

# PILAS de COMBUSTIBLE: las piezas de un FUTURO LIMPIO

Karina Suárez Alcántara



## Introducción

El aumento continuo de los precios del petróleo y los niveles de contaminación atmosférica impulsan el desarrollo de nuevas tecnologías para generar energía sustentable. Las pilas de combustible, las energías renovables y el hidrógeno como combustible, en conjunto, pueden ser la base de un sistema sustentable de energía en el futuro. El primer paso hacia ese futuro es conocer el funcionamiento básico y los materiales que constituyen estas nuevas tecnologías.

Aunque los combustibles fósiles seguirán siendo la fuente más importante de energía por muchos años, es urgente desarrollar soluciones tecnológicas que involucren fuentes y modos alternativos de almacenamiento de energía.

Entre la amplia gama de nuevas tecnologías para el aprovechamiento eficiente de la energía se encuentran las *pilas de combustible*. Se piensa que tendrán su principal aplicación en automóviles y en sistemas de respaldo de energía.

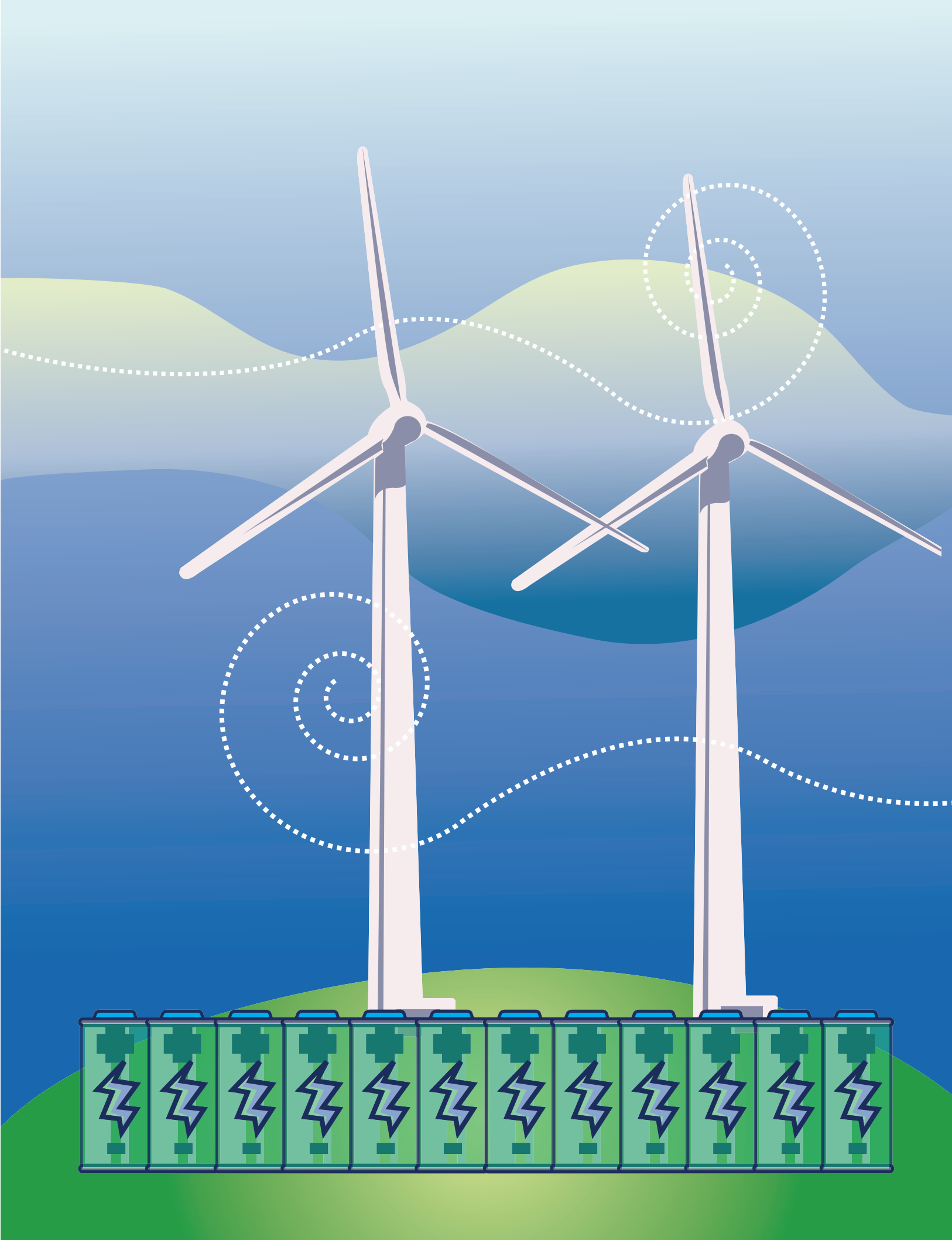
Las pilas o celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de un combustible en energía eléctrica. A diferencia de las pilas convencionales, que se agotan cuando sus componentes han reaccionado, las pilas de combustible funcionan mientras se les suministre un combustible adecuado. Estos combustibles son algunos alcoholes, como etanol ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$ ), metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) o bien hidrógeno ( $\text{H}_2$ ).

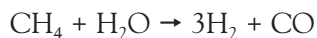
El uso de alcoholes o hidrógeno en las pilas de combustible tiene ventajas y desventajas. La principal ven-

taja del uso de alcoholes es su fácil manejo, puesto que no se requiere tecnología altamente especializada. Se pueden aprovechar los canales de distribución y almacenamiento que actualmente usan otros combustibles, como la gasolina. Sin embargo, una pila de combustible que consume alcoholes es menos eficiente comparada con una que use hidrógeno.

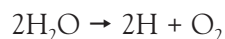
Por otro lado, como ocurre con el consumo de combustibles fósiles en máquinas de combustión interna, consumir alcoholes en pilas de combustible produce gases de efecto invernadero (dióxido y monóxido de carbono,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ ). Esto implica que no se resolverían los problemas locales de contaminación ambiental. Por ejemplo, si en la Ciudad de México todos los automóviles operaran con pilas de combustible de metanol o etanol, todos los automóviles contaminarían, aunque menos que hoy en día. Con todo, en forma global las emisiones contaminantes serían casi nulas, puesto que estos alcoholes podrían ser producidos a partir de cultivos como caña de azúcar o maíz. Cuando estos cultivos crecen, necesitan tomar dióxido de carbono del medio ambiente; por tanto, el balance global de dióxido de carbono es casi cero. Pero destinar las tierras de cultivo de alimentos a caña de azúcar o maíz para producir biocombustibles puede llegar a reducir la disponibilidad de alimentos, y aumentar su precio.

En una pila de combustible se prefiere, por tanto, usar hidrógeno, aun cuando se tenga que desarrollar una tecnología competitiva para su producción, distribución y almacenamiento. El hidrógeno hoy en día se produce por medio de la reformación catalítica de metano:





Este proceso consume un hidrocarburo y produce gases de efecto invernadero, por lo que no es viable a largo plazo y en gran escala. En el futuro, el hidrógeno debe ser producido por medio de la electrólisis del agua:



Este proceso tiene dos grandes ventajas. La primera es que se obtiene un combustible limpio. La segunda es que la energía necesaria para llevar a cabo la electrólisis puede provenir de fuentes renovables de energía, principalmente solar y eólica. Así, es posible aprovechar grandes extensiones territoriales como los desiertos o las costas, sin afectar en gran medida los ecosistemas locales o las zonas de producción de alimentos.

La principal ventaja del hidrógeno es su mayor eficiencia y su nula producción de emisiones contaminantes. Su desventaja radica en que se requiere crear la infraestructura necesaria para producirlo, distribuirlo y almacenarlo a gran escala de forma barata y segura.

### Cómo funciona una pila de combustible

Una pila de combustible básicamente consta de dos electrodos (ánodo y cátodo) y un electrolito.

Existen diferentes tipos de pilas de combustible; se les clasifica por el tipo de electrolito que utilizan. A las pilas de combustible que emplean como electrolito una membrana se les conoce como *tipo PEM*, por sus siglas en inglés. Esta membrana es un aislante eléctrico, pero en contraste los protones ( $\text{H}^+$ ) rodeados de agua pueden atravesarla. Por este motivo a este tipo de electrolito se le llama *membrana de conducción protónica* (de ahí las siglas PEM). La membrana también impide que el hidrógeno y el oxígeno se mezclen, mantiene a cada uno de estos gases separados en su lado correspondiente (hidrógeno en el ánodo y oxígeno en el cátodo). Si el oxígeno y el hidrógeno se mezclan, pueden ocurrir graves explosiones. En las pilas de combustible el oxígeno y el hidrógeno reaccionan de forma controlada; por esta razón se puede aprovechar de forma eficiente la energía que la reacción libera.

Para ensamblar una pila de combustible; la membrana de conducción protónica se recubre por ambos lados con electrocatalizadores: un lado servirá como electrodo anódico y el otro como electrodo catódico. Un electrocatalizador aumenta la velocidad de las reacciones electroquímicas sin consumirse. Al conjunto de membrana y electrocatalizadores se le llama *ensamble membrana-electrocatalizador* (Figura 1). El ensamble membrana electrocatalizador mide no más de 300 micrómetros (milésimas de milímetro). Las pilas de combustible con membrana de conducción protónica son las más adecuadas para su uso en automóviles, pues son ligeras y eficientes.

El ensamble membrana-electrocatalizador es el corazón de la pila de combustible; aquí suceden las reacciones electroquímicas. En el ánodo tiene lugar la reacción de oxidación de hidrógeno a protones y electrones:  $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ . Los protones ( $\text{H}^+$ ) pasan desde el ánodo hacia el cátodo a través de la membrana

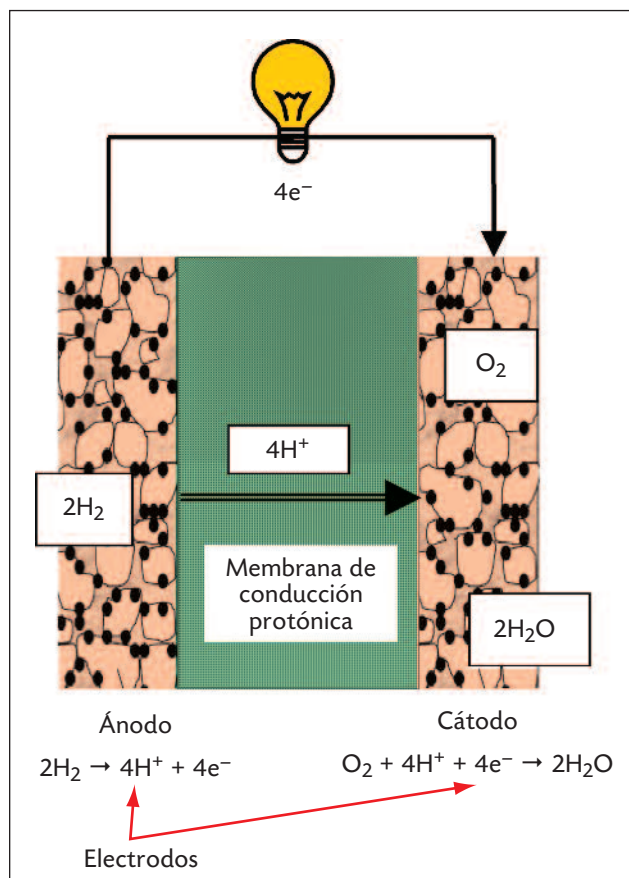
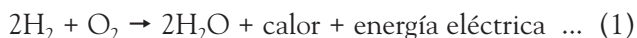


Figura 1. Principio de operación de una pila de combustible hidrógeno-oxígeno ( $\text{H}_2/\text{O}_2$ ).

de conducción protónica. Los electrones ( $e^-$ ) fluyen por un circuito externo a la pila de combustible, donde pueden ser aprovechados para, por ejemplo, encender un foco o accionar un motor eléctrico. Electrones y protones llegan hasta el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno para formar agua; es decir, ocurre la reacción de reducción de oxígeno:  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ .

La reacción global que ocurre en una pila de combustible es:



Como el ensamble membrana-electrocatalizador es delgado y frágil, es necesario protegerlo. El cuerpo de una pila de combustible consta de varias capas; algo parecido a un sándwich. En medio se localiza el ensamble membrana-electrocatalizador. Inmediatamente a cada lado se encuentra un difusor de gases, estructura porosa que ayuda a que el hidrógeno y el oxígeno (gases reactantes) lleguen a los electrocatalizadores. A cada lado del conjunto del ensamble membrana-electrocatalizador y los difusores de gases se localizan los “platos” (Figura 2, mono-pila). Los platos proporcionan entre otras funciones el cuerpo de la pila de combustible y el contacto eléctrico.

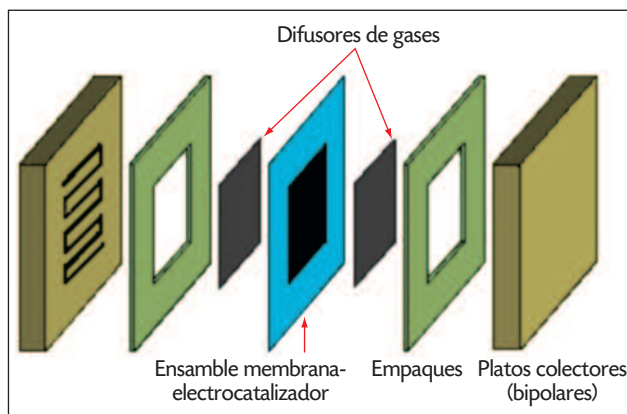
Las pilas de combustible se pueden conectar entre sí para formar “arreglos” y alcanzar las necesidades de corriente, voltaje y potencia requeridos para una aplicación específica. El voltaje generado depende del número de pilas conectadas entre sí, mientras que la corriente generada depende del área de los electrodos en la pila de combustible. En los arreglos, los platos (en este caso llamado “platos bipolares”) son el contacto eléctrico entre el cátodo de un ensamble membrana-electrocatalizador y el ánodo del siguiente.

En la Figura 3 se muestra de forma esquemática el principio de operación de un arreglo. Sobre el primer ánodo ocurre la separación del hidrógeno molecular en protones y electrones. Los protones fluyen a través de la membrana de conducción protónica hacia el primer cátodo. Mientras tanto, los electrones fluyen por un circuito externo a la pila de combustible hacia el último cátodo del arreglo. En éste, los protones generados en el último ánodo, los electrones del primer ánodo y el oxígeno reaccionan para formar agua. Los

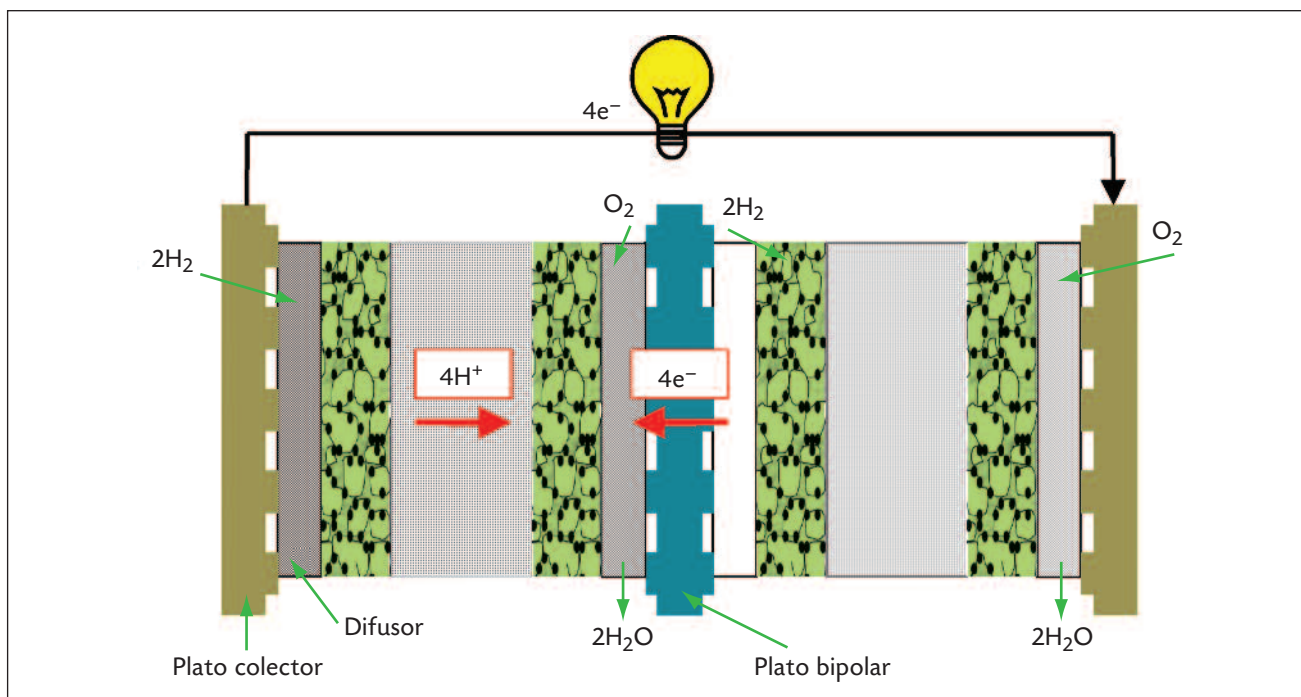


La principal ventaja del hidrógeno es su mayor eficiencia y su nula producción de emisiones contaminantes.

Su desventaja radica en que se requiere crear la infraestructura necesaria para producirlo, distribuirlo y almacenarlo a gran escala



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



**Figura 3.** Principio de operación de un arreglo de pilas de combustible.

electrones liberados en el último ánodo fluyen a través del plato bipolar hacia el penúltimo cátodo, donde reaccionan con los protones del penúltimo ánodo y oxígeno, para producir agua. Este proceso se repite hasta que los electrones liberados en el segundo ánodo llegan al primer cátodo y se cierra así el ciclo.

El funcionamiento de una pila de combustible es complejo, ya que en ella se llevan a cabo al menos los siguientes procesos: flujo de los gases reactantes (hidrógeno y oxígeno) a través las capas de materiales que conforman a la pila, reacciones electroquímicas, movimiento de protones a través de la membrana de conducción protónica, movimiento de los electrones a través de los platos, circuito externo y conexiones eléctricas, y eliminación del agua formada y del calor liberado.

### Componentes de la pila de combustible

El buen funcionamiento de una pila de combustible depende en gran medida de los materiales empleados y de los diseños elegidos para su construcción. Los componentes principales de la pila de combustible

son la membrana de conducción protónica, los electrocatalizadores, los soportes de éstos, los difusores de gases, los empaques y los platos.

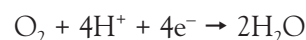
#### Membranas de conducción protónica

La membrana de conducción protónica (electrolito) cumple dos funciones de vital importancia. La primera es permitir el paso de los protones desde el ánodo hacia el cátodo. La segunda es separar los gases reactantes, hidrógeno y oxígeno, evitando que se mezclen y que ocurran explosiones. Una membrana de conducción protónica debe cumplir varios requisitos; entre ellos, tener buena conducción protónica, pero ser un aislante eléctrico, es decir, impedir el paso de electrones; ser flexible, homogénea e impermeable al paso de los gases hidrógeno y oxígeno, tener estabilidad química, térmica y mecánica, y la capacidad para ser moldeada en películas delgadas.

#### Electrocatalizador catódico

(reacción de reducción de oxígeno)

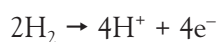
La reacción de reducción de oxígeno



es lenta, por lo que es necesario buscar electrocatalizadores apropiados para que ocurra a velocidad adecuada. El mejor electrocatalizador es el platino; sin embargo, es caro y poco abundante en la corteza terrestre. Por ello es necesario disminuir la cantidad de platino presente en las pilas sin menoscabar su funcionamiento. Actualmente se busca sustituir al platino con otros metales nobles como osmio, paladio, rutenio y sus aleaciones con hierro, níquel y cobalto, entre otros.

#### **Electrocatalizador anódico (reacción de oxidación del hidrógeno)**

La reacción de oxidación del hidrógeno



es por lo menos tres veces más rápida que la de reducción del oxígeno ( $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ). Por ello, es factible pensar en utilizar un electrocatalizador que contenga la mínima cantidad de platino. Por otro lado, como el hidrógeno es hoy producido por reformación catalítica de metano, se tienen residuos de monóxido de carbono y compuestos de azufre que “envenenan” fácilmente al platino, inutilizándolo. Por esta razón es común el uso de aleaciones de platino con rutenio, molibdeno, tungsteno, cobalto, osmio, iridio, níquel, estaño, oro, y otros metales como ánodo en las pilas de combustible. La más común de estas aleaciones es la de platino-rutenio.

#### **Soportes de electrocatalizador**

Los electrodos anódico y catódico están hechos de una mezcla de electrocatalizador y carbón, éste último como material de soporte. El carbono proporciona una red conductora electrónica que permite que el circuito eléctrico se cierre y las reacciones electroquímicas ocurran con mayor facilidad. Esto permite que el electrocatalizador sea usado más eficientemente. El uso de materiales de soporte permitió disminuir mil veces la cantidad de platino usado en la

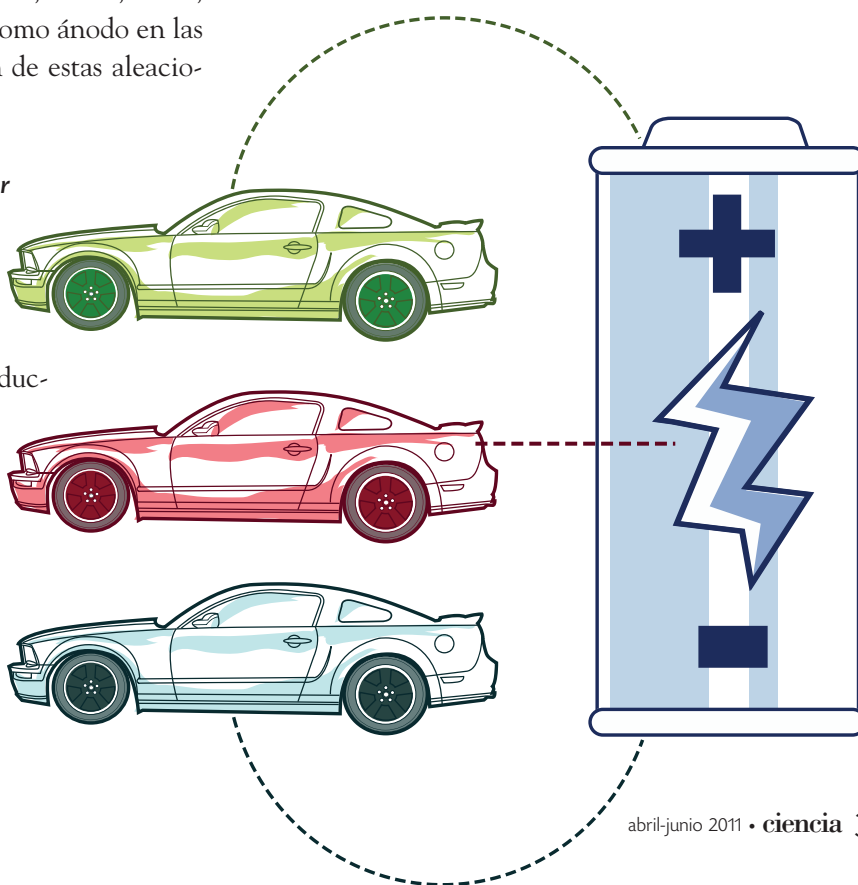
fabricación de ensamblajes membrana-electrocatalizador desde la década de 1960 (Proyecto Géminis, NASA) a la fecha. Los materiales comúnmente utilizados como soporte son los llamados carbones negros, producidos por la combustión incompleta de algunas fracciones de petróleo.

#### **Difusores de gases**

Los difusores de gases usualmente están hechos de papel de carbón poroso o de tela recubierta de carbón. Las funciones de un difusor de gases son facilitar el acceso del hidrógeno y el oxígeno, y la salida del agua formada, así como proporcionar un contacto eléctrico entre los platos bipolares y el electrocatalizador; eliminar el calor generado, y soportar mecánicamente al ensamblaje membrana-electrocatalizador.

#### **Empaques**

Los empaques comúnmente usados son hechos de silicón resistente a altas temperaturas, moldeados o cortados específicamente de acuerdo con el diseño de cada pila de combustible. Su finalidad es evitar las fugas de gases reactantes dentro o fuera de la pila de combustible. Deben garantizar una operación segura a largo plazo.



### Platos

Después de los electrocatalizadores, el desempeño de una pila de combustible está determinado por el óptimo diseño de los platos. En la superficie de éstos se perforan canales (llamados campos de flujo) por donde fluyen los gases reactivos y el agua formada. Las funciones de los platos son distribuir los gases reactivos, eliminar el agua formada, separar las pilas individuales, conducir electrones, formar los contactos entre las pilas individuales, y por supuesto mantener una temperatura de operación adecuada. Todo plato bipolar debe de cumplir con los siguientes requerimientos: tener buena conductividad eléctrica, buena conductividad térmica, impermeabilidad a los gases reactivos, resistencia a la corrosión, peso y volumen mínimos y bajo costo. Los materiales usados en la manufactura de platos bipolares son el grafito de alta densidad (compactado), y metales como titanio, aluminio o acero inoxidable, recubiertos con películas protectoras para evitar la corrosión.

### Conclusiones

Las pilas de combustible y el hidrógeno pueden ser un factor clave en el aprovechamiento sustentable de la energía. Difundir el principio de operación de las pilas de combustible es de primordial importancia

para incrementar el interés y el desarrollo en nuestro país de esta tecnología. Cada parte que conforma una pila de combustible puede afectar el desempeño global de la misma; por eso es necesario realizar investigaciones para optimizar cada una de ellas. El diseño de las piezas o componentes de una pila de combustible es una tarea multidisciplinaria, que requiere el esfuerzo conjunto de ingenieros y científicos de muchas áreas del conocimiento.

### Agradecimientos

La autora agradece al Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav) y de forma muy especial al doctor Omar Solorza Feria por las facilidades otorgadas durante el desarrollo de sus estudios doctorales.

**Karina Suárez Alcántara** es doctora en química con especialidad en electroquímica, pilas de combustible y almacenamiento de hidrógeno. Recibió el Premio Arturo Rosenblueth en 2009. Actualmente labora en el Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material-und Küstenforschung GmbH, en Alemania. [karinasa\\_1979@yahoo.com](mailto:karinasa_1979@yahoo.com)

### Lecturas recomendadas

Ogden, J. (2006), "High hopes for hydrogen", *Scientific american* 295(3), 94-101.

Solorza Feria, Omar (1996), *Hidrógeno y celdas de combustible*, página web, Red Latinoamericana de Química (disponible en <http://www.relaq.mx/RLQ/h2.html>).

Solorza Feria, Omar, Elvira Ríos-Leal y Héctor M. Poggi-Varaldo (compiladores, 2008), *Energías renovables biológicas: hidrógeno-pilas de combustible*, libros de ciencia y tecnología núm. 1, 1ª edición, Ecatepec, Cinvestav-IPN (disponible en <http://www.relaq.mx/RLQ/tutoriales/e-bookSymp07.pdf>).

