

# *Estudio y Resultados Experimentales de la Eficiencia en la Producción de Energía Eléctrica con una Celda de Combustible PEM*

Adrián E. Gonnet<sup>(1)</sup>, Sandra Robles<sup>(2)</sup> y Lilián Moro<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Facultad Regional Bahía Blanca UTN, 11 de Abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina, Tel: 0291-156427463, gonnet@frbb.utn.edu.ar.

<sup>(2)</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, srobles@uns.edu.ar.

<sup>(3)</sup> Facultad Regional Bahía Blanca UTN, 11 de Abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina, lmoro@frbb.utn.edu.ar.

**Resumen** - En este trabajo se detalla la instalación y puesta en marcha de una celda comercial marca Ballard que utiliza hidrógeno puro como combustible y aire como oxidante, y se estudia el rendimiento global del sistema.

El sistema instalado consta de la celda, un convertidor CC/CC, una batería, un inversor de CC/CA y la carga. Se analiza el comportamiento del sistema en forma experimental y para distintos estados de carga.

En el trabajo también se detallan los aspectos técnicos, de mantenimiento y de seguridad adoptados en la instalación del sistema en el Laboratorio. Las conclusiones sobre la eficiencia, el mantenimiento, y la seguridad, sirven para establecer comparaciones de funcionalidad de este tipo de dispositivo en la provisión de energía eléctrica de respaldo a la red comercial, o cuando no es posible acceder a esta, teniendo en cuenta que en el futuro se pueda obtener hidrógeno de manera accesible.

**Palabras Claves:** Celda de combustible, hidrógeno, eficiencia energética

## *Study and Experimental Results of Efficiency in the Production of Electricity with a PEM Fuel Cell*

**Abstract** - Installation and starting up of the fuel cell Ballard trade mark that uses pure hydrogen as fuel and air as oxidant is detailed in this paper; also the performance of the entire system is studied.

The installed system consists of the fuel cell itself, a DC/DC converter, a battery, a DC/AC inverter and the load. The behaviors of the system on an experimental basis and for different states of load also are analyzed in the present work.

The paper details the technical aspects of maintenance and security arrangements in its installation in the laboratory. The findings are used to make comparisons of the efficiency, maintenance and safety of these devices in providing backup power or disabling access to the grid, taking into account that in the future will get hydrogen in an accessible way.

**Keywords:** Fuel cells, hydrogen, energy efficiency

## INTRODUCCIÓN

El panorama actual de la producción de energía presenta tres problemas graves bien conocidos: el agotamiento de los recursos no renovables en un tiempo finito y no compatible con la esperanza de vida en el planeta y la contaminación ambiental con el consiguiente y ya innegable calentamiento global relacionado con la quema de los combustibles fósiles. Estos problemas motivan la búsqueda de fuentes de energía perdurables y limpias que, junto con otras medidas como el ahorro y la eficiencia en el proceso de producción y consumo de energía, solucionen el abastecimiento energético a medio y largo plazo de manera compatible con las formas de vida en la Tierra.

En este contexto el hidrógeno, un transportador de energía, parece por ahora el candidato idóneo para que

mediante su utilización en las celdas de combustible se convierte su energía química en electricidad, agua y calor, con una eficiencia elevada y sin emisión de contaminantes al ambiente. Las celdas de combustible de membrana intercambiadora de protones (PEM) tienen una eficiencia en la conversión de energía eléctrica del 60%, y pueden llegar a alcanzar un 80%, si se aprovecha el calor y el agua caliente mediante la cogeneración de energía. Además se logran reducir en más del 90 % las emisiones de contaminantes al medio ambiente (Wang et al., 2011).

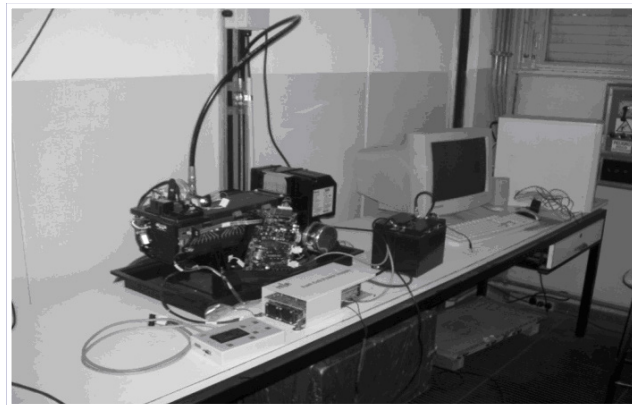
## DESARROLLO

### *Descripción de la Celda*

La celda, modelo Nexa™, se alimenta con hidrógeno y provee una potencia nominal de 1.200 W. La tensión de salida varía con la corriente en un rango que va de 43 V a circuito abierto y a 26 V a plena carga (Ballard Power Systems, 2003).

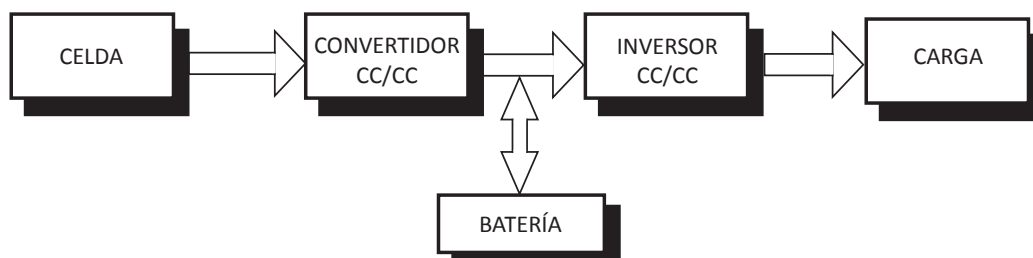
Está constituida por una batería de celdas unitarias y los equipos auxiliares que proveen el hidrógeno, el aire oxidante y el aire de enfriamiento. Posee sensores incorporados para monitorear el rendimiento y una placa de control con un microprocesador para lograr un funcionamiento totalmente automático. También posee un sistema de seguridad para permitir su funcionamiento en lugares cerrados.

Una fotografía del sistema instalado en el Laboratorio se muestra en la Fig. 1.



*Fig. 1 - Sistema instalado en el laboratorio*

El sistema para el acondicionamiento de la potencia de salida se compone de un convertidor de CC/CC BSZ PG 1200, dos baterías recargables de 12 V/18 Ah, un convertidor de norma RS232 a norma RS485 para comunicaciones serie con la PC, un convertidor de CC/CA 1500 W y un relé para conexión y desconexión de la carga, como se indica en la Fig. 2 (BSZ PG1200 Technical Description).



*Fig. 2 - Esquema del sistema de acondicionamiento de la potencia de salida*

Se incorpora un sensor de presencia de hidrógeno y un sistema de alarma para dotar de seguridad al recinto de instalación de la celda (Scott Health & Safety).

La celda incorpora un proceso de rejuvenecimiento automático mediante el cual se corrigen las pérdidas por almacenaje y se recupera el rendimiento durante un apagado. Para mantener el rendimiento máximo es recomendable que el proceso se realice cada 2 o 3 meses o después de un tiempo prolongado de almacenaje.

La celda requiere el reemplazo del filtro de aire de entrada cada 500 hs. de funcionamiento, aunque esto dependerá de las condiciones ambientales de operación.

El intercambiador de humedad incorporado para humidificar el aire de entrada requiere el reemplazo cada 800 hs. Este reemplazo requiere de personal capacitado.

### Cálculo de la eficiencia

Las celdas de combustible presentan una alta eficiencia. Para calcular su valor se debe hacer una distinción entre la eficiencia de la reacción electroquímica que en ellas se produce y la eficiencia de todo el conjunto que forma una celda de combustible, incluyendo los sistemas auxiliares y el sistema de acondicionamiento de potencia.

La energía liberada a través de la entalpía  $\Delta H_0$  tiene un valor de  $-285,8 \text{ kJmol}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$  y 1 atmósfera de presión, cuando se combinan el hidrógeno y oxígeno para formar agua, según la reacción:



Se debe hacer notar que los cambios en la temperatura afectan más a este valor que los cambios de presión.

De esta energía la porción disponible como trabajo útil está dada por la variación de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ), cuyo valor a  $80^\circ\text{C}$  y 1 atmósfera, es  $-228,2 \text{ kJ mol}^{-1}$  (Larminie, Dicks, 2003).

El voltaje de cada celda individual se relaciona con la energía libre de Gibbs mediante:

$$V_{ideal} = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (2)$$

donde  $n$  es el número de electrones involucrados en la reacción expresado en mol de electrones,  $F$  la constante de Faraday =  $96.500 \text{ Coulombs/mol}$  de electrones.

Así el valor de voltaje máximo teórico ( $V_{ideal}$ ) que cada celda puede generar a  $80^\circ\text{C}$  y 1 atmósfera es de  $1,18\text{V}$ .

La eficiencia térmica o termodinámica de una celda se define como la relación entre la energía útil producida y la variación de entalpía de los productos y los reactivos en la reacción:

$$\eta = \frac{\text{energía útil}(\Delta G)}{\Delta H} \quad (3)$$

Reemplazando se obtiene la eficiencia ideal de la celda operando en forma reversible:

$$\eta_{ideal} = \frac{228,2 \text{ kJmol}^{-1}}{285,8 \text{ kJmol}^{-1}} = 0,8 \quad (4)$$

En un funcionamiento ideal el voltaje de  $1,18\text{V}$  por celda, debería mantenerse para cualquier estado de carga, sin embargo debido a las pérdidas de polarización el voltaje cae cuando aumenta la corriente.

En una celda real el voltaje puede llegar a  $1,1\text{V}$  a circuito abierto y puede caer a un valor de  $0,5\text{V}/0,6\text{V}$  en funcionamiento normal.

Es conveniente expresar la eficiencia real de una celda en función de la relación entre el voltaje real y el voltaje ideal, por lo tanto (U. S. Department of Energy, 2005):

$$\eta_{real} = \frac{\text{energía útil}}{\Delta H} \tag{5}$$

$$\eta_{real} = \frac{\text{potencia útil}}{\Delta G} \times 0,8 \tag{6}$$

$$\eta_{real} = \frac{V_{actual} \times I}{V_{ideal} \times I} \times 0,8 = \frac{V_{actual}}{V_{ideal}} \times 0,8 \tag{7}$$

$$\eta_{real} = \frac{V_{actual}}{1,18} \times 0,8 = 0,68 \times V_{actual} \tag{8}$$

donde  $V_{actual}$  es el voltaje real de cada celda individual que componen la batería de celdas para las distintas intensidades de corriente de salida.

El la Tabla 1 se listan los valores medidos de la tensión de celda individual ( $V_{actual}$ ), los valores de potencia entregada por la batería celdas ( $P$ ) y la potencia que consumen los equipos auxiliares ( $P_{AUX}$ ), para distintos valores de corriente.

Corriente [A]	$V_{actual}$ [V]	$P$ [W]	$P_{AUX}$ [W]
5	0,83	195	50
10	0,77	360	80
15	0,72	510	100
20	0,70	660	120
25	0,69	812	150
30	0,68	960	180
35	0,64	1050	200
40	0,59	1120	220
45	0,58	1237	260

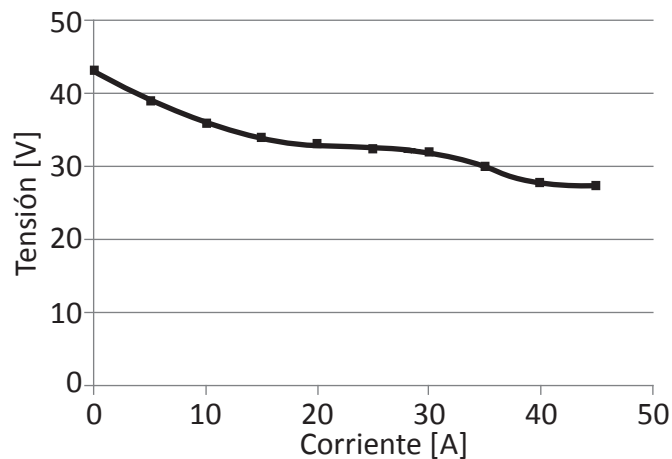
**Tabla 1** - Valores medidos de tensión de celda individual, valores medidos de potencia de salida de la batería de celdas y valores de potencia auxiliar

En la Tabla 2 se indican los valores medidos de consumo de hidrógeno y de producción de agua de la batería de celdas para los distintos valores de corriente.

Corriente [A]	Hidrógeno [slpm]	Agua [lph]
5	2	0,10
10	3,8	0,17
15	5,5	0,28
20	7,5	0,36
25	9,2	0,44
30	11,3	0,55
35	13,2	0,65
40	15,1	0,74
45	17,2	0,85

**Tabla 2** - Valores medidos de consumo de hidrógeno y agua producida

En la Fig. 3 se representan los valores medidos de la tensión de la batería de celdas en función de las distintas corrientes de carga.



**Fig. 3** - Tensión de salida de la batería de celdas para distintas corrientes de carga

En la práctica no todo el combustible entregado a la celda se consume en la reacción debido fundamentalmente a la pequeña proporción de hidrógeno que difunde a través de la membrana y en menor medida por la circulación de electrones a través de la misma, por lo que se define un coeficiente de utilización (Larminie, Dicks, 2003):

$$\mu_f = \frac{m_{\text{reac}}}{m_{\text{ent}}} \quad (9)$$

donde  $m_{\text{reac}}$  es la masa de combustible que reacciona en la celda y  $m_{\text{ent}}$  es la masa de combustible entregada a la celda. Finalmente la eficiencia de la celda según su tensión de salida se expresa:

$$\eta_{cel-1} = \mu_f \times \eta_{real} = \mu_f \times 0,68V_{actual} \tag{10}$$

El valor de  $\mu_f$ , no se calcula en este trabajo y se adopta un valor recomendado por la literatura de 0,95 [4].

Otra forma útil de evaluar la eficiencia es relacionando la potencia eléctrica de salida deseada referida al consumo de combustible necesario para la misma:

$$\eta_{cel-2} = \frac{E_{elec}}{E_{quim}} \tag{11}$$

donde  $E_{elec}$  es la energía eléctrica entregada por la celda que se mide para los distintas corrientes de salida y  $E_{quim}$  la energía química del hidrógeno abastecido a la celda que se obtiene por dos métodos. Un método es midiendo los litros de hidrógeno consumidos.

El otro método es calculando los litros de hidrógeno consumidos a partir del flujo másico ( $m_h$ ) de hidrógeno cada 1.000 A de corriente (U. S. Department of Energy, 2004):

$$m_h = \left( \frac{P}{V_{actual} \times 1.000} \right) \times 0,037605 \left[ \frac{kg}{hora} \right] \tag{12}$$

donde  $P$  es la potencia eléctrica medida a la salida de la batería de celdas.

Para obtener los litros por minuto de hidrógeno consumido se utiliza la densidad del hidrógeno (0,0838 kg.m<sup>-3</sup>) y la densidad de energía del hidrógeno en condiciones estándar considerando el poder calorífico superior (3,20 Wh.L<sup>-1</sup>).

El valor obtenido del consumo de hidrógeno debe afectarse por el coeficiente de utilización y además debe tenerse en cuenta que una proporción del combustible se utiliza para alimentar los equipos auxiliares. Los datos de la potencia que requieren los equipos auxiliares se obtienen del manual del fabricante.

En la Fig. 4 se representan los valores medidos y calculados de los litros de hidrógeno consumidos por la celda para distintos valores de corriente.

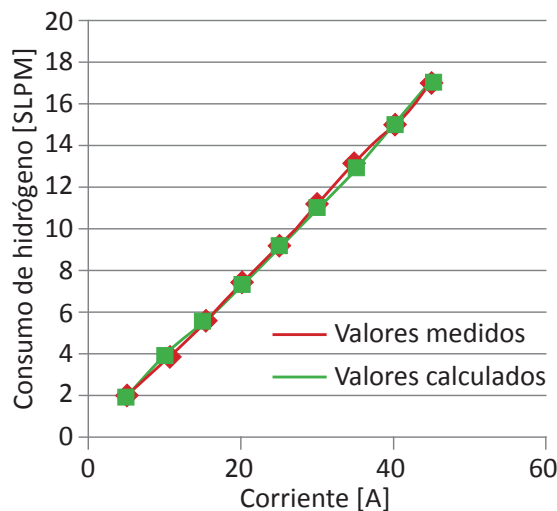


Fig. 4 - Consumo de hidrógeno medido y calculado

Con las eficiencias  $\eta_{cel-2}$ , según valores calculados y según valores medidos y la eficiencia  $\eta_{cel-1}$ , se construyen las curvas de eficiencia de la Fig. 5.

Al considerar los rendimientos del convertidor de CC/CC,  $\eta_{cc}$  y del convertidor de CC/CA,  $\eta_{ca}$  se obtiene la eficiencia total del sistema (U. S. Department of Energy, 2004):

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{cel} \times \eta_{cc} \times \eta_{ca} \tag{13}$$

Esta eficiencia total es la que hay que tener en cuenta a la hora de comparar este sistema con otros sistemas tradicionales.

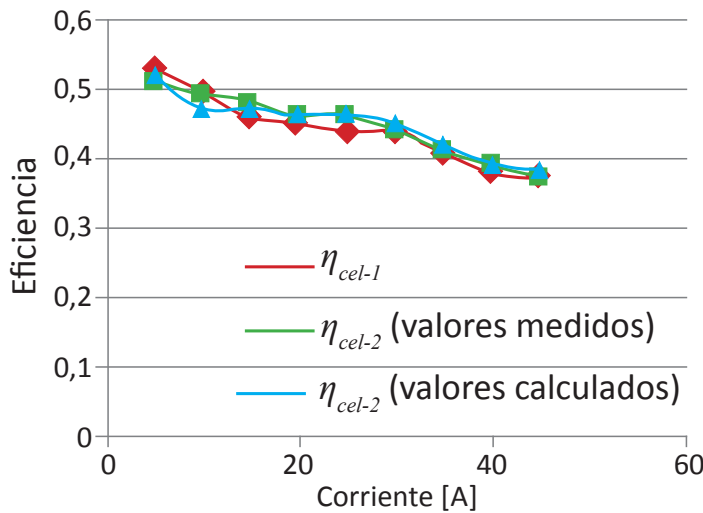


Fig.5 - Eficiencias

La eficiencia puede incrementarse con la cogeneración, es decir el aprovechamiento del calor y el agua producida durante la reacción.

La cantidad de agua producida se obtiene a partir del cálculo del flujo másico  $m_{agua}$  (Larminie, Dicks, 2003):

$$m_{agua} = 9,34 \times 10^{-8} \left( \frac{P}{V_{actual}} \right) \left[ \frac{kg}{s} \right] \tag{14}$$

Para obtener los litros de agua por hora a partir de esta ecuación se utiliza el valor de la densidad del agua.

Los litros de agua calculados de esta manera se comparan con los litros de agua medidos para distintas corrientes de salida y se muestran en la Fig. 6.

### CONCLUSIONES

La eficiencia de la celda de combustible hallada experimentalmente por los distintos métodos refleja el comportamiento esperado según el modelado teórico. El consumo de combustible crece linealmente con la corriente.

La eficiencia varía desde un valor de 0,53 hasta 0,38 dado que la misma decrece con el incremento de la corriente de salida.

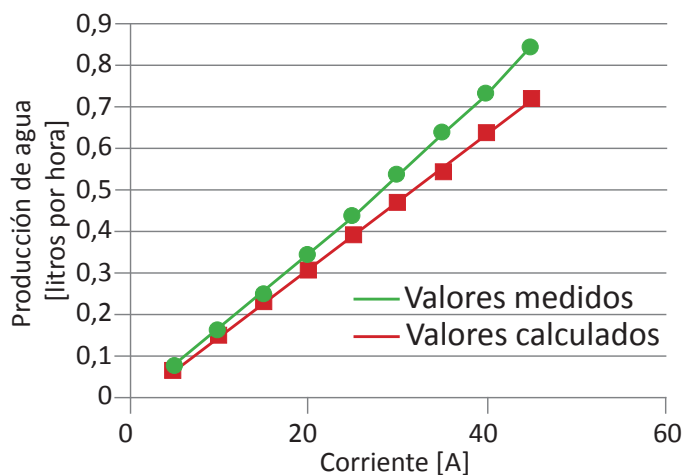


Fig. 6 - Producción de agua para distintos valores de corriente

Se comprueba que la cantidad de agua producida por la celda y la estimada teóricamente arroja resultados aproximados, donde la diferencia se atribuye al consumo de los equipos auxiliares cuyo valor no fue tenido en cuenta en este cálculo.

Al afectar los rendimientos de los dispositivos utilizados en el equipamiento destinado al acondicionamiento de la potencia de salida es posible hallar el rendimiento total de la planta de generación.

Los mantenimientos realizados a la celda determinaron la sencillez de su operación y automatismo. La única dificultad para un usuario final es el reemplazo del intercambiador de humedad, para el cual se necesitan ciertos conocimientos previos del despiece del dispositivo.

## REFERENCIAS

- Wang, Chen, Mishler, Chan Cho, Cordobes Adroher. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells Technology, applications, and needs on fundamental research. Applied Energy; 2011 88(4): 981-1007
- Ballard Power Systems Inc, Nexa™ Power Module User's Manual, 2003.
- BSZ PG1200 Technical Description, Isle GmbH, Limenou, Germany, version 1.2.
- Scott Health & Safety, Freedom™ 5000, Universal Analog gas Transmitter.
- Larminie, Dicks, "Fuel Cell System Explained", Chichester, U. K. Wiley, 2003, cap. 2.
- U. S. Department of Energy, "Fuel Cell Handbook" (sevent edition), Morgantown, West Virginia, 2004, cap. 2, 8 y 9.