

# Los autos y la electroquímica

Erika Herrera Calderón, Fernando Hernández, Lourdes Vázquez Gómez, Sergio Ferro y Carlos A. Martínez-Huitle

## El origen de la celda de combustible

En 1839 se demostró que era posible generar corrientes eléctricas a partir de reacciones electroquímicas entre hidrógeno y oxígeno (Webb, 1961). Doscientos años después, científicos e investigadores en la materia seguirían utilizando la esencia de ese descubrimiento para convertir el hidrógeno en una fuente de energía masiva, que podría contrarrestar e incluso poner fin a los efectos de un uso y abuso de los recursos energéticos tradicionales, como el petróleo o el carbón, para mantener las exigencias energéticas de nuestras sociedades (Grove, 1901; Vernon, 1966).

Dos siglos de estudios e investigaciones han conseguido que se conozca la manera de obtener hidrógeno, el elemento más abundante del Universo, en una celda o pila de combustible, para ser transformado en la energía necesaria para hacer funcionar prototipos de vehículos, baterías de teléfonos móviles, autobuses de transporte urbano e incluso plantas industriales. Los subproductos de esta reacción química son agua y calor. No obstante, la clave de este avance son los aspectos económicos, ya que la tecnología para obtener hidrógeno de una manera limpia ya está disponible.

## Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante y ligero del Universo. Sin embargo, su presencia en estado puro es excepcional, lo que hace necesario el uso de diferentes técnicas para su obtención. Si se

quiere llegar a la “plenitud del hidrógeno” como energía del siglo XXI, se necesita producirlo de forma limpia e inagotable. En la actualidad, 99 por ciento del hidrógeno que se produce en el mundo se obtiene mediante el consumo de otros combustibles fósiles, como petróleo, gas natural, etcétera. La utilización de estos combustibles para conseguir el hidrógeno contribuye a contaminar el aire y, en última instancia, provoca el temido cambio climático.

Existen numerosos métodos de producción de hidrógeno. En el ámbito industrial, la producción en pequeñas cantidades se logra a partir del agua, por el método de electrólisis (que la separa en sus elementos mediante aplicación de corriente eléctrica). Si se utiliza como fuente el gas natural, éste se comprime para separar los hidrocarburos ligeros, se le somete a un proceso de desecación para eliminar el agua y se separan el azufre y el nitrógeno. La mezcla resultante se refrigera con nitrógeno líquido y, por último, se procede a la separación gaseosa del monóxido de carbono y el hidrógeno.

A largo plazo, y a ello se están dedicando las nuevas investigaciones sobre la materia, el hidrógeno procederá de fuentes de energía renovables limpias como el Sol o el viento, que proporcionarán la energía necesaria para separar el agua en hidrógeno y oxígeno por electrólisis.

La dificultad en la consecución del hidrógeno de forma limpia y masiva es uno de los principales obstáculos en una carrera en la que las corporaciones automovilísticas están invirtiendo muchos esfuerzos

La base de las baterías y de las celdas de combustible son las reacciones electroquímicas, que transforman reactivos químicos en corriente eléctrica. El oxígeno gaseoso ( $O_2$ ) y el hidrógeno ( $H_2$ ) se pueden combinar en una celda de combustible para ser transformados en agua y energía. Por esta razón, dichas celdas pueden ser aplicadas en el sector automotor, de gran impacto social y ambiental, dando paso a nuevas tecnologías como los automóviles eléctricos



económicos. Distintas industrias del sector están trabajando en el desarrollo de celdas de combustible para sus prototipos de vehículos propulsados por hidrógeno, con mayor o menor éxito.

### Autos y electroquímica

En los últimos años hemos escuchado hablar de la evolución tecnológica que el sector automotriz está viviendo, con frases como “autos de energía híbrida” o “automatización de sistemas en la seguridad del auto”. Sin embargo, en la búsqueda de energías alternativas a los derivados del petróleo, se han desarrollado los autos denominados *fuel cell* (expresión inglesa para “celda de combustible”, que se ha popularizado en todo el mundo), lo cual parecía hasta hace algunos años un mito futurista.

El auto basado en la celda de combustible, que se desarrolla en algunos países, opera con hidrógeno. Sin embargo, no opera mediante la combustión del hidrógeno, como pudiéramos pensar, sino que toma el hidrógeno de un depósito y lo inyecta a una cámara donde se realiza el proceso de combinación química con oxígeno. Este proceso produce energía eléctrica, que es la que realmente mueve al auto. El auto tiene un motor eléctrico que recibe su energía tanto de baterías de reserva como del proceso electroquímico. Las emisiones contaminantes de este auto son nulas, debido a que el resultado de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno es agua.

Durante el manejo, el auto es totalmente silencioso y a la vez suficientemente potente como para permitir una conducción ágil. Algunos autos, como el Mercedes Benz clase A *Fuel Cell*, alcanzan hasta 140 kilómetros por hora y una aceleración bastante aceptable (Figura 1). Este auto es producido por Daimler-Chrysler, con una celda de combustible de 65 kilowatts, y puede acelerar de 0 a 100 kilómetros por hora en 16

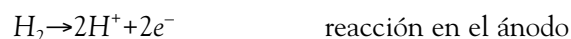
segundos, aproximadamente. Su consumo de energía equivale a cuatro litros de gasolina por cada 100 kilómetros recorridos y tiene autonomía de 150 kilómetros, con cero emisiones contaminantes.

### ¿Qué es la celda de combustible?

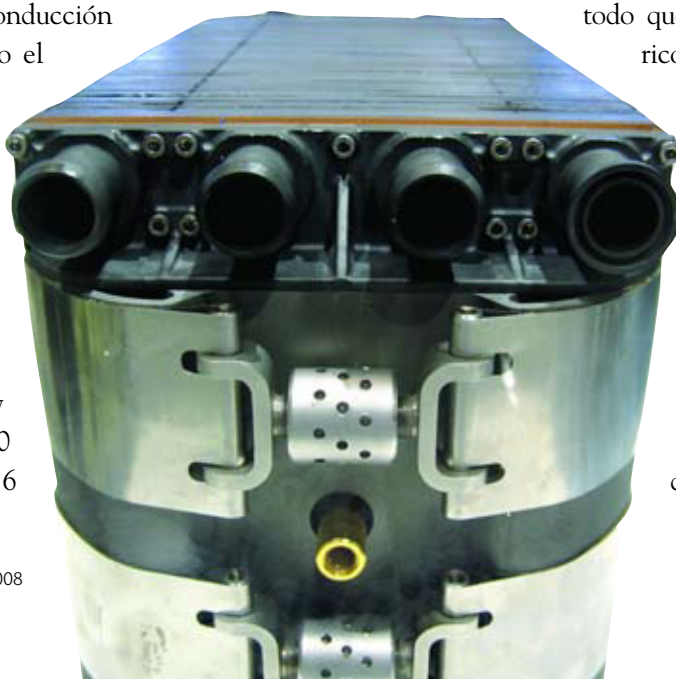
Se estima que la tecnología de las celdas de combustible será la fuente de energía del futuro, por su desempeño silencioso con cero emisiones de gases que contaminen el medio ambiente; en especial, cuando el sistema utiliza hidrógeno.

La celda de combustible se deriva de la aplicación de la electroquímica mediante la transformación de un combustible en electricidad y agua. En principio, una celda de combustible opera como una batería, generando electricidad al combinar hidrógeno y oxígeno electroquímicamente, sin ninguna combustión.

El esquema general de la reacción llevada a cabo por la celda de combustible se encuentra indicado por la Figura 2, donde el oxígeno y el hidrógeno se combinan para transformarse en agua, liberando electricidad y calor, mediante una reacción química. Así lo indican las siguientes ecuaciones químicas:



La celda individual consiste en una sencilla estructura formada con capas en forma de panel que incluye un ánodo que recibe el hidrógeno y un cátodo que capta el oxígeno atmosférico, separados ambos por una membrana polimérica (electrolita). El resultado es electricidad (Figura 3). El espesor de una celda es de dos milímetros, y cada una genera menos de un volt, por lo que se requieren varios cientos de celdas para que en conjunto formen una o varias pilas capaces de producir desde 12 hasta 400 volts





**Figura 1.** Auto fabricado por Mercedes Benz, basado en la aplicación de la celda de combustible.

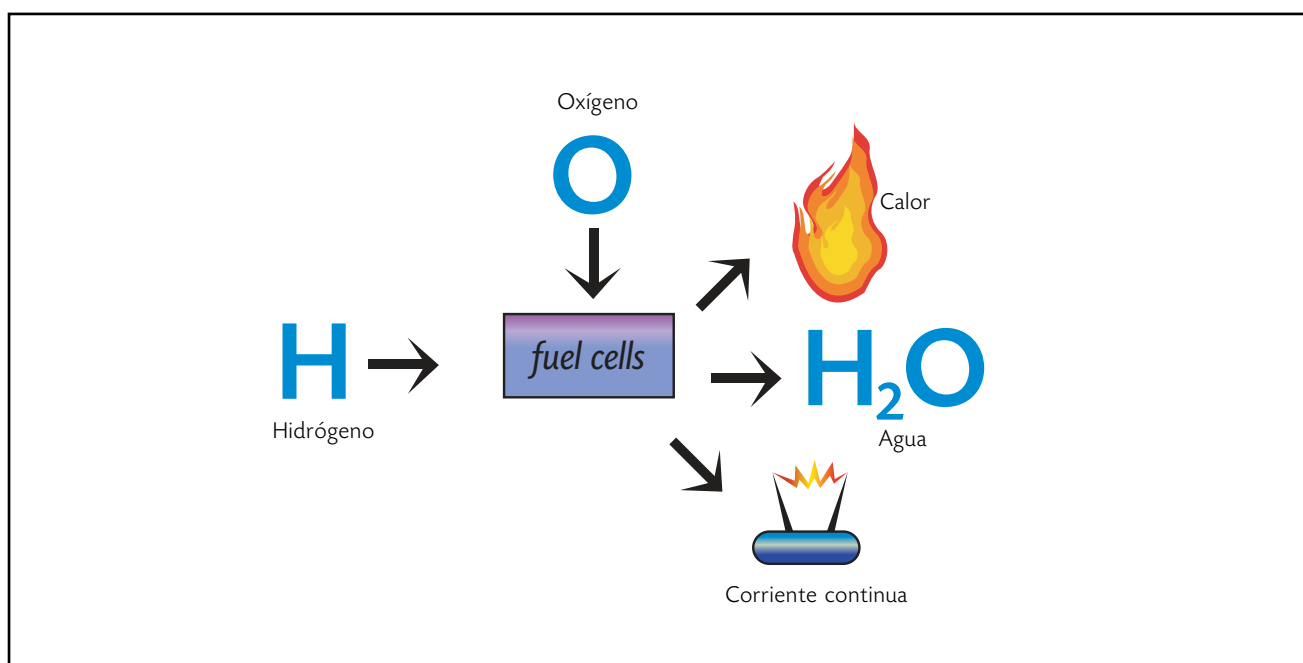
(véase Figura 4). Finalmente, podemos ver cómo se desarrolla completamente el proceso en la Figura 5.

Los dos gases principales son alimentados al interior de la celda, y gracias a la presencia del catalizador —sustancia que acelera la velocidad de las reacciones químicas—, el hidrógeno se separa en dos protones (partículas con carga positiva) y dos electrones (partículas con carga negativa), los cuales toman diferen-

tes caminos hacia el cátodo. A medida que los átomos de hidrógeno fluyen a través del ánodo, un catalizador separa los protones de hidrógeno de sus electrones. Los protones con carga positiva son atraídos al oxígeno en el cátodo y viajan a través del electrolito, que generalmente es una membrana polimérica. Los electrones también son atraídos al oxígeno, pero la membrana los bloquea. Para alcanzar el oxígeno, los electrones viajan alrededor de la membrana por medio de un circuito. El flujo de los electrones a través del circuito crea la corriente eléctrica, que puede ser utilizada antes de que regresen al cátodo para reunirse nuevamente con el hidrógeno y el oxígeno y formen una molécula de agua.

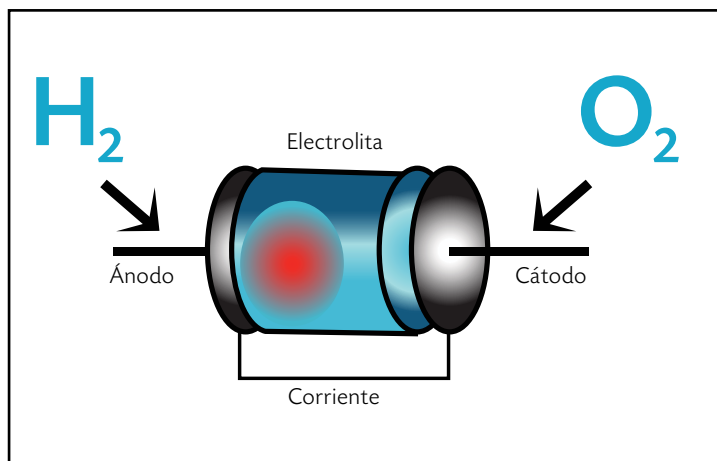
El conjunto de celda de combustible, electrolizador, almacenaje de hidrógeno y fuente de energía renovable constituye el “ciclo de hidrógeno renovable” (Figura 5). Este ciclo se convertirá en el corazón y el alma de la economía energética del futuro.

Las celdas de combustible son una familia de tecnologías que usan diferentes electrolitos y que operan a diferentes temperaturas. Cada miembro de esa familia tiende a ser más apropiada para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, las celdas de combustible de membrana eléctrica polimérica han demostrado ser

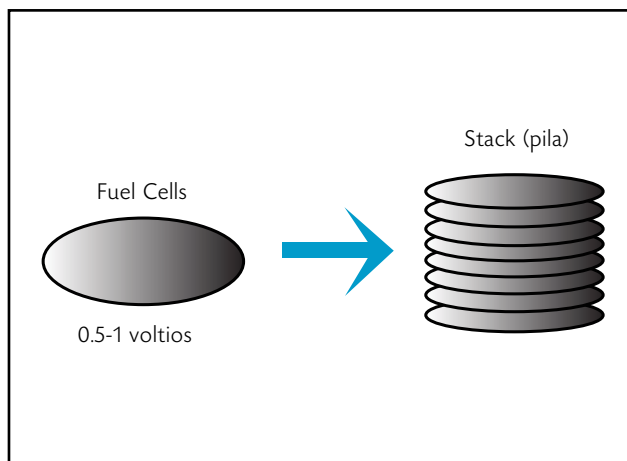


**Figura 2.** Proceso de la celda de combustible (<http://www.energoclub.it/Fuel%20cell.htm>).





**Figura 3.** Composición de la celda (<http://www.energoclub.it/Fuel%20cell.htm>).



**Figura 4.** Unión de varias celdas (<http://www.energoclub.it/Fuel%20cell.htm>).

apropiadas para su aplicación en autos, mientras que las celdas de combustible de carbonatos fundidos parecen ser más apropiadas para uso en turbinas de gas.

### Algunos tipos de celdas de combustible

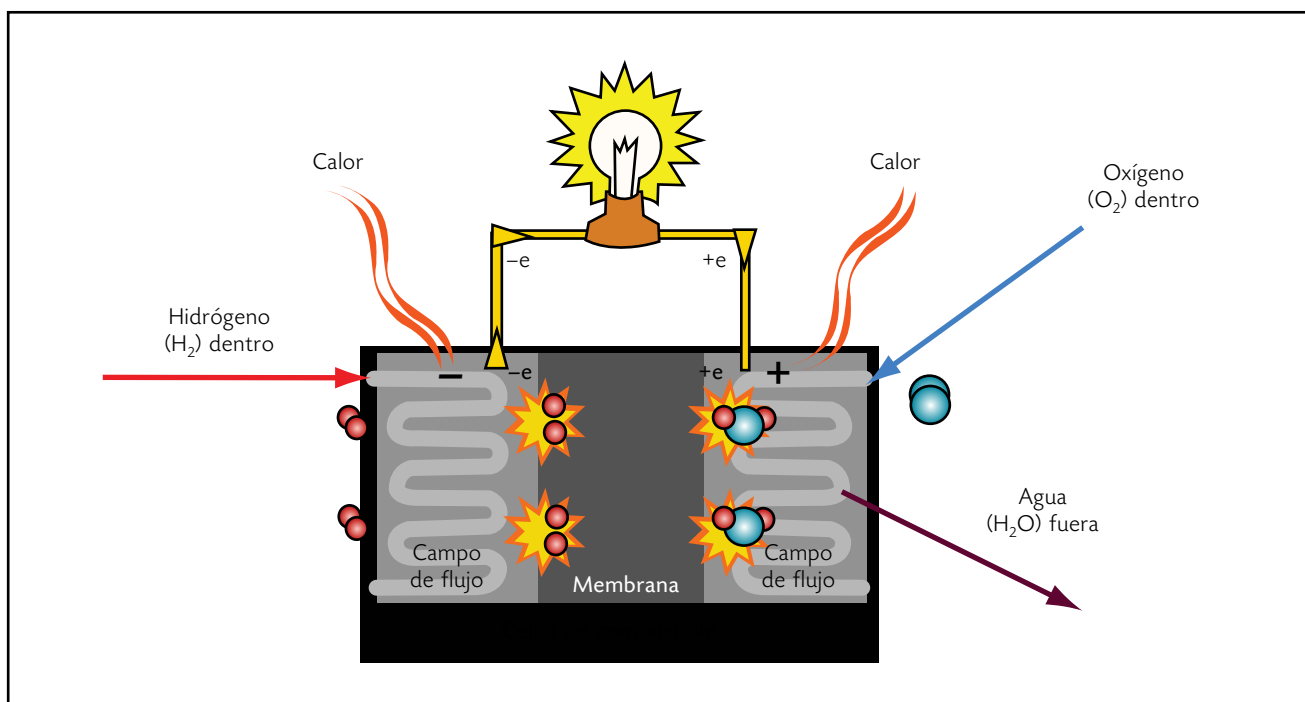
*De ácido fosfórico (PAFCs).* Éste es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial, ya que se encuentra en constante uso, en aplicaciones tan diversas como hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y terminales aeroportuarias. Las celdas de combustible de ácido fos-

fórico generan electricidad con más de 40 por ciento de eficiencia (y hasta cerca de 85 por ciento, si el vapor que se produce se emplea en cogeneración), comparado con el 30 por ciento de la más eficiente máquina de combustión interna. Las temperaturas de operación se encuentran alrededor de los 204 grados Celsius. Este tipo de celda puede ser usada en vehículos grandes, como autobuses y locomotoras.

*De polímero sólido o membrana de intercambio protónico (PEM).* Estas celdas operan a temperaturas relativamente bajas (unos 93 grados Celsius), tienen una densidad de potencia alta, pueden tener respuestas rápidas para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, como ocurre en los automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de Estados Unidos, son las principales candidatas para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas, como la sustitución de baterías recargables en aparatos electrónicos, como videocámaras.

*De carbonato fundido (MCFCs).* Las celdas de combustible de carbonato fundido prometen altas eficiencias de conversión de combustible en electricidad, y la capacidad de consumir combustibles basados en carbón. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 649 gra-





**Figura 5.** Funcionamiento de una celda de combustible, donde los gases son alimentados para formar agua y obtener la energía eléctrica (<http://www.energoclub.it/Fuel%20cell.htm>).





dos Celsius. La primera pila de carbonato fundido a gran escala fue ya probada, y se están terminando algunos prototipos para demostración.

*De óxido sólido (SOFCs).* Otra celda altamente prometedora es la celda de combustible de óxido sólido, que podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia, incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a escala industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén su uso en vehículos motores. Una prueba de 100 kilowatts se está concluyendo en Europa, mientras que dos pequeñas unidades de 25 kilowatts se encuentran ya activas en Japón. Un sistema de óxido sólido normalmente utiliza un material cerámico duro en lugar de un electrolito líquido, permitiendo que la temperatura de operación alcance los 982 grados Celsius. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60 por ciento. Un tipo de estas celdas utiliza un conjunto de tubos de un metro de longitud, mientras que otras variantes incluyen un disco comprimido parecido a la parte superior de una lata de sopa.

*Alcalinas.* Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celda puede alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70 por ciento. Usan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

### Nuevas opciones en autos

Varias compañías de automóviles han apostado al desarrollo de estas tecnologías. Entre las principales se encuentran Toyota, con su auto *Prius*, que tiene pedidos adelantados en Estados Unidos para 15 mil unidades; Ford y su nueva *Escape*, cuyo rendimiento en la prueba realizada en Nueva York fue de 868 kilómetros con un tanque de 55 litros de combustible, cuando el rendimiento normal de un auto de este tipo es 380 kilómetros con un tanque de gasolina; y Honda con su *Insight*, que rinde 96 kilómetros con tres litros y medio de combustible en tráfico urbano.



Sin duda estos vehículos están demostrando que una alternancia entre la electricidad y la gasolina puede ser la solución a la contaminación ambiental, producto de los millones de autos que circulan en el planeta, además de que evitan el colapso de la economía que vendría con el abandono súbito de la gasolina o los hidrocarburos, que son fuente principal de ingresos para muchas economías, incluyendo México.

Actualmente otra opción es la generación de autos híbridos que permiten el uso de la combustión interna y la energía eléctrica. Se está intentando que esta última sea generada mediante el uso de baterías o la aplicación de celdas de combustible.

La tecnología híbrida le permite a un auto operar con altos niveles de eficiencia en consumo de combustible y baja emisión de monóxido de carbono. Su motor de arranque combina un motor eléctrico y uno convencional de gasolina. Los precios de estos autos están 20 por ciento por arriba del de los autos normales de sus categorías; como todo, cuando las nuevas tecnologías salen al mercado y hay poca demanda, los precios y las maquinarias se encarecen. Nuestro pronóstico es que en cinco años gran parte de la población de Estados Unidos viajará en autos híbridos, mientras que en México serán una moda recién instaurada.

### ¿Qué es un auto híbrido?

Es un vehículo que combina un motor de combustible tradicional con uno eléctrico.

### El mundo y México

En el mundo existen investigaciones importantes sobre la generación, invención, mejoramiento y





aplicación de las celdas de combustible en diversos ámbitos, que se desarrollan mayormente en Estados Unidos, Europa y Asia. En México existen varios grupos de investigación en electroquímica en diferentes partes del país, como en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), y el Centro de Investigaciones Avanzadas (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), entre otras. En estos centros empiezan a desarrollarse investigaciones acerca del uso de las celdas de combustible. Por ejemplo, investigadores del Instituto Politécnico Nacional (IPN) diseñan un automóvil eléctrico más económico que los ya existentes en el mercado, con el fin de colaborar con soluciones para combatir la contaminación en la Ciudad de México. Se trata de un vehículo híbrido que ocupa un motor eléctrico y uno de gasolina que se activa como auxiliar.

### Consideraciones finales

En definitiva, es posible que estemos asistiendo a los primeros pasos de una nueva revolución, similar a la que en su día supuso la máquina de vapor. Pero se tratará, en este caso, de una “revolución energética”. La Agencia Internacional de la Energía incluso se atreve a hablar de una nueva revolución industrial, que sólo producirá como desecho agua y calor.

Sin embargo, según los expertos, la inversión necesaria para construir una economía basada en el hidró-

geno y las pilas de combustible se estima en varios miles de millones de pesos. Un estudio sobre la materia señala también que, a pesar de los esfuerzos, la Unión Europea está por detrás de Estados Unidos en cuanto a financiamiento de proyectos, donde el gasto en este sector es entre cinco y seis veces superior al que la Unión Europea dedica en su programa de investigación. Japón es otro de los países que está apuesta fuerte para el desarrollo de esta nueva fuente energética.

Debemos considerar que el hidrógeno, pese a ser el elemento más abundante en el Universo, aparece casi siempre combinado con otros. En ocasiones se encuentra en estado puro en los gases volcánicos, y se han hallado indicios de él en las capas más altas de la atmósfera. En el agua se encuentra combinado con el oxígeno; en el carbón y en el petróleo, en forma de hidrocarburos.

La era del hidrógeno todavía puede parecer lejana para los países ricos, como para los países en desarrollo. Pero seguramente tendrá un impulso importante que permitirá obtener grandes resultados científicos y aplicados. Cuando los pozos de petróleo comiencen a secarse y la economía global se afecte por los cambios climáticos, no habrá alternativa. Todavía nos queda tiempo para evitar dificultades ecológicas y económicas si promovemos la energía limpia. Si tomamos las decisiones correctas hoy, nuestros hijos podrán respirar un aire más limpio y beber un agua más pura. Cuando regresen a sus casas, éstas estarán iluminadas por energía limpia producida por medio del hidrógeno.



### Agradecimientos

C. A. Martínez-Huitile agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la ayuda financiera para la realización de su doctorado. Asimismo, agradece la motivación dada por Elisa Martínez San Juan y Josefina Valadez Cedillo.

**Erika Herrera Calderón** nació en México, D.F., en 1978. Cursó la licenciatura en ingeniería química en el Instituto de Tecnología, en Aguascalientes. Realizó una maestría en electroquímica en el INP Grenoble, en Francia. Actualmente realiza sus estudios de doctorado en el área de electroquímica en el EPFL Lausanne, Suiza, sobre el estudio de la desactivación de superficies.

erika.herreracalderon@epfl.ch

**Fernando Hernández** estudió la licenciatura y maestría en ciencias, en ingeniería química, en la Universidad de Guadalajara. Actualmente es becario del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) en el Departamento de Electroquímica de la Universidad de Bonn, donde realiza estudios de doctorado sobre la caracterización de electrodos monocristalinos de oro modificados con paladio.

fer\_hr@exite.com

**Lourdes Vázquez Gómez** obtuvo el grado de doctora en ciencias químicas en la Universidad de Ferrara, Italia, en el 2006, bajo la supervisión de Achille De Battisti. Su interés central en la investigación es la preparación de nuevos materiales electrocatalíticos basados en mezclas ternarias de rutenio, iridio y estaño, su análisis a través de técnicas superficiales y su comportamiento electroquímico para uso industrial.

lourdesvg@hotmail.com

### Bibliografía

Energoclub Onlus, Associazione di cultori, ricercatori, innovatori e appassionati di fonti energetiche rinnovabili e di tecnologie efficienti, [www.energoclub.it/Fuel%20cell.htm](http://www.energoclub.it/Fuel%20cell.htm).

INFOMotori.com, "Mercedes Classe A Fuel-Cell", [www.infomotori.com/a\\_165\\_IT\\_2211\\_1.html](http://www.infomotori.com/a_165_IT_2211_1.html).

Vernon, K. D. C. (1966), *Proc. Roy. Inst. G. B.*, vol. 41, pp. 250-80.

Webb, R. K. (1961), "Sir William Robert Grove (1811-1896) and the origins of the fuel cell", *J. Roy. Inst. Chem.*, vol. 85, pp. 291-95.

**Sergio Ferro** nació en 1972 en Italia; obtuvo la licenciatura en química en 1997 y el doctorado en ciencias químicas en la Universidad de Ferrara en 2001, donde trabaja como asistente de investigación. Ha sido premiado por comités científicos nacionales e internacionales debido a sus aportaciones en la electroquímica del electrodo de diamante. Su trabajo, sobre todo, se centra en la electrocatálisis como una extensión de la catálisis heterogénea en sus principios y métodos, aplicables a las reacciones electroquímicas.

fre@unife.it

**Carlos A. Martínez-Huitile** obtuvo el grado de doctor en ciencias químicas en la Universidad de Ferrara, Italia, bajo la supervisión de Achille De Battisti. En 2005 recibió de la *Società Chimica Italiana* el "De Nora National Award" por la mejor tesis doctoral en química en Italia. Sus intereses de investigación incluyen la oxidación electroquímica como alternativa para el tratamiento de aguas, la electrocatálisis y el electroanálisis.

mhuitle@yahoo.com.mx

