



Una alternativa **limpia** para la **generación** de **energía eléctrica**

El uso de celdas de combustible es una de las alternativas para disminuir los daños al medio ambiente provocados por los combustibles fósiles que se utilizan tanto en la generación de energía eléctrica como en el sector automotriz. Ante un inminente déficit de hidrocarburos y una exagerada contaminación del medio ambiente, es importante conocer y explorar los alcances de sistemas alternativos de generación de energía eléctrica con el objeto de visualizar y preparar el futuro energético.



El creciente aumento de la población y la constante evolución de nuevas tecnologías y su uso en prácticamente todos los sectores –industriales, comerciales y residenciales–, han incrementado la demanda de energía eléctrica en el mundo entero. Para solventar esta demanda, los sistemas de generación eléctrica han aprovechado principalmente los combustibles fósiles. El uso de estos combustibles contribuye de manera considerable a las emisiones de contaminantes como el dióxido de azufre (SO_2), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de carbono (CO_2). El calentamiento global, los cambios climatológicos y la capacidad en la producción de petróleo son temas relacionados con dichas emisiones y con el uso mayoritario de los combustibles fósiles para producir energía eléctrica.

En México, de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), 50.4% de la energía eléctrica se genera mediante el uso de hidrocarburos y el resto utilizando fuentes alternas: hidroeléctrica, 20.6%; carboeléctrica, 19.4%; nucleoelectrica, 5.8%; geotermoeléctrica, 3.7% y eoloeléctrica, 0.1%. Los productores independientes generan alrededor del 23% de la energía total y de igual manera utilizan principalmente hidrocarburos como combustible.

Es claro que la generación de energía eléctrica por fuentes alternas figura muy poco en nuestro país; la inversión contemplada para este tipo de tecnologías ha sido mínima. No obstante, en centros de investigación se han estado realizando





esfuerzos para promover y mejorar el uso de sistemas eléctricos a partir de celdas fotovoltaicas y celdas de combustible.

Es importante conocer la operación de las celdas de combustible debido al gran auge y desarrollo que éstas han tenido en los últimos años a nivel mundial, pero sobre todo porque son sistemas libres de contaminación, con eficiencias generalmente mayores a las de los sistemas actuales y con una diversidad de posibles aplicaciones. La idea principal de este trabajo es dar un panorama general del uso de las celdas de combustible con el fin de concientizar y promover su desarrollo en nuestro país.

Tipos de celdas de combustible

“Batería voltaica gaseosa” fue el nombre que en 1839 William R. Grove le dio a su descubrimiento: una forma de generar electricidad a partir de procesar químicamente hidrógeno y oxígeno. Este descubrimiento es el principio básico de funcionamiento de las celdas de combustible actuales; de él se deriva la definición de una celda de combustible, que puede enunciarse como “aquel dispositivo electroquímico que continuamente convierte energía química en energía eléctrica (y algo

en calor), mientras el combustible y el material oxidante sean alimentados”.

El principio básico de una celda de combustible es muy simple. Para construir una, se sumergen dos electrodos separados dentro de un recipiente con un electrolito diluido en agua y se hace circular una corriente eléctrica. Esta corriente provoca una reacción química que permite separar el oxígeno y el hidrógeno (ionización) de las moléculas del agua a través de cada electrodo, proceso conocido como electrólisis (Hoogers, 2003). Para invertir el proceso anterior, a través de un electrolito que separa a los dos electrodos (que usualmente son de platino) se hace circular oxígeno por un lado e hidrógeno por el otro. Lo anterior produce una reacción química sin combustión que genera principalmente dos cosas: energía eléctrica y agua (Suárez, 2011).

Dependiendo del tipo de celda de combustible que se esté utilizando, las reacciones entre combustible, electrodos y electrolitos son diferentes aunque con el mismo efecto: generar energía eléctrica útil. Otro producto del proceso inverso de electrólisis en la celda de combustible, y que en algunos casos se aprovecha, es el calor que se produce en el ánodo a consecuencia de la liberación de electrones.

Desde que se concibió por primera vez la celda de combustible básica hasta la fecha, se han explorado diferentes electrolitos y condiciones de operación buscando mejores opciones en cuanto a capacidad de potencia y eficiencia. Las celdas de combustible generalmente se distinguen por el electrolito que utilizan y por la temperatura de operación, aunque existen otros elementos para diferenciarlas, como los materiales de los electrodos. Algunas de las más comunes se describen a continuación (Larminie y Dicks, 2003).

Celda de combustible de membrana de polímero electrolítico (PEMFC) o de intercambio protónico. Es el tipo de celda básica que utiliza como electrolito un polímero sólido o plástico como el nafion, en el cual hay protones móviles. Funciona a bajas temperaturas, de entre 50 y 100 °C, y utiliza sofisticados catalizadores y electrodos, como es el caso del platino. Su construcción es sencilla, ya que sólo requiere de placas separadas por el electrolito; éste debe ser poroso para permitir el flujo de gases como el hidrógeno y el oxígeno (Zhang, 2008).



El problema principal de estas celdas es la disponibilidad de hidrógeno, aunque esto se ha podido resolver mediante la aplicación de metanol directo.

Celda de combustible alcalina (AFC). Fue desarrollada en 1902 y hasta los años 50 se le consideró viable para operar como una unidad de potencia. Los voltajes de operación pueden llegar a 0.875 V por celda, un valor considerablemente mayor que el obtenido en una PEMFC (alrededor de 0.7 V). Además, las AFC usan un electrolito de bajo costo, como hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, y los electrodos, particularmente el cátodo, suelen fabricarse con materiales menos costosos que el platino, por ejemplo el níquel. Generalmente este tipo de celdas de combustible operan a temperaturas menores a 100 °C, aunque han llegado a operar a temperaturas de hasta 200 °C sin grandes problemas.

Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC). Es la primera fuente alterna de este tipo en producir energía eléctrica en cantidades comerciales y se utiliza ampliamente. Existen alrededor de 200 sistemas instalados con capacidades de entre 200 kW y 1 MW, manufacturados principalmente por la Corporación Internacional de Celdas de Combustible (cuyo nombre cambió a UTC Fuel Cells Inc.). Los electrodos porosos, catalizadores de platino y una temperatura medianamente alta (≈ 220 °C) elevan el rango de reacción a un nivel razonable. Estas celdas utilizan un sistema de reformación del gas natural, sobre todo metano (CH_4), que consiste básicamente en someter el gas a un proceso donde se combina con vapor a altas presiones y temperaturas, lo que permite separar el hidrógeno y atrapar el dióxido de carbono, evitando así las emisiones al medio ambiente. Si bien el equipo que se requiere eleva considerablemente los costos, la complejidad y el tamaño del sistema de celdas de combustible, lo que se obtiene es una forma de generar energía muy factible. Además, las celdas de este tipo funcionan continuamente por periodos de hasta un año o más con poco mantenimiento.

Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). Estas celdas operan en un rango de temperaturas de 600 a 1 000 °C, lo que permite elevar los rangos de reacción sin necesidad de catalizadores costosos y utilizar los gases, como el natural, directamente o mediante sistemas



de reformación internos en la celda de combustible, sin que haga falta una unidad separada. Este tipo de celdas aprovechan todas las ventajas de la simplicidad inherente al concepto de celda de combustible; sin embargo, el material cerámico utilizado es difícil de manejar, por lo cual es caro producirlas y requieren de una gran cantidad de equipo extra que incluye aire y precalentadores de combustible. Además, el sistema de enfriamiento es complejo y no es fácil ponerlo en operación. A pesar de trabajar a temperaturas por encima de 1 000 °C, los componentes o elementos de la SOFC siempre permanecen en su estado sólido.

Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC). Una peculiaridad de este tipo de celdas es que requieren dióxido de carbono del aire para trabajar. La alta temperatura a la que operan es sinónimo de que se obtiene un buen rango de reacción al utilizar un catalizador comparativamente económico de níquel, el cual forma la base eléctrica del electrodo. Al igual que la SOFC, puede usar gases como el metano y el gas del carbón directamente, sin un sistema de reformación externo. Sin embargo, esta simplicidad algunas veces se desajusta por la naturaleza del electrolito, una mezcla caliente y corrosiva de litio, potasio y carbonatos de sodio. Se pueden construir unidades con capacidades de potencia de entre 10 kW y 2 MW.

Otras celdas de combustible conocidas son las de metanol directo (DMFC), las regenerativas (RFC), las de Zinc Aire (ZAFC) y las de combustible cerámico protónico (PCFC). Actualmente, las celdas de combustible PEMFC están teniendo un gran auge debido a sus características de eficiencia y manejo de potencia. Cada



celda de combustible se diseña de manera que puedan eliminarse o reducirse las desventajas de las otras; sin embargo, también cada una trae sus propias dificultades o inconvenientes en cuanto a la aplicabilidad y los costos de operación.

Procesamiento de la energía con celdas de combustible

Construir sistemas de potencia a partir de las celdas de combustible es un trabajo interdisciplinario, pues se requieren conocimientos de química, electroquímica, ciencia de los materiales y termodinámica. Además, para el procesamiento eficiente y la regulación de la energía eléctrica generada por la celda de combustible se necesitan expertos en electricidad, electrónica, ingeniería de control e instrumentación.

Si bien es cierto que las celdas de combustible proporcionan energía eléctrica a través de un proceso libre de contaminación y con eficiencias iguales o superiores al 50%, también tienen la particularidad de entregar voltajes de salida con variaciones importantes y dependientes de la carga. Es por ello que el procesamiento de la energía eléctrica que generan es de gran importancia, además de que los equipos actuales demandan sistemas de alimentación regulados y libres de ruido. Además, debe tomarse en cuenta que los voltajes proporcionados por la celda de combustible por lo general no son típicos para aplicaciones comerciales. En la Figura 1 se muestra un diagrama de bloques representativo de la generación, procesamiento y consumo de energía eléctrica de un módulo de celdas de combustible.

En teoría, las celdas de combustible de bajas temperaturas generan voltajes de corriente directa (CD) de

alrededor de 1.2 V. En la práctica, estos niveles de voltaje suelen ser más bajos aun sin carga, mientras que con carga se tiene una reducción del voltaje aun para densidades de corriente media y el voltaje oscila en un rango de 0.6 a 0.8 V. Con celdas de combustible de altas temperaturas, la caída de voltaje suele ser menor para niveles de corrientes similares y su voltaje oscila entre 0.8 y 0.9 V. Comercialmente se encuentran como un paquete de celdas de combustible para elevar el nivel de voltaje en terminales que van de 6.4 a 800 V, y corrientes de 40 a 300 A (Ballard Technology, Inc). Estos niveles de voltaje a la salida de una celda de combustible suelen ser variables debido a diferentes aspectos del funcionamiento de la misma, como temperatura, humedad del aire y sobre todo la corriente que demanda la carga.

Los convertidores de CD/CD tienen la capacidad de incrementar o disminuir los valores de voltaje generados por las celdas de combustible a valores comerciales de operación. Además, debido a su principio de funcionamiento por conmutación, permiten regular el voltaje y mejorar el desempeño con altas eficiencias. Actualmente se ha propuesto el uso de convertidores con varias etapas para la regulación de voltajes a la salida de las celdas de combustible. Para el caso de interrupciones de energía, es común recurrir a etapas de almacenamiento de energía donde se usan baterías de litio y polímeros. Una característica importante de estos convertidores es que tienen eficiencias altas, de entre 85 y 95 por ciento.

Los sistemas de alimentación para sectores residenciales o industriales generalmente están conectados a las líneas de distribución de la energía eléctrica. Esta energía es generada, transmitida y distribuida en

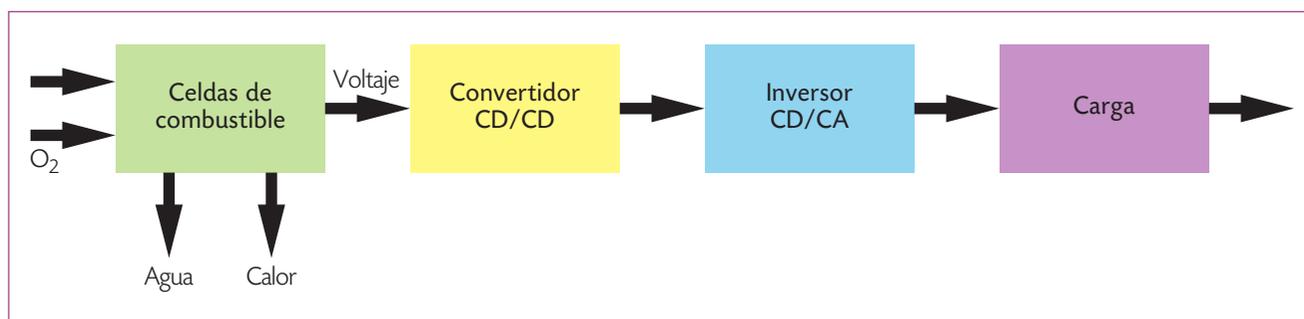


Figura 1. Diagrama de bloques para el procesamiento de energía con celdas de combustible.

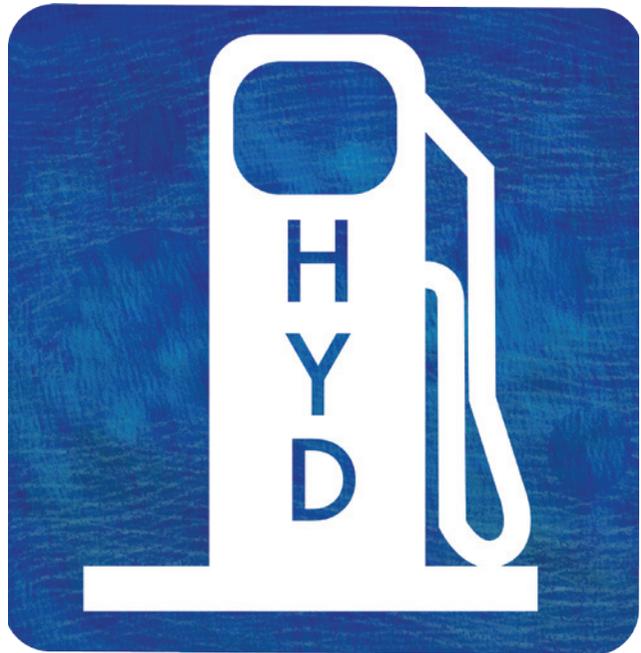
corriente alterna (CA), ya que la mayor parte del equipo y la maquinaria se han diseñado para trabajar así. De lo anterior se desprende que para usar celdas de combustible en aplicaciones de media y alta potencia conviene instalar algún sistema con la capacidad de convertir corriente directa a corriente alterna. Los convertidores de corriente directa a alterna, o inversores, son la solución actual para adaptar los voltajes de corriente directa regulados a través de un convertidor de CD/CD a los niveles de voltaje y corriente que demanda la carga. Al igual que este convertidor, los inversores operan bajo el principio de la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia y por lo tanto deben diseñarse para que sean eficientes.

En aplicaciones residenciales o de negocios pequeños normalmente se requiere de tomas de energía eléctrica de una fase (monofásica), mientras que en el sector industrial o comercial generalmente se necesitan tomas tanto de una fase como de tres fases. Los inversores monofásicos permiten obtener corriente alterna monofásica a partir de corriente directa, a la frecuencia y fase de operación normalizadas por el sistema eléctrico convencional. Existen diferentes configuraciones de convertidores, entre las cuales están el tipo puente H (señal cuadrada) de onda sinusoidal modificada y el de onda sinusoidal pura. En los inversores modernos se ha adoptado el uso de microprocesadores, lo que mejora enormemente las características deseadas de los inversores, como eficiencia, desempeño y confiabilidad.

En el caso de aplicaciones industriales, así como para la transmisión de energía eléctrica, existen sistemas que operan con tres voltajes desfasados uno del otro por 120° . Para estas aplicaciones también hay inversores en los que a partir de la señal proveniente del convertidor de corriente directa se obtiene un sistema de tres voltajes o, en otras palabras, un sistema trifásico. El circuito básico funciona a través de seis dispositivos semiconductores que alternativamente conmutan para generar voltajes con la amplitud, frecuencia y fase deseadas.

Aplicaciones

Comparada con el uso de combustibles fósiles, la generación de energía eléctrica a través de celdas de



combustible presenta diferentes ventajas; entre ellas una operación silenciosa, que se traduce en la reducción de contaminación por ruido, mínimas emisiones contaminantes y la reutilización del calor. Además, una celda de combustible que utiliza hidrógeno puede ser compacta, ligera y sin partes móviles grandes, no realiza combustión, no genera vibraciones y es altamente confiable. Todas estas ventajas han abierto el campo de aplicación de las celdas de combustible a la mayoría de los sistemas eléctricos y electrónicos actuales.

En sistemas de comunicaciones es útil adaptar celdas de combustible como reemplazo de baterías –generalmente con capacidades de 1 a 5 kW–; estas celdas tienen alta durabilidad y es posible ubicarlas en sitios remotos o donde sea complicado tener acceso.

El uso de celdas de combustible se está adoptando tanto en sistemas estacionarios, como es el caso de hospitales, hoteles, restaurantes y escuelas, como en la industria automotriz, y en general en los sistemas de transporte como autos, autobuses de pasajeros y motocicletas (Herrera y cols., 2008). Es conocido el uso de celdas de combustible en naves espaciales desde los años 60. También se han aplicado en aviones, barcos, trenes y otros sistemas como montacargas.

Una característica importante de las celdas de combustible es que pueden usarse como fuentes de energía



transportable e incluso hacerse a la medida, principalmente para lugares remotos. Lo anterior ha abierto la posibilidad de usar estas celdas en tecnologías móviles como telefonía celular, computadoras, relojes, herramientas portátiles y alarmas, entre otras.

Perspectivas

En la medida en que pueda garantizarse su durabilidad, las celdas de combustible pueden tener una aplicación muy amplia en la generación de energía eléctrica distribuida para ciudades en desarrollo desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

El principal problema de la generación eléctrica actual es la continua variación en la demanda, la cual puede ocasionar fallas de suministro; este problema suele presentarse debido a que en los sistemas tradicionales no existe la posibilidad de almacenar la energía. Las celdas de combustible pueden acoplarse fácilmente a las redes de suministro de energía para cubrir esa demanda cuando sea necesario, pero también pueden utilizarse de manera independiente de la red de suministro.

Es importante mencionar que en países como Estados Unidos y Japón se ha estado trabajando fuertemente en nuevas tecnologías para generar energía eléctrica a partir del hidrógeno. El desarrollo de celdas de combustible se ha incentivado para aplicaciones tanto en el suministro de energía como en la industria automotriz. Si se analiza este punto, resulta claro que la sustitución de combustibles fósiles por hidrógeno es un proyecto que puede impactar de manera significativa en el desarrollo y la supervivencia energética de un país. Actualmente es posible encontrar sistemas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible directas (DFC) que van desde los 300 kW hasta los 2.8 MW, con posibilidades de escalar hasta 50 MW.

Existen proyectos enfocados principalmente en el suministro de alta potencia; por ejemplo, en Japón se ha contemplado incrementar la capacidad instalada hasta 10000 MW para el 2020. Algunas compañías dedicadas a la manufactura de celdas de combustible están buscando elevar la capacidad de generación mediante la implementación de sistemas de enfriamiento más eficientes. Se espera además lograr mejores costos,

así como incrementar la vida útil de estos sistemas. Los países donde existen empresas dedicadas al desarrollo de celdas de combustible son Canadá, Alemania, Australia, Suiza, Finlandia, Alemania, Singapur, Israel, Italia y Brasil.

Es claro que se han dado avances importantes en cuanto a la producción de energía eléctrica mediante el uso de hidrógeno como combustible. Sin embargo, todavía existe incertidumbre con respecto a la durabilidad de los componentes dentro de una celda, que generalmente están sujetos a cambios de temperatura y elementos corrosivos. Por otra parte, es necesario desarrollar mejores sistemas de producción, almacenamiento y posiblemente transporte del hidrógeno (Romero y



cols., 2010). En este sentido Corea del Sur, por ejemplo, está por construir la primera estación en el mundo generadora de hidrógeno a partir del biogás natural obtenido de la basura.

En México es importante realizar mayores esfuerzos en el desarrollo de celdas de combustible que coadyuven a satisfacer la demanda de energía eléctrica, la cual se incrementa año tras año. Esto obviamente implica dedicar mayores recursos; sin embargo, vale la pena considerar que el déficit de hidrocarburos es inminente y que con estas nuevas tecnologías también se puede contribuir en forma sustancial a mejorar la calidad de vida del planeta, el cual finalmente heredaremos a las nuevas generaciones.

Jesús Leyva Ramos es investigador del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Su campo de investigación es el aprovechamiento de energías renovables y el procesamiento eficiente de la energía generada de celdas de combustible.
jleyva@ipicyt.edu.mx

Margarito Martínez Cruz es profesor investigador de la Universidad Politécnica de San Luis Potosí. Su campo de investigación es el procesamiento eficiente de la energía eléctrica.
margarito.martinez@upslp.edu.mx

Bibliografía

- Herrera, E., F. Hernández, L. Velázquez, S. Ferro y C. A. Martínez-Huitile (2008), "Los autos y la electroquímica", *Ciencia*, Academia Mexicana de Ciencias, México, 59, 16-25.
- Hoogers, G. (2002), *Fuel Cell Technology Handbook*, Boca Raton, CRC Press.
- Larminie, J. y A. Dicks (2003), *Fuel Cell Systems Explained*, 2a. ed., Chichester, John Wiley & Sons.
- Romero, H., J. J. Ambríz, G. Espinosa y A. Fernández (2010), "Almacenamiento de la energía", *Ciencia*, Academia Mexicana de Ciencias, México, 61, 74-85.
- Suarez, K. (2011), "Pilas de combustible: Las piezas de un futuro limpio", *Ciencia*, Academia Mexicana de Ciencias, México, 62, 26-32.
- Zhang, J. (2008), *PEM Fuel Cell Electrocatalysis and Catalyst Layers Fundamentals and Applications*, Londres, Springer-Verlag London Limited.

