



# Celdas combustibles: una opción para la transformación descentralizada de energía

Julio Alberto Gavilán

Recibido: Octubre del 2004

Aprobado: Diciembre del 2004

## Resumen / Abstract

La solución a los problemas energéticos actuales y al progresivo deterioro del medio ambiente está estrechamente relacionada con la elección de sistemas energéticos alternativos que sean capaces de garantizar el desarrollo sostenible de todos los países. La producción descentralizada de energía, fundamentada con acierto por los defensores del denominado camino energético suave o el camino del Sol, permite la transformación de energía con tecnologías preferentemente no contaminantes en el lugar de consumo. Con esto se reducirían de modo considerable las pérdidas energéticas ocasionadas por los procesos de transmisión y distribución. La celda combustible constituye la tecnología de mayor potencial para revolucionar el panorama energético en este siglo. Como transformador electroquímico, la conversión energética máxima posible se define por la energía libre de reacción en un régimen de temperatura relativamente bajo. En este trabajo se realiza un análisis de los diferentes tipos de celdas combustibles y se caracteriza el estado actual de esta tecnología. Además, se analiza el uso del hidrógeno solar en celdas combustibles.

Palabras clave: celda, combustible, hidrógeno, transformación descentralizada de energía, cogeneración

*The solution to the actual energy problems and to the progressive damage of the environment is closely related with the election of alternative energy systems that it be able to guarantee the sustainable development of all the countries. The decentralized energy production, based with success by the defenders of the one denominated soft energy way or Sun way, allows the energy transformation with technologies preferably not pollutants in the place of consumption. It would decrease in a considerable way the energy losses caused by the transmission processes and distribution. The fuel cell constitutes the technology of more potential to revolutionize the energy panorama in this century. As electrochemical transformer, the possible maximum energy conversion is defined for the free energy of reaction in a relatively low regimen of temperature. In this work it is carried out an analysis of the different types of fuel cells and the current state of this technology is characterized. Also, the use of the solar hydrogen is analyzed in fuel cells.*

*Key words: fuel cell, hydrogen, decentralized energy transformation, cogeneration*

## INTRODUCCIÓN

Los seres humanos necesitan de diversas fuentes energéticas para la alimentación, la calefacción o el acondicionamiento y ventilación de locales, para la iluminación, los medios de transporte y comunicación, los equipos y maquinarias para la industria, la agricultura, la construcción y otros sectores. El pasado siglo se considera como el siglo de los combustibles fósiles debido al uso no racional de las reservas mundiales de combustibles convencionales para satisfacer este elevado consumo energético.

En este siglo se plantea un mayor uso de las fuentes renovables de energía y una mayor eficiencia energética, de modo tal que se propicie el desarrollo sostenible de todos los países. No obstante, la utilización "inteligente" de la energía es aún muy limitada debido a barreras de carácter técnico, económico, regulacional y social. La producción descentralizada de energía eléctrica permite satisfacer las demandas energéticas de cada comunidad con los recursos energéticos que esta disponga, disminuyendo el efecto sobre el medio ambiente y

contribuyendo a disminuir las pérdidas energéticas ocasionadas por los procesos de transmisión y distribución.

Las celdas combustibles como dispositivos electroquímicos combinan un combustible (hidrógeno, metano, gas natural) con un agente oxidante (oxígeno o aire) para de forma continua generar una potencia eléctrica y térmica que puede ser recuperada para ser más eficiente el sistema. De esta forma, se produce una conversión de la diferencia de energía química de los reactivos y los productos en un flujo de electricidad, que si se hace circular por un motor se convierte en energía mecánica. No existe ningún paso intermedio durante el cual la energía se utilice para expandir una sustancia de trabajo que produzca solo una conversión parcial de su energía térmica en energía mecánica. Constituye, por tanto, uno de los 4 procesos termodinámicos de cogeneración y una opción para la producción descentralizada de energía eléctrica y térmica.

En este trabajo se analizan las perspectivas de desarrollo que ofrece el método electroquímico para la obtención de energía eléctrica. Se muestran los diferentes tipos de celdas combustibles, caracterizándose el estado actual de esta tecnología, así como, las ventajas de su uso con hidrógeno solar como combustible. Además, se brindan datos de la aplicación de celdas combustibles.

## DESARROLLO

La solución a los problemas energéticos actuales y al progresivo deterioro del medio ambiente está estrechamente relacionada con la elección de sistemas energéticos alternativos que sean capaces de garantizar el desarrollo sostenible de todos los países. Los métodos actuales más frecuentes de producción de energía eléctrica (centrales termoeléctricas, nucleares, instalaciones de motores de combustión interna) están regidos por el Principio de Carnot y se realizan, por lo general, de forma centralizada.

El camino energético suave o el camino del Sol plantea el uso "inteligente" de la energía, con su transformación de modo no centralizado. Se fundamenta en la recuperación de la energía que se pierde en la fuente, durante la transmisión y en el momento de su uso, seleccionando para cada servicio determinado, un sistema energético óptimo. Para sus defensores, el no despilfarro de energía es el sistema más limpio para producir energía.<sup>1</sup>

WADE (World Alliance for Decentralized Energy) define la energía descentralizada como la producción de electricidad en el lugar de uso o próximo a este sin importar su cantidad ni la tecnología usada. Incluye los sistemas de cogeneración altamente eficientes y los sistemas

in situ con fuentes renovables de energía. Esta alianza tiene como misión el desarrollo de procesos de generación de "energía limpia".

Se estima que tan solo un 7 % de la generación global anual se realiza de forma no centralizada. Un mayor porcentaje de generación se ve limitado por barreras de diferentes tipos como precios no atractivos y mercados no seguros para los inversionistas, falta de conciencia acerca de la importancia regional de este tipo de generación, etc. Se destacan países como Holanda, Dinamarca y Finlandia con más del 35%, en los cuales las políticas gubernamentales han favorecido la cogeneración y el uso de fuentes renovables de energía.<sup>2,3</sup>

En contra de la descentralización se argumenta que esta conlleva un aumento de los costos. Lo anterior es cierto si se considera solo el costo de la central eléctrica, sin incluir los costos de infraestructura complementaria como las líneas de transmisión y distribución. En el caso de producción descentralizada estos últimos costos son considerablemente inferiores. Si a esto se añaden los costos medioambientales y la reducción de pérdidas energéticas, la opción de producción descentralizada de energía eléctrica se presenta como la más ventajosa.

Entre las principales tecnologías para la producción no centralizada se incluyen los motores de combustión interna, pequeñas turbinas, las celdas combustibles y los sistemas fotovoltaicos. Se considera que la tecnología de las celdas combustibles es la de mayor potencial para revolucionar el mundo energético en este siglo.

En una celda combustible, a diferencia de los métodos convencionales de combustión, el máximo aprovechamiento energético no se define por el factor Carnot entre las temperaturas de las fuentes caliente y fría. Como transformador electroquímico convierte continua y directamente la energía de un enlace químico en energía eléctrica a través de una reacción de oxidación en presencia de un catalizador, definiéndose esta transformación por la energía libre de Gibbs.

Como fuente electroquímica de corriente deben cumplir con los siguientes 3 requisitos:<sup>4</sup>

1. La mayor magnitud de la fem o tensión reversible la cual se calcula por las leyes de la termodinámica electroquímica.
2. La menor desviación posible de la diferencia de potencial entre los electrodos de la fem o tensión reversible.
3. El valor de la potencia específica lo más elevado posible, es decir, la cantidad máxima de energía que se desprende en la unidad de tiempo por unidad de masa o volumen de la fuente de corriente.

Las experiencias alcanzadas en los últimos años auguran un desarrollo vertiginoso de las celdas combustibles a mediano plazo. En este sentido el IEC TC 85 (Internacional Electrotechnical Commission Technical Committee) se prepara para su introducción masiva en el mercado y su necesaria y total seguridad e intercambiabilidad y compatibilidad con sistemas actuales. Se trabaja en la reducción de sus precios, la búsqueda de nuevos materiales menos costosos, en minimizar el área y peso que ocupan estos dispositivos, en una adecuada correspondencia entre la potencia requerida y la entregada y en aspectos relacionados con su seguridad.

Como se ha explicado anteriormente, las celdas combustibles son dispositivos electroquímicos que consisten en 2 electrodos separados por un electrolito que puede ser sólido o líquido. Precisamente toman su nombre según el tipo de electrolito y las reacciones que tienen lugar en el ánodo y en el cátodo que son diferentes según el tipo de celda combustible, tal como se aprecia en la tabla 1.

ejemplo, NAFION®, producto de DOW) que trabaja a bajas temperaturas desde la temperatura ambiental hasta 100 °C, preferentemente 80 °C. La conductividad iónica se consigue manteniendo la membrana húmeda. Requieren de una exhaustiva limpieza del combustible y su eficiencia es de 30-35 %, aunque pueden alcanzar hasta un 50 %.<sup>5</sup>

Las celdas combustibles UTC del tipo ácido fosfórico, primeramente denominadas ONSI PC25, en sus diferentes modelos A, B y C, son fabricadas actualmente por UTC Fuel Cells (inicialmente, International Fuel Cell) y su socio comercial Toshiba, reportando una eficiencia total del 85 % cuando se recupera la energía térmica. Pueden trabajar conectadas a la red o también en circuitos independientes con un máximo de seguridad. A continuación se brindan los datos de estas celdas combustibles:<sup>4</sup>

- Potencia eléctrica: 200 kW / 235 kVA continuo.
- Frecuencia: 50 Hz.
- Voltaje estándar de salida: 400 V - 3 fases (existen disponibles otras opciones).

**Tabla 1**  
**Tipos de celdas combustibles, electrolitos y reacciones de electrodos<sup>5</sup>**

Tipo de celda combustible	Electrolito	Transportador de carga	Reacción anódica	Reacción catódica	Temperatura de operación
Alcalina	KOH	OH <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> +2OH <sup>-</sup> =2H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup>	½O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> =2OH <sup>-</sup>	60-120 °C
PEM	Polímero sólido (ej. Nafion)	H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> =2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup>	½O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> =H <sub>2</sub> O	50-100 °C
Acido fosfórico	Ácido fosfórico	H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> =2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup>	½O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> =H <sub>2</sub> O	~220 °C
Carbonato fundido	Carbonato de litio y potasio	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> =H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup>	½O <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> =CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	~650 °C
Cerámica	Cerámico	O <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> +O <sup>2-</sup> =H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup>	½O <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> =O <sup>2-</sup>	~1000 °C

Las celdas combustibles del tipo PEM (Proton Exchange Membrane) son particularmente interesantes para la tracción de vehículos y generadores eléctricos a pequeña escala para el suministro energético a computadoras personales. Su principal ventaja radica en su alta densidad de potencia (más de 1 W/cm<sup>2</sup> y más de 1 kW/L), aspecto este imprescindible en aplicaciones móviles. Por tanto, es el único tipo adecuado para vehículos.

En estas celdas combustibles el electrolito es una membrana que actúa como un medio ácido (por

- Eficiencia eléctrica: 40 % neto (LHV) a 100% de capacidad.
- Potencia térmica: 264 kW t (agua caliente a 60 °C a 100 % de la capacidad).
- Eficiencia total: 85 % a un 100 % de la capacidad eléctrica.
- Nivel sonoro: por debajo de 60 dBa a 10 m. Cumple con los requisitos ambientales.

Son las más utilizadas actualmente con más de 235 unidades vendidas en los EUA, Canadá, Japón, Australia, Brasil y países europeos, algunas con más de 40 000 h de operación, con un precio

aproximado de 850 000 USD -se considera como precio competitivo 1500 USD/kW. Actualmente, alrededor de 12 empresas desarrollan o venden este tipo de celda combustible. La mayoría de estas celdas están operando con gas natural.<sup>5</sup>

En la tabla 2 se resumen las principales características, aplicaciones y estado de desarrollo de diferentes tipos de celdas combustibles.

Como se aprecia en la anterior tabla, las celdas que operan a altas temperaturas son las que utilizan una mayor gama de combustibles pues demandan menores

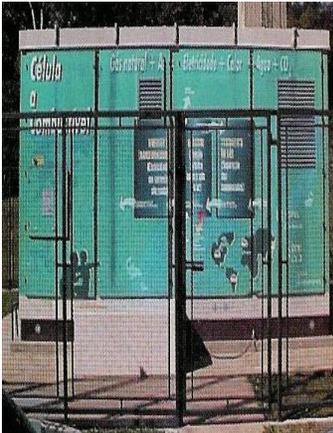
exigencias en cuanto a la preparación del combustible y su limpieza. Las del tipo de carbonato fundido pueden internamente convertir el gas natural en hidrógeno. Para todos los tipos de celdas, el contenido de azufre debe ser extraído del combustible para una correcta operación de las mismas.

En Curitiba, Brasil se encuentran instaladas, desde el año 2001, 3 celdas combustibles del tipo ácido fosfórico de 200 kW cada una. El resumen de los costos y beneficios económicos de la operación de estas celdas combustibles se muestran en la tabla 3.

**Tabla 2**  
**Características y aplicaciones de diferentes tipos de celdas combustibles <sup>6</sup>**

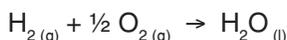
Tipos de celdas combustibles	Combustible	Eficiencia (%)	Densidad de potencia	Aplicaciones	Estado de desarrollo
PEM	H <sub>2</sub> , reformado	40-50	+ 1 W/cm <sup>2</sup>	Vehículos, electrónica y estacionario ~ 80 kW	Comercial
Metanol directo (DMFC)	Metanol y Etanol	~ 20	0,60 W/cm <sup>2</sup>	Carros, celulares <1 kW hasta 70 kW	Prototipo
Cerámica	H <sub>2</sub> , CO y CH <sub>4</sub>	> 60	0,5 W/cm <sup>2</sup>	Estacionario	I+D
Carbonato fundido	H <sub>2</sub> , CO y CH <sub>4</sub>	> 60	-	Estacionario + 250 kWh	Gran escalado
Ácido fosfórico	H <sub>2</sub> , reformado	40-50	-	Estacionario + 250 kWh	Comercial
Alcalina	H <sub>2</sub>	60-70	-	Portátil ~ 60 kW	Utilizada

**Tabla 3**  
**Análisis económico de operación de celdas combustibles en Curitiba, Brasil <sup>7</sup>**

	Costos (USD/MW-h)	Conectada a la red	Independiente	Generación máxima
	Inversión	122	145	92
	Combustible	62	65	59
	Mantenimiento	8	10	6
	TOTAL	192	220	159
	Beneficios (USD/MW-h)			
	Electricidad	32	32	32
	Agua caliente (ahorro de gas)	4	5	68
	TOTAL	36	37	100

De las experiencias en la operación de celdas combustibles y sus efectos económicos se debe notar la imperiosa necesidad de reducir los costos actuales de fabricación de estos dispositivos electroquímicos. Lo anterior se podrá alcanzar con una producción en serie y materiales menos costosos. De este modo la energía transformada en las celdas combustibles de forma no centralizada será menos costosa, posibilitando así que países con escasos recursos económicos accedan a esta tecnología.

El uso del hidrógeno y el concepto de celda combustible están estrechamente relacionados. El hidrógeno solar como portador energético puede ser utilizado con éxito en la generación de electricidad, energía térmica y en la transportación. En las celdas combustibles se combinarían químicamente el hidrógeno y el oxígeno para cogenerar electricidad y energía térmica sin necesidad de la combustión y sin desprender de forma directa gases de efecto invernadero. De la reacción química que se muestra a continuación se obtendría como producto solo agua.



Como combustible para automóviles tiene las siguientes ventajas:

- Alta densidad energética.
- Mayor temperatura de autoignición (585 °C), permitiendo mayores valores de relación de compresión y por tanto un mayor rendimiento térmico.
- Se aproxima más al proceso ideal del ciclo Otto.
- Amplio intervalo de los límites de inflamabilidad (4 a 75 %) lo cual da una mayor flexibilidad en la selección de las relaciones combustible-aire.
- No es contaminante.
- Es inagotable, pues es constituyente del agua, el elemento más abundante en la naturaleza.
- Es perfectamente compatible con los motores de combustión interna -Otto, Diesel y las turbinas de gas.

En la evaluación del impacto ambiental de la producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno debe valorarse, en primera instancia, la fuente de energía primaria para la obtención del hidrógeno. Se ha propuesto la no utilización de combustibles fósiles o nuclear, pues esto anularía la limpieza del hidrógeno. Solo deben utilizarse energías renovables para que sea realmente un hidrógeno solar.

Otro aspecto a considerar está en los problemas de seguridad en la transportación y uso del hidrógeno. El hecho de ser el hidrógeno inflamable y explosivo, crea cierta preocupación para los efectos de su distribución y uso.

Sin embargo, es posible disminuir su grado de explosividad por medio de la adición de compuestos, además, de las medidas adecuadas en tal sentido. Es preciso recordar que tanto la gasolina, el gas natural y el gas licuado son también peligrosos y, sin embargo, su manufactura, transporte y uso es común. A esto se suma que el hidrógeno presenta la ventaja de que sus límites inferiores de inflamabilidad y detonabilidad son mayores y que debido a su ligereza y mayor difusibilidad, se facilita su rápida dispersión en la atmósfera. De esta forma, se reducen las posibilidades de que su concentración alcance dichos límites en el aire.

Su mayor rapidez de combustión, combinada con su baja densidad, hace que las llamas provocadas por el hidrógeno se eleven en el aire en 2 o 3 min, por lo que es menos destructivo que otros combustibles. Se presenta además el hecho de las muertes por asfixia, en caso de incendios, debido a los gases tóxicos emitidos por las llamas de los combustibles. Un análisis para el caso del hidrógeno, demuestra que no existe esta posibilidad, pues de la combustión del mismo solo se obtiene agua.

Sus grandes desventajas con respecto a la seguridad son: la facilidad con que puede escapar (fugas) y el hecho de que su llama sea invisible. Para evitar esto se desarrollan métodos de detección del hidrógeno. Para su uso como combustible, el hidrógeno puede en principio ser transportado y manipulado en forma gaseosa, almacenado en recipientes presurizados; combinado químicamente en líquidos o híbridos metálicos, o almacenado en forma licuada en recipientes al vacío altamente aislados. El hidrógeno gaseoso, por lo ligero que es, necesita naturalmente contenedores y tuberías bien selladas y concebidas con cuidado. Puede ser también combinado con tolueno o con similares, dando lugar a compuestos de fácil almacenamiento, como por ejemplo el metilciclohexano.

También resulta de interés el estudio de los efectos que provocaría en la atmósfera el uso del hidrógeno en grandes cantidades y su inevitable fuga. Investigadores del Instituto de Tecnología de California han afirmado que la concentración del hidrógeno de fugas pudiera provocar una reducción de hasta un 10 % del ozono atmosférico. Estos científicos asumen de un 10 a un 20 % de fugas, lo que representaría una cantidad de hidrógeno de 4 a 8 veces superior a lo entregado actualmente por la actividad humana y el doble o el triple de todas

las entradas de hidrógeno al medio ambiente, ya sean fuentes naturales o humanas.

Este hidrógeno fugado pudiera ser absorbido por los suelos o reaccionar con otros componentes en la atmósfera. El primero de estos mecanismos, que no es comprendido en su totalidad, está libre de consecuencias para el medio ambiente. Por el contrario, de no ser absorbido por los suelos se mezclaría con el aire formando cantidades adicionales de agua en las partes altas de la atmósfera lo que provocaría, a grandes altitudes, una elevada humidificación y un enfriamiento a bajas altitudes.

Todo esto alteraría la cadena de reacciones químicas que originan el ozono. El balance de estos 2 procesos es la clave para el estudio del impacto ambiental del uso del hidrógeno. La reducción de las fugas en los sistemas de hidrógeno repercute de forma efectiva tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

## CONCLUSIONES

La producción descentralizada de energía eléctrica permite satisfacer las demandas energéticas de cada comunidad con los recursos energéticos que esta disponga, disminuyendo el efecto sobre el medio ambiente y contribuyendo a disminuir las pérdidas energéticas ocasionadas por los procesos de transmisión y distribución.

El método electroquímico ofreció y ofrece aún perspectivas superiores de desarrollo, ya que en su funcionamiento no hay pérdidas inherentes al Principio de Carnot. Especial atención se le debe brindar al estudio de las sobretensiones, junto con las reacciones electrónicas, como causas de la caída de potencial de una celda respecto al valor correspondiente a la condición de reversibilidad.

El verdadero sistema que permite la acumulación y el transporte de grandes cantidades de energía es el hidrógeno, siendo este un combustible relativamente seguro y limpio. Su generación debe ser solo a partir de fuentes renovables de energía para de este modo obtener un verdadero hidrógeno solar. En los procesos de transporte y uso se debe evitar sus fugas al medio ambiente. La tecnología de las celdas combustibles constituye la de mayor potencial para provocar las necesarias transformaciones en el panorama energético mundial. La utilización del hidrógeno solar en celdas combustibles permite la descentralización

de la energía eléctrica y una vía de cogeneración con una alta eficiencia.

Los proyectos de investigación y desarrollo, así como las inversiones en esta temática deberán encaminarse a consolidar una sólida estructura económica y tecnológica basada en el hidrógeno solar, que permita reducir los costos de fabricación del equipamiento tecnológico relacionado con las celdas combustibles y el hidrógeno solar.

## REFERENCIAS

1. **Turrini, E.:** *El camino del Sol*, Ed. Cubasolar, La Habana, Cuba, 1999.
2. **Brown, Michael:** "Onwards from 7 % New Survey from WADE Quantifies Decentralized Energy Worldwide" in *Cogeneration and On-Site Power Production*, Vol. 3, No. 6, November-December, 2002, pp. 25-29.
3. **Fraser, Peter:** "DG Within Liberalized Electricity Markets and Prospects to 2030", in *Cogeneration and On-Site Power Production*, Vol. 4, No. 1, pp.31-40, January-February, 2003.
4. **Gavilán Yodú, J.:** "El hidrógeno solar como portador energético sostenible", Tesis en opción al título de Máster en Eficiencia Energética. CEEFE, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba, 2001.
5. **Hoogers, Greg:** "Fuel Cells for Cogeneration, Technology and Markets Worldwide" in *Cogeneration and On-Site Power Production*, Vol. 4, No. 4, pp.80-91, July-August, 2003.
6. H2FC Investor's Weekly Newsletter. <http://www.h2fc.com>.
7. **Do Nascimento, Pedro Augusto:** "Fuel Cells: a Pioneering Experience in the Southern Hemisphere" in *Cogeneration and On-Site Power Production*. Vol. 3, No. 5, pp. 21-25, September-October, 2002.
8. **Gavilán Yodú, Julio:** "Estudio del impacto ambiental de la producción de hidrógeno solar" en Memorias de Investigación 2002 de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2003.

## AUTOR

### Julio Alberto Gavilán Yodú

Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias de la Educación Superior, Máster en Eficiencia Energética, Instructor, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba  
e-mail: gavilan@ceefe.uo.edu.cu