

Infraestructura de uso de hidrógeno y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso

Ulises Cano Castillo
Leonardo Rejón García
Mirna Ojeda Hernández

Mientras no exista una alta demanda de sistemas nuevos como aquéllos basados en celdas de combustible, sus precios iniciales seguirán siendo altos, pues no existe una producción masiva de éstos.

Introducción

Hoy en día, existen en el mundo muchos productos para la generación “personal” de energía eléctrica, como las baterías y las máquinas de combustión interna. Estos productos, particularmente los dos mencionados, han desarrollado y establecido la infraestructura requerida para su fabricación, su distribución y uso comercial, además de que están cotizadas de acuerdo con su aplicación y por ello se encuentran plenamente disponibles para el usuario.

Sin embargo, existen desventajas en estos productos tradicionales que giran en torno a sus limitaciones prácticas y a su relación con el ambiente. Las celdas de combustible son capaces de aumentar los aspectos positivos de estos

productos en muchas de sus aplicaciones, así como de resolver los retos prácticos y ambientales, pero aún enfrentan retos relacionados con el costo inicial y la infraestructura requerida para su uso.

Tradicionalmente el desarrollo de las celdas de combustible había sido dirigido a sistemas con alta confiabilidad pero también con un alto costo, tal es el caso de las misiones espaciales de la National Aeronautics Space Administration (NASA), en donde el desempeño es de mayor importancia y el costo no es prioritario. Como consecuencia de esto, los diseños realizados, los materiales empleados y los sistemas de control desarrollados han reflejado esta situación y, en muchos casos, tales sistemas han sido sobre-diseñados para aplicaciones comerciales que son sensibles al costo. Y es que en el mundo “terrenal” la competitividad en costos y el desempeño de una tecnología de generación de energía eléctrica es cada día más importante, particularmente si el alto desempeño es evaluado también por su relación con el ambiente y su protección, así como con el óptimo uso de las fuentes primarias de energía.

Es importante comentar que



pareciera un círculo vicioso el hecho de que mientras no exista una alta demanda de sistemas nuevos como aquéllos basados en celdas de combustible, sus precios iniciales seguirán siendo altos, pues no existe una producción masiva de éstos. El aliciente actual es el gran número de beneficios y ventajas que ofrecen las celdas de combustible, lo que sigue ubicándolas como la tecnología que habrá de reinar en este siglo y quizá en los que le sigan.

Infraestructura

Existen dos aspectos que son los más importantes obstáculos a salvar antes de poder tener un uso extendido de aplicaciones basadas en tecnología de celdas de combustible: sus costos iniciales y la infraestructura requerida para dicho uso. El primer aspecto se encuentra relacionado directamente con el costo en la fabricación de las celdas y los sistemas que integran las aplicaciones específicamente. En el caso de la infraestructura requerida, es claro que la disponibilidad del combustible a usarse, idealmente hidrógeno, no ha tenido un desarrollo extendido quizá principalmente porque no se había requerido en esta sociedad basada en el uso de combustibles fósiles.

Tabla 1. Aplicaciones de celdas de combustible de acuerdo al tipo de celda.

Potencia	Tipo de aplicación	Ejemplos	Tipo de celda*
< 1kW	Básica estacionaria y portátil	Iluminación, refrigeración, bombeo, radio comunicación, telefonía celular,	PEM
1kW – 10kW	Estacionaria	Uso residencial, estaciones de trabajo y computadoras personales, UPS, equipo digital	PEM / SOFC
10kW – 250kW	Estacionaria (generación distribuida) y transporte	Pequeñas comunidades, uso comercial como oficinas, bancos y hospitales, autos y autobuses	PAFC / PEM / SOFC
250kW – 1MW	Estacionaria (generación distribuida)	Residencial, comercial, industrial	SOFC / MCFC
> 1MW	Estacionaria (gen. dist. y centralizada)	Cualquier uso	SOFC / MCFC

* PEM = Celda de Membrana de Intercambio Protónico (80 °C)
 PAFC = Celda de Ácido Fosfórico (200 °C)
 MCFC = Celda de Carbonatos Fundidos (600 °C)
 SOFC = Celda de Óxido Sólido (1000 °C)

Esta disponibilidad incluye la producción del hidrógeno, su almacenamiento y su distribución, además de otros factores asociados a ello, como aspectos de seguridad y normatividad para su uso. Sin embargo, es en este terreno en el que la tecnología está en mayor ventaja para la producción de hidrógeno, en especial, en aspectos ligados a la seguridad en su empleo. A lo que se debe que este gas ha sido usado en muchas industrias, como la del petróleo en el hidrotreamiento de aceites pesados; también ha sido usado en el sector eléctrico como refrigerante de turbinas; en la industria metalúrgica para el tratamiento en la fabricación de aleaciones y hasta en la industria alimenticia por ejemplo en la hidrogenación de aceites.

Durante la primera mitad del siglo XX todo el gas de uso doméstico que se suministraba a un gran número de ciudades alemanas

contenía más del 50 % de hidrógeno. Incluso en años recientes (1992), todavía unos 3 billones de metros cúbicos de este gas continuaban usándose en casas privadas y en pequeños sectores industriales. De igual modo en los Estados Unidos, alrededor de 400 ciudades utilizaron hidrógeno para cocinar, para iluminación y calefacción, hasta que las líneas del gas se utilizaron para el suministro de gas natural.

Desde luego que esta experiencia también ha sido enriquecida por su uso en la industria aeroespacial, particularmente en lo referente con la seguridad en el manejo del gas (NASA, 1997). Debe mencionarse que la clave del éxito de este uso y la experiencia práctica adquirida radica principalmente en el hecho de que en estas industrias la producción del gas es realizada en el sitio donde habrá de consumirse y por lo tanto los requerimientos de

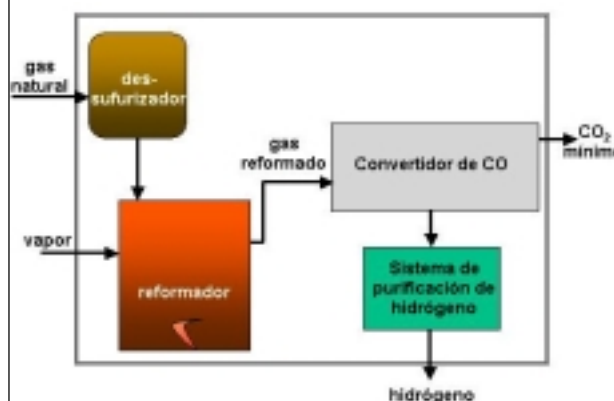
almacenamiento y sistemas de distribución son mínimos.

La manera más empleada de producir hidrógeno a escala industrial y, por lo tanto, comercial (Cano et al., 2000) es mediante la reformación de gas natural con vapor de agua en presencia de catalizadores. (Ver Tabla 2 y Figura 1). En este sentido, México puede beneficiarse abundantemente debido a la enorme infraestructura relacionada con ese hidrocarburo. Además, las mayores inversiones de Pemex están dirigidas a la mayor producción de gas natural mientras que el gobierno tiene, desde hace algunos años, un programa de expansión del sistema de distribución de ese gas en el territorio nacional. Estos factores podrían incluso convertir a esta entidad en un actor importante dentro de un escenario económico cuya estrategia energética haga uso del hidrógeno. Pemex es también una de las empresas con mayor experiencia en el manejo de los llamados reformadores de gas natural y ya existen para las plantas refinadoras mexicanas, propuestas para el aprovechamiento del hidrógeno en el uso en celdas de combustible (Rivero, 2000). Estos estudios calculan aproximadamente unos 3.7 millones de metros cúbicos de hidrógeno que en las seis plantas refinadoras del país que podrían ser recuperados diariamente.

Además, esta alternativa de generación de hidrógeno resolvería muchos otros problemas asociados a la industria mexicana del petróleo, como lo es el aprovechamiento de un gas que normalmente no es almacenado, por ejemplo el gas natural, y que en muchas ocasiones es quemado para evitar emitirlo al ambiente al tratarse de un gas tipo invernadero (metano). Esto último se logra de manera parcial ya que la emisión continúa, pero en forma de

Tabla 2. Métodos de producción de hidrógeno.*Proceso de producción de H₂ Estado de desarrollo*

Reformación de gas natural	Comercial (alta eficiencia y económico)
Oxidación parcial de hidrocarburos	Comercial (baja eficiencia, económico)
Gasificación de carbón	Comercial (sucio)
Electrólisis del agua	Comercial (muy eficiente, es caro)
Ciclos termoquímicos puros	Investigación y desarrollo
Ciclos termoquímicos híbridos	Investigación y desarrollo
Procesos electrocatalíticos	Investigación y desarrollo
Procesos fotoelectroquímicos	Investigación y desarrollo
Procesos fotobiológicos	Investigación y desarrollo

Figura 1. Diagrama de bloques simplificado de la producción de hidrógeno vía reformación de gas natural.

gases como bióxido de carbono y óxidos de azufre.

Ya sea aprovechando el hidrógeno de refinadoras o directamente de gas natural producido, existe en México la posibilidad de una muy alta producción de hidrógeno.

Con todo y la experiencia ya mencionada, algunas aplicaciones requieren de sistemas de almacenamiento como respaldo (tal es el caso del transporte) y de un uso más amplio de las celdas de combustible, habrá de requerir del desarrollo de puntos de producción de hidrógeno más distribuidos y de menor capacidad a los tradicionalmente utilizados en la industria, así como de puntos distribuidos para abastecimiento del combustible.

Luego entonces, es evidente que debe promoverse el desarrollo de parte de la infraestructura en torno al uso del hidrógeno, para así alentar el uso de aplicaciones basadas en celdas de combustible; sobre todo producción de capacidades menores, grandes sistemas de distribución de gas natural y otros pequeños para distribución de hidrógeno; al igual que sistemas de almacenamiento menos costosos a los tradicionales de

compresión o licuefacción (Padró, 1999).

Materiales en las celdas de combustible tipo PEM

Otro aspecto relevante que puede influir en el pronto uso de las celdas de combustible es el costo inicial de éstas. Esto es muy relevante para el tipo de celda de membrana, ya que se vislumbra como aquella con mayor potencial para entrar a ciertos mercados antes que otro tipo de celdas. Este tipo de celda es también el de mayor costo inicial por el tipo de materiales que emplea.

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico o de electrolito de membrana polimérica (PEM por sus siglas en inglés) han atraído la mayor de las atenciones en el desarrollo de tecnologías basadas en la generación de energía eléctrica de celdas de combustible. De los varios sistemas de celdas de combustible considerados, las celdas PEM (Figura 2) parecen ser las más adecuadas para aplicaciones de transporte terrestre, energía portátil y sistemas de generación de tipo residencial (Tabla 1). Todo esto es gracias a varias de sus características, como su baja temperatura de

operación (^a 80 °C) y, por lo tanto, su rápido tiempo de arranque en frío; perfecta tolerancia de su electrolito a gas CO₂ y la combinación de una alta densidad de potencia y una alta eficiencia de conversión de energía. El componente que le da el nombre a este tipo de celda es típicamente un polímero intercambiador de protones, con baja permeabilidad de los gases reactantes de esta celda: hidrógeno y oxígeno.

Las barreras más importantes para el avance rápido de la tecnología de celdas de combustible, particularmente para las aplicaciones anteriormente descritas, han sido exitosamente superadas. Como resultado de esto, las industrias de manufactura de celdas de combustible y de automóviles han iniciado importantísimos programas de validación tecnológica desde finales de los años noventa, incluyendo vehículos dotados de celdas de combustible como generador, sistemas de generación de potencia estacionario y dispositivos para el reemplazo de baterías. Puesto que el factor económico juega un papel importante, el reducir costos asociados a los materiales empleados y mantener un aceptable desempeño, es la razón por la que el desarrollo de

materiales es un reto de aspectos técnicos que requiere de soluciones creativas.

Descripción general de la celda PEM

Los componentes básicos de una celda de combustible tipo PEM pueden ser resumidos como: dos electrodos impregnados con electrocatalizador (típicamente platino), la membrana conductora de protones y finalmente las placas colectoras de corriente. En realidad estos componentes, además de tener más de una función, tienen un gran contenido de ingeniería de diseño y de manufactura, sin ellos, el alto desempeño práctico que hoy presentan no se hubiese alcanzado.

La Figura 2 es un diagrama de una celda tipo PEM, en donde se muestra un ensamble de los electrodos (ánodo y cátodo) y un electrólito. El corazón de la celda es el llamado ensamble electrodo-membrana o MEA (Membrane Electrode Assembly). En su forma más simple, el electrodo de este ensamble es una capa delgada de unos 5 a 50mm de espesor, el cual contiene

un catalizador de Pt disperso en él. Esta capa catalizadora está en íntimo contacto con una membrana ionomérica, la cual sirve como electrólito y como separador de los gases reactantes y de los electrodos de la celda. La acción del electrocatalizador es quizás una de los más importantes ya que sin él no habría ninguna reacción electroquímica. El electrocatalizador tiene como función esencial promover la oxidación del hidrógeno en el ánodo (Figura 3) y la reducción de oxígeno en el cátodo de la celda. Así, un MEA consiste de una membrana ionomérica con capas delgadas de catalizador a cada lado de ella (superficies mayores), con una estructura de una celda electroquímica, electrodo/electrólito/ electrodo empacada en la forma de un emparedado de tres capas.

Membrana intercambiadora de protones

La membrana polimérica conductora de protones es quizás el elemento más especial de las celdas PEM. Ésta tiene como función el transporte de carga iónica en el circuito de la celda electroquímica formada. Es el equivalente al ácido sulfúrico de las baterías automotrices,

con la ventaja de no ser corrosiva, ser sólida y de fácil manejo; además, tiene otras funciones como la separación de los gases combustible y oxidante y aislar eléctricamente a los dos electrodos.

Una característica importante de este material es el hecho de que la membrana debe encontrarse humidificada al punto de saturación para ofrecer las mejores características de conducción protónica. Al inicio debe ser tratada químicamente para sulfonar al polímero, ya que son los grupos sulfónicos los encargados de intercambiar los protones dentro de la membrana.

En los recientes desarrollos tecnológicos de celdas PEM, la membrana utilizada comúnmente es hecha de un ionómero de ácido sulfónico de perfluorocarbono. El material más conocido comercialmente de este tipo de membrana es la Nafion[®] fabricada por DuPont. Esta membrana es de un espesor de entre 50 y 175 μ m pero es un material costoso y son pocas las compañías que pueden ofrecer un producto con las características requeridas por este componente. Otra compañía, Dow Chemical tiene su propia versión de esta membrana, la

Figura 2. Componentes básicos de una celda de combustible tipo PEM.

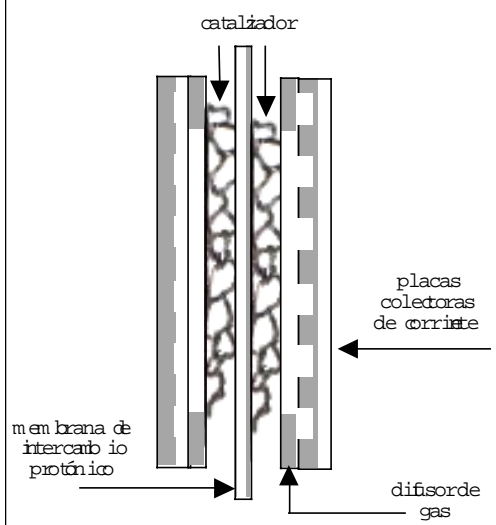
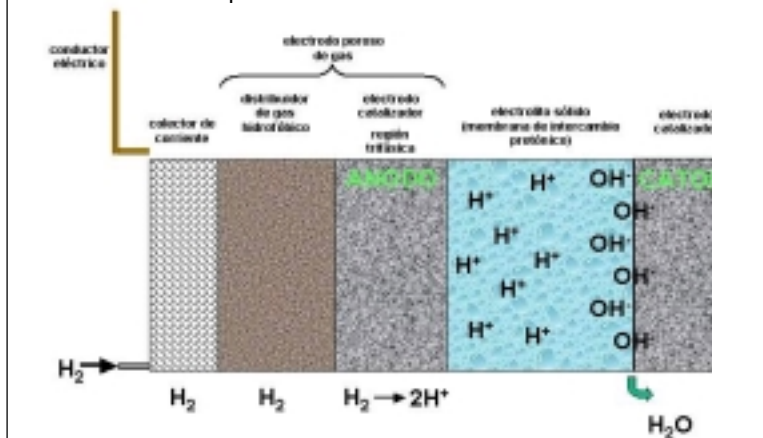


Figura 3. Recorrido del hidrógeno en una celda PEM, a través de sus diferentes componentes.



XUS 13204.10, reportada como con peso equivalente menor que la Nafion y distancias anion-anion menores, lo que le permite a Dow proveer membranas de hasta 2 milésimas de pulgada de espesor.

Existen grandes esfuerzos por tener la posibilidad de fabricar estas membrana a menores costos o bien mejorar el desempeño de éstas, pues lo que se busca es poder operar a temperaturas superiores a los 80 °C sin que las membranas sufran deterioro. Otro aspecto interesante por mejorar es la posibilidad de tener una membrana que no sea permeable al metanol, uno de los combustibles que pueden ser directamente oxidados en el ánodo de una celda PEM y que podría significar la solución para muchos de los retos relacionados con la infraestructura mencionada en la primera sección de este trabajo. Materiales similares están siendo desarrollados en varios laboratorios, entre ellos el de Ballard Advanced Materials Corporation donde se trabaja usando trifluoroestireno, un material más económico (Wilkinson et al., 1997). El Instituto de Materiales de la UNAM se encuentra muy activo en el desarrollo de polielectrolitos perfluorados tipo Nafion e, incluso, membranas híbridas orgánicas/inorgánicas que podrían ofrecer muchas ventajas operativas para la celda de combustible (Lichatchev, 2001).

Difusor de gas

La capa contigua al electrocatalizador que se halla en contacto con la membrana es el difusor de gas, hecho de tejido de carbón o de papel carbón poroso, que es tratado con politetrafluoroetileno (PTFE) para hacerlo hidrofóbico del lado opuesto a la membrana. Esta capa difusora de gas puede llegar a tener espesores del orden de 100 a 300 μ m. La función

de estos componentes es la de permitir un acceso directo y uniforme de los gases reactantes a la región del catalizador sin que éstos se tengan que difundir a través de capas de agua líquida. El lado hidrofóbico impide el paso de agua líquida desde la membrana hacia el exterior del MEA lo cual podría provocar el taponamiento de los accesos del gas entrante. Otro efecto adicional negativo sería la pérdida excesiva de humedad en la membrana, que requiere estar saturada de agua para tener su máxima conductividad iónica. El difusor debe además ser un material altamente conductor y de fácil manejo para la fabricación de las celdas. Este componente, junto con los colectores de corriente, se halla a los lados de los MEA para formar una monocelda. Cuando varias monoceldas se encuentran acopladas en serie (arreglo más común) o paralelo forman una celda de combustible de potencia útil. En la práctica, varias monoceldas son acopladas para obtener el voltaje deseado para cada aplicación, ya que una monocelda genera únicamente alrededor de 0.7 V.

Placas colectoras de corriente con campos de flujo de gases

Una monocelda estará completa cuando se integren placas colectoras de corriente a un MEA. Las placas colectoras de corriente son precisamente quienes reúnen la corriente generada en todos los puntos de reacción a ambos lados de la membrana, es decir, en los electrodos y que es transferida mediante los difusores de gas. Las placas colectoras de corriente son maquinadas para contener canales o campos por donde fluyan los gases que deberán ser efectivamente distribuidos por los difusores de gas. Estas placas, tradicionalmente hechas

de grafito de alta densidad embebido en un material resinoso (Figura 4), operan en modo bipolar en monoceldas acopladas en serie en cuyo caso tendrán maquinadas ambas caras. Esta placa tendrá que ser, por lo tanto, impermeable a ambos gases, hidrógeno y oxígeno.

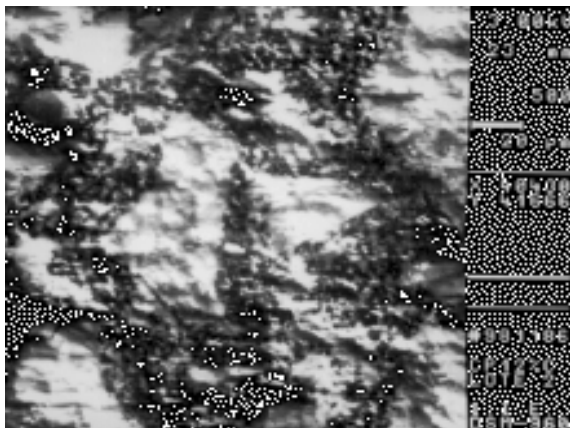
Este componente de la celda es generalmente caro por su fabricación e ingeniería. Sin embargo, los materiales empleados para su manufactura no son costosos y su desarrollo puede ser realizado en México si se invierten esfuerzos en ello. El IIE ha ya explorado la posibilidad de tal desarrollo (Cano y Rejón, 2001) y la Figura 4 muestra una micrografía de dicho material.

En la Tabla 3 se muestran las propiedades de tal material, en donde la conductividad puede ser fácilmente acrecentada uno o dos órdenes de magnitud, con el uso de mejores carbones para su preparación. Así, este componente debe ser altamente conductor, tener buenas propiedades mecánicas ya que es, en gran medida, la estructura soporte de la celda de combustible; pues tanto las membranas como los difusores de gases, son materiales flexibles y no pueden soportar peso ni esfuerzos de un arreglo de varias monoceldas. Además, este componente debe ser fácilmente maquinable para su manufactura y maquinado de campos de flujo de gases, o bien, tener propiedades adecuadas para su vaciado por moldeo. Aspectos relevantes para la producción en masa y comercialización de celdas tipo PEM.

Electrocatalizador

Volviendo a la parte central de la celda PEM, una capa de electrocatalizador se encuentra adyacente a cada lado de la superficie de la membrana. Este electrocatalizador, normalmente Pt, es

Figura 4. Microestructura del material compuesto conductor desarrollado por el IIE, de matriz de resina polimérica termofija, reforzada con C y material inerte.



aplicado en forma de suspensión, que consiste del propio metal, carbón de alta superficie específica y una solución de una versión soluble de la membrana (solución alcohólica). Este tipo de configuración consiste básicamente de Pt soportado en una estructura conductora de carbón (negro de humo de alta superficie específica, 220 cm²/gr), por ejemplo Pt/C. La mezcla es preparada mediante métodos usados en química coloidal, usando Pt de alrededor de 2 nm de diámetro y partículas de carbón de 10 nm de diámetro. Como se vio anteriormente, el Pt/C deberá estar íntimamente intermezclado con el ionómero ya curado, para proveer suficiente conductividad iónica (protónica) dentro de esta capa.

Así, la capa del electrocatalizador puede ser descrita como un material compósito Pt/C/ionómero, donde los tres componentes se encuentran uniformemente distribuidos dentro del volumen de dicha capa. Cada vez más se utiliza carbón de alta superficie específica en lugar de negro de carbón, el cual era anteriormente utilizado para la fabricación de celdas PEM, el primero puede proporcionar

un desempeño similar en la celda reduciendo la carga de Pt de veinte a cuarenta veces,

4mg Pt/cm² vs. 0.1mg Pt/cm² ó menor (Fuel Cell Handbook, 2000).

Sin embargo, el Pt es considerado como uno de los componentes caros de la celda, aunque avances en la ingeniería del diseño de los electrodos han permitido disminuir la carga del metal empleado, a valores de unas 40 veces, en comparación con los primeros diseños de electrodos que empleaban carbón. Con todo y esta baja en la carga de Pt, es deseable poder contar con alternativas de materiales menos costosos o más abundantes. Por ejemplo, una desventaja en el uso de Pt es su susceptibilidad a la presencia de CO, el cual es adsorbido en su superficie evitando que provea su acción catalizadora a los gases para la generación de electricidad. Es por ello que en celdas PEM, la calidad del hidrógeno alimentado debe mostrar bajos contenidos de CO, debajo de los 10 ppm. Es por esto que los desarrollos en electrocatalizadores se centran en la sustitución del Pt y en el mejor diseño de electrodos porosos de gas. En relación con lo primero, otros materiales electrocatalizadores de tamaño nanoparticulado, a partir de carbonilo o sales de metales de

Tabla 3. Comparación de algunas propiedades de placas colectoras de corriente.

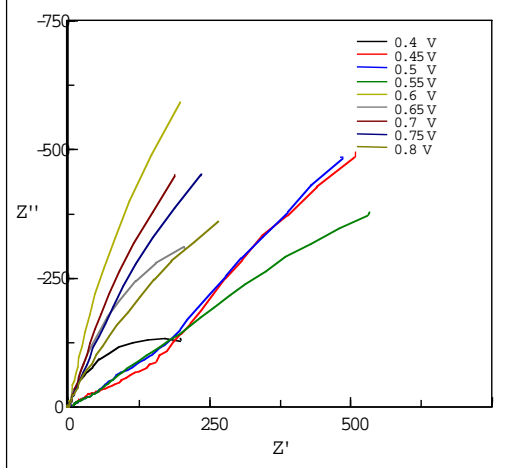
Propiedad	PEMTEX %	BMC®	IIE	EBONEX
Conductividad (S/cm)	85-96	45	0.07	1-5
Transición vítrea Tg (°C)	175-185	180	177-180	-
Esfuerzo a la flexión (psi)	3500-6500	7300	> 7300	

transición y calcogenuros, están siendo probados en México y se han obtenido muy buenos resultados que apuntan a la sustitución del Pt (Solorza, 2001).

Por otra parte, la celda deberá tener empaques o sellos que confinen cada compartimiento de la misma, para lo que se usan materiales como teflón o incluso la periferia de la propia membrana es aprovechada para ello. La descripción anteriormente hecha sobre los componentes elementales de una celda de combustible PEM, destaca los diferentes materiales involucrados y sus características únicas, requeridos para obtener un generador de energía eléctrica de alto desempeño, alta eficiencia de conversión energética y una operación estable duradera. En lo que se refiere a la ingeniería de la fabricación de los electrodos, en el IIE se ha explorado el uso de técnicas de impedancia (Figura 5) para la determinación de la contribución de la estructura porosa del electrodo al desempeño electroquímico y, por lo tanto, eficiencia del mismo (Ojeda et al., 2000).

Así, aun cuando la tecnología de celdas de combustible ha demostrado un atractivo desempeño (95% de disponibilidad de las celdas comercialmente más desarrolladas) y éxito comercial con

Figura 5. Espectros de impedancia electroquímica ayudan a estudiar diferencias estructurales de electrodos para celdas de combustible en el IIE.



unidades operando más de 49,000 horas, factores como el impulso al desarrollo de infraestructura para el uso del combustible hidrógeno y el desarrollo propio de celdas de combustible y sus componentes (Innovation Forecast of Fuel Cells, 1998), brindan una mejor plataforma para hacer realidad el deseo de tener una tecnología eficiente y limpia al alcance de nuestra sociedad. Las expectativas de muy bajas emisiones y altas eficiencias han sido ya demostradas en plantas de potencia y en algunas aplicaciones de celdas de combustible. La flexibilidad del combustible primario también ha sido demostrada con el uso de hidrógeno, gas natural, propano, gas de rellenos sanitarios, digestores anaeróbicos entre otros, con lo que se expande grandemente las oportunidades de mercado.

Tal vez sean los gobiernos quienes habrán de contribuir con los mayores esfuerzos iniciales en ambos rubros de desarrollo de infraestructura y tecnología propia para cada país, esto siempre en estrecha colaboración con instituciones de investigación y académicas.

Referencias

Cano, Ulises, Roberto Flores y Jaime Agredano. "Generación de Hidrógeno mediante energía Solar para un generador de Celda de Combustible", en Revisión Tecnológica: Un documento elaborado para la Secretaría de Energía, IIE México, marzo, 2000.

Cano Ulises, y L. Rejón, "A.C. and D.C. Measurements of Silica-Carbon-Reinforced Polymeric Current Collector Plates", Journal of New Materials for Electrochemical Systems, V.4, January, 2001, p. 37-40.

Fuel Cell Handbook. U.S. Department of Energy, Oficina de Energía Fósil, 5ta edición, octubre, 2000.

Innovation Forecast of Fuel Cells. Publicado por Georgia Tech Technology Policy & Assessment Center, abril, 1998.

Likhatchev, Dmitri. Conversación personal, Instituto de Investigación de Materiales, UNAM, 2001.

Ojeda, Mima y Ulises Cano, "Uso de impedancia Electroquímica para la caracterización estructural de electrodos porosos para Celdas de combustible", Segundo Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno, Cuernavaca, diciembre, 2000.

Padró, C.E.G. and V. Putsche. "Survey of the Economics of Hydrogen Technologies", National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-570-27079, septiembre, 1999.

Rivero, Ricardo. "Celdas de Combustible para generación eléctrica en las refinерías del futuro", Seminario Internacional de Celdas de Combustible para el Transporte, Instituto Mexicano del Petróleo, noviembre, 2000.

"Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems", Oficina de Aseguramiento de Misión y Seguridad de la Agencia Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA), NASA-TM-112540, 1997.

Solorza, Omar. Conversación personal, Departamento de Química, Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados, IPN, México, 2001.

Wilkinson, D. y A. Steck. "General Progress in the Research of Solid Polymer Fuel Cell Technology at Ballard", Memorias del

Segundo Simposio Internacional de Nuevos Materiales para Celdas de Combustible y Sistemas Modernos de Baterías, Montreal, Canadá, 1997.

Ulises Cano Castillo

Ingeniero Químico Metalúrgico por la UNAM (1988), posee el grado de doctor en Ciencia de Materiales, otorgado por el departamento de Materiales, de la Universidad de Oxford, Inglaterra (1995).

Fue contratado por el IIE desde 1988 en donde ha participado y dirigido proyectos relacionados con el deterioro y prevención de estructuras metálicas y la conversión de energía vía electroquímica.

Participante en varios congresos nacionales e internacionales, ha sido miembro del Sistema Nacional de Investigadores (1996 a 1999). Es profesor del programa de Postgrado de Metalurgia de la Facultad de Química de la UNAM y del Postgrado en Energía del Centro de Investigaciones en Energía también de la UNAM.

Actualmente es secretario y miembro del Panel de Directores del Fuelcell Propulsion Institute desde el 2000.

ucano@iie.org.mx

Leonardo Rejón García

Ingeniero Químico por la Universidad Veracruzana (1986), maestro en Ingeniería Química por la UAM-Iztapalapa (1990) y doctor en Ciencias Químicas por la UNAM (1998).

Investigador de tiempo completo desde 1989 a la fecha en el IIE. Ha dirigido proyectos encaminados hacia el desarrollo de nuevos materiales compuestos e implantación de procesos de transformación de plásticos.

Actualmente está catalogado en el Nivel 1 dentro del Sistema Nacional de Investigadores

Tiene publicaciones en revistas con arbitraje y en más de 30 reportes técnicos y ha publicado un total de 24 trabajos científicos. Ha dictado conferencias en diferentes universidades del país y del extranjero, en el área de las Ciencias de los Polímeros, Reología de Dispersiones. Ha dirigido tesis de licenciatura y tiene una patente en trámite.

lrejon@iie.org.mx