empleando carbón (SECA, 2010). El uso de carbón reduciría la dependencia que tiene Estados Unidos de petróleo y gas natural importado, además de que es un recurso primario para ellos (SECA, 2010). Los estadounidenses están trabajando en la refinación y validación de módulos de SOFC de 3 a 10 KW principalmente para aplicaciones estacionarias. Sin embargo, también consideran Unidades de Potencia Auxiliar (APU) para vehículos pesados y otras aplicaciones especializadas para el ejército (SECA, 2010).

En Europa, la industria de celdas de combustible colabora con varias instituciones de investigación en el desarrollo de proyectos de gran escala como el Real-SOFC (FZJ, 2005; FZJ, 2006). Específicamente, se busca encontrar una solución al problema de envejecimiento en SOFCs planas y poder asegurar una operación de 40,000 a 150,000 h (esto es, una degradación de celda menor al 0.5% por cada 1000 h) (FZJ, 2006). Paralelamente, se trabaja sobre el desarrollo de materiales más eficientes y baratos así como en la optimización del proceso de manufactura de las celdas (FZJ, 2005; FZJ 2006). Como nota interesante, el Centro de

Investigación Jülich alcanzó ya un tiempo de operación de 15000 h con un módulo de prueba de SOFCs planas. La degradación observada es $< (1\%/1000 h)$ y la densidad de potencia es de $400 mW/cm^2$ a $700^\circ C$ (Xin, 2006).

Micro-SOFCs: la esperanza para ingresar al mercado de aplicaciones portátiles o unidades de potencia auxiliar (APU).

Como se puede extrapolar de la información proporcionada en la sección 4, las SOFC convencionales no han podido cumplir dos requisitos principales para su introducción en el mercado de aplicaciones portátiles: baja temperatura de operación y tiempos de arranque rápidos. Sin embargo, una reducción considerable de tamaño y cambios en la geometría les han ayudado a recobrar la viabilidad de comercialización. Estos sistemas se conocen como Micro-SOFCs. Los módulos de Micro-SOFCs generan potencias suficientes (1 a 20 W) y su tamaño y peso son adecuados para empleo en aplicaciones portátiles (Evans *et al.*, 2009).

Micro-SOFC planas

Se han llegado a fabricar celdas tan pequeñas cuyo espesor es de no más de $1 \mu m$ y con un

diámetro de no más de $100 \mu m$ (Evans *et al.*, 2009). Dichas dimensiones facilitan la reducción de la temperatura de operación y, simultáneamente, permiten lograr tiempos de arranque más cortos. Temperaturas de operación todavía más reducidas se pueden alcanzar empleando materiales catódicos avanzados. Esto ha llevado a la obtención de densidades de potencia razonables como $150 mW/cm^2$ a $550^\circ C$ (Evans *et al.*, 2009). El diseño en cuestión considera además todos los periféricos requeridos para la operación del módulo (como el reformador para procesar butano hasta gas de síntesis, aislamiento térmico y un intercambiador de calor para las corrientes de entrada y salida de gases (Evans *et al.*, 2009)).

Micro-SOFC tubulares

De los dos tipos de micro-SOFC existentes, son las tubulares las que tienen más posibilidades de encontrar un lugar en el mercado de aplicaciones portátiles. Gracias a su geometría tubular y tamaño, soportan mejor los gradientes de temperatura y, con ello, logran tiempos de arranque mucho más cortos. Además, no presentan los problemas de sellado tan críticos que presentan las celdas planas. Esto se debe a que la geometría tubular permite un mejor acoplamiento entre celdas y con los elementos estructurales del módulo que las soporta. Además de una

separación natural de las corrientes de combustible y oxígeno/aire. De hecho, la implementación de materiales para sellado es una de las problemáticas fuertes en sistemas de celdas planas.

Japón ha logrado desarrollos impresionantes en el campo de SOFC microtubulares. Por ejemplo, reporta módulos del tamaño de un cubo de azúcar (1 cm^3) alcanzando densidades de potencia de 2 W/cm^3 a 550°C (AIST, 2009; *Renewable Energy Focus*, 2009). El módulo “cubo de azúcar” está compuesto de celdas microtubulares con diámetros de 0.8 a 2 mm (*Renewable Energy Focus*, 2009). El diseño del módulo y la microestructura del cátodo están optimizados para que el aire fluya por convección natural, reduciendo así costos de operación.

Retos

La apertura del camino hacia la comercialización de las SOFCs depende esencialmente del desarrollo de dicha tecnología en cumplimiento de los siguientes objetivos:

- Reducción de los costos de fabricación.
- Reducción de los costos de operación.

- Mejoramiento del desempeño de las celdas.
- Extensión del tiempo de vida útil.

Asociados, hay una serie de requerimientos específicos que han sido identificados como clave para lograr los objetivos propuestos. Dichos requerimientos se presentan a continuación, a riesgo (o beneficio) de introducir algunos detalles más técnicos.

- a) *Implementación de nuevos procesos de manufactura.* Un porcentaje significativo del costo de las celdas reside en el proceso de fabricación. Los componentes principales se acoplan entre sí en forma de películas con espesores en el rango de micrómetros a algunos milímetros. Hoy en día, se emplean procesos tecnológicamente avanzados y, por ende, costosos.
- b) *Reducción de la temperatura de operación de las celdas.* Esto ayuda a inhibir la contaminación generada por el transporte de los materiales que conforman los electrodos hacia el electrolito. De esta manera se incrementa el desempeño y tiempo de vida útil de las celdas (Suzuki, Hasank, Funahashi, Yamaguchi, Fujishiro y Awano, 2009). Adicionalmente, se reducen los tiempos de arranque y se logra

alcanzar una temperatura exterior del dispositivo acorde con la requerida para aplicaciones portátiles (35°C, por ejemplo) (Evans *et al.*, 2009). Por otra parte, permite emplear materiales más económicos para los componentes estructurales de las celdas. El reto consiste en desarrollar materiales catódicos avanzados puesto que el desempeño de los cátodos convencionales sufre significativamente al reducir la temperatura. De hecho, es el cátodo el que limita hoy en día la operación a temperaturas más bajas (Evans *et al.*, 2009; FZJ, 2008; SECA, 2010).

- c) *Implementación de materiales avanzados para el ánodo.* Los ánodos convencionales no presentan la resistencia deseada al ataque de contaminantes presentes en los combustibles procesados (como el azufre) (FZJ, 2007; SECA, 2010). Se requiere también incrementar la resistencia a la “coquización” (bloqueo del ánodo por formación de depósitos de carbón (*Innovations Reports*, 2009)) y al ciclado-RedOx (Sarantaridis y Atkinson, 2007). Este último se refiere específicamente al cambio irreversible en la microestructura de los ánodos convencionales de níquel, ocurrido durante los ciclos de

arranque/interrupción de la operación.

- d) *Reducción del tamaño y peso de las celdas (y de los dispositivos acoplados):* requerimiento especialmente importante para aplicaciones portátiles (CellTech, 2008) (ver sección 6) o unidades de Potencia Auxiliar (APU). Aún para aplicaciones estacionarias, la reducción del tamaño implica una reducción en los costos de fabricación.
- e) *Implementación de nuevos materiales para interconectores y colectores.* Estos elementos deben estar fabricados de materiales que no contaminen los electrodos durante la operación. Un ejemplo típico es el envenenamiento de los cátodos convencionales de manganita con el cromo proveniente de los interconectores metálicos.
- f) *Desarrollo de materiales avanzados para pastas de contacto.* Estas pastas disminuyen la resistencia de contacto entre electrodos e interconectores. Los materiales deben ser de bajo costo, estables y compatibles con la temperatura de procesamiento de los materiales usados para sellar (SECA, 2010).
- g) *Mejoramiento del diseño e implementación de nuevos materiales*

para sellar los módulos de SOFC. Requerimiento especialmente importante para módulos de celdas planas (ver sección 6.2). Un sellado adecuado de las celdas permite incrementar el desempeño y tiempo de vida útil. Los materiales de sellado deben presentar baja volatilidad, alta resistividad eléctrica y un coeficiente de expansión térmica similar al del resto de los componentes (SECA, 2010).

- h) *Desarrollo de métodos para la evaluación acelerada del desempeño de las celdas* (SECA, 2010). Fundamentalmente, se requiere evaluar la operación durante más de 10000 h, más de 100 ciclos térmicos (arranque-interrupción) y también determinar la influencia de la composición del combustible (FZJ, 2006).

Aporte nanotecnológico: un ejemplo práctico

El empleo de nanotecnología para la fabricación de los cerámicos componentes de las SOFCs, puede inclinar la balanza a favor de estas en su progreso hacia el mercado. Esto se debe a que el desempeño de algunos materiales, en relación a su microestructura, puede presentar cambios inesperados cuando

se trabaja en nanoescalas. Por ejemplo, en el caso de un electrolito policristalino, la conductividad iónica del material disminuye al reducir el tamaño de los dominios cristalinos (regiones con la misma orientación cristalina). La razón es el incremento del número de fronteras de grano (fronteras entre regiones cristalinas) que son zonas de menor conductividad. Sin embargo, la dependencia “conductividad iónica” vs. “tamaño de grano” se vuelve inesperadamente opuesta cuando este último se reduce hasta dimensiones nanométricas. De esta manera, materiales nanoestructurados como la zirconia estabilizada con itria o basados en ceria han demostrado un incremento significativo en la conductividad iónica respecto a sus hermanos microestructurados (Zhu, 2009).

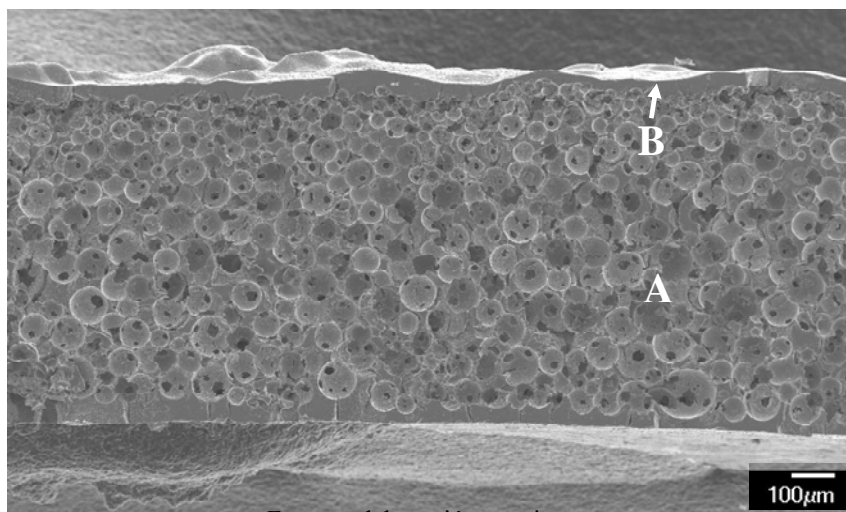
El procesamiento de los componentes cerámicos de las celdas se ve también favorecido con el empleo de nanotecnología. Por ejemplo, las temperaturas requeridas para la sinterización de electrodos/electrolito fabricados a base de nanopartículas, son significativamente menores que cuando se fabrican a partir de micropartículas. El beneficio no radica únicamente en la reducción de costos de fabricación, sino también en la funcionalidad resultante de los materiales procesados: el tratamiento térmico a menor temperatura alarga su tiempo de vida útil.

En esta dirección, el autor de este artículo tuvo la oportunidad de participar en un proyecto innovativo de fabricación de celdas SOFC basado en técnicas electroforéticas, en el Departamento de Tecnología de Polvos para Vidrios y Cerámicos de la Universidad de Saarland, Alemania (www.uni-saarland.de/fak8/powdertech). El proceso desarrollado inicia con la fabricación por sedimentación reactiva de una plantilla de cristales coloidales compuesta de microesferas poliméricas. La plantilla es posteriormente impregnada con una mezcla de nanopartículas cerámicas para conformar el ánodo. En un segundo paso, se deposita una película de nanopartículas de electrolito sólido. Ambos procesos se llevan a cabo en suspensión acuosa y asistidos por campo eléctrico (impregnación electroforética y depositación electroforética). Posteriormente,

la plantilla se piroliza en un horno y el sustrato cerámico se sinteriza. Como resultado se obtiene un sistema bicapa ánodo-poroso + electrolito-sólido-denso, ambos con espesor controlado. Una de las ventajas de este proceso es la generación, en un solo paso, de un ánodo con porosidad funcional (el tamaño de poro disminuye estadísticamente hacia la zona adyacente al electrolito sólido, tal como es requerido). La Figura 2 muestra una micrografía del cuerpo cerámico así fabricado.

Dicho proceso, por su bajo costo, facilidad de implementación, bajos tiempos de procesamiento y compatibilidad ambiental, resulta una interesante opción para una fabricación más económica de celdas de combustible de óxido sólido.

Figura 2. Micrografía SEM mostrando el corte transversal de un sistema electrodo-poroso (A) / electrolito-denso (B) fabricado mediante técnicas electroforéticas y plantillas de cristales coloidales



Fuente: elaboración propia.

Notas: Los poros esféricos se encuentran completamente interconectados y el tamaño de poro disminuye estadísticamente hacia la zona del electrolito. El electrodo poroso está constituido por una mezcla 50%-50% de zirconia estabilizada con itria (8YSZ) y óxido de níquel. El electrolito consiste únicamente de 8YSZ.

Conclusiones

El campo de las SOFCs lleva ya algunos años bajo intenso desarrollo. Sin embargo, los problemas que dificultan la comercialización de esta tecnología no han sido resueltos aún. En cualquier caso, las posibilidades o caminos que se pueden tomar en esta dirección son todavía vastos: “queda todavía mucho hilo en la madeja”. La pregunta es: ¿continuarán los gobiernos, instituciones y empresarios invirtiendo en una tecnología que quizá necesite todavía algunos años más para poder emerger exitosamente, o simplemente dejarán “caer la toalla”?

Sea cual sea la respuesta, nosotros, ya sea como investigadores o políticos, profesores, padres de familia o ciudadanos, tenemos en nuestras manos la posibilidad de contribuir a la solución del problema energético que se aproxima. Esto es, concientizándonos y moderando el empleo de los recursos que hoy todavía tenemos pero que en un futuro ya no estarán más. Finalmente.... ¿qué mundo le queremos dejar a nuestros hijos?

Bibliografía

Evans, A., A. Bieberle-Hütter, H. Galinski, H. Rupp, J.L.M., T. Ryll, B. Scherrer, R. Tölke y L. J. Gauckler (2009), “Micro-Solid Oxide Fuel Cells: Status, Challenges, and Chances”, *Monatshefte für Chemie*, 140 (9), pp. 975-983.

Sarantaridis, D. y A. Atkinson (2007), “Redox Cycling of Ni-Based Solid Oxide Fuel Cell Anodes: a Review”, *Fuel Cells*, 07 (3), pp. 246-258.

Singhal, S. C. y K. Kendall (Eds.) (2004), *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*. New York: Elsevier Ltd.

Suzuki, T., Z. Hasank, Y. Funahashi, T. Yamaguchi, Y. Fujishiro y M. Awano (2009, Agosto 14), “Impact of Anode Microstructure on Solid Oxide Fuel Cells”, *Science*. 325, pp. 852-854.

Zhu, B. (2009), “Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) Technical Challenges and Solutions from Nano-Aspects”, *International Journal of Energy Research*. 33, pp. 1126-1137.

Referencias electrónicas

CellTech (2008), *CellTech Power's Liquid Tin Anode SOFC (LTA-SOFC)*. Disponible en: http://fcse.confex.com/data/extendedabstract/fcse/2008/Paper_1874_extendedabstract_271_0.pdf

Crawley, G. (2007), Opening Doors to Fuel Cell Commercialization: Solid Oxide fuel Cells (SOFC). *Fuel Cell Today*. Disponible en: http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/archive/Article_1153_SOFC%202007.pdf

Forschungszentrum Jülich GmbH - FZJ. (2005), *Real-SOFC Executive Summary*. Disponible en: http://www.real-sofc.org/datapool/page/347/Y1_final.pdf

Forschungszentrum Jülich GmbH - FZJ. (2006), *Real-SOFC Executive Summary (publishable)*. Disponible en: http://www.real-sofc.org/datapool/page/347/Y2_final.pdf

Forschungszentrum Jülich GmbH - FZJ. (2007). *Real-SOFC Publishable Executive Summary M25-M36*. Disponible en: <http://www.real-sofc.org/download/progress-reports>

Forschungszentrum Jülich GmbH - FZJ. (2008), *Real-SOFC Publishable Executive Summary M37-M48*. Disponible en: <http://www.real-sofc.org/download/progress-reports>

Innovations Reports (2009, Octubre 5), *New Material May Expand Uses for Solid Oxide Fuel Cells*. Disponible en: http://www.innovations-report.de/html/berichte/materialwissenschaften/material_expand_solid_oxide_fuel_cells_140986.html

Japan National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), (2009, Septiembre 10). *Microtubular Solid Oxide Fuel Cells Integrated Compact Modules Operable at Low Temperatures*. Disponible en: http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2009/20091204/20091204.html

Renewable Energy Focus (2009, Marzo 9), AIST, NGK Report on Solid Oxide Fuel Cell Module the Size of a Sugar Cube. Disponible en: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/2961/aist-ngk-report-on-solid-oxide-fuel-cell-module-the-size-of-a-sugar-cube/>

Solid State Energy Conversion Alliance of the United States Department of Energy - SECA. (2010). *SECA/Fuel Cells Accomplishments Summary*. Disponible en: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/index.html>

Xin, C. (2006). *Stage Report on Planar SOFC Snack*. Union Research Center of Fuel Cell on Coal Gasification. Disponible en: <http://www.sofc.org.cn/media/06%E5%B9%B4%E8%AE%B2%E5%BA%A7/061114%E9%99%88%E9%91%AB.pdf>

Páginas electrónicas

Coal. (2009). En *Wikipedia*. Consultada en Octubre 10, 2009, de <http://en.wikipedia.org>