

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE – PEM.**

A. Rodríguez-Castellanos, S. Citalán-Cigarroa, J. L. Díaz-Bernabé, O. Solorza-Feria\*

Depto. Química, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN,

A. Postal 07360, México D.F., México.

Tel: 57473800 ext. 4473, Fax 57473389, [acastella@cinvestav.mx](mailto:acastella@cinvestav.mx)

### **RESUMEN**

La generación de energía eléctrica en México básicamente proviene de la combustión de las reservas agotables de combustibles fósiles, produciendo emisiones de gases contaminantes que se liberan a la atmósfera, contribuyendo con ello al calentamiento global y al cambio climático. El hidrógeno será un combustible importante para la producción de energía eléctrica libre de contaminantes, por lo que existe la necesidad de desarrollar y construir una gran variedad de sistemas y dispositivos para tal efecto.

Se presenta en este trabajo experimental el diseño, construcción y caracterización de un generador de energía eléctrica, el cual está constituido por tres celdas de combustible tipo PEM; electrónica de potencia y sistemas auxiliares de alimentación del hidrógeno y de aire. El diseño de las celdas se realizó utilizando el software AutoCAD, la construcción de los platos colectores de corriente mediante una fresadora de control numérico CNC y los ensambles por medio de una cortadora láser.

La caracterización se realizó mediante ensayos de polarización potencioestática. Las condiciones de operación con las que se caracterizó y acopló la celda fueron: alimentación del combustible ( $H_2$ ) a temperatura ambiente y presión de 0.1 atm. (1.5psi), alimentación del oxidante (aire) mediante ventilación forzada y con bombas. Temperatura de operación de las celdas de 20 a 70 °C. Los ensambles membrana-electrodo (MEA) están formados por membrana Gore-Selet y Nafion, difusores de tela de carbón con carga de catalizador de Pt (20% peso/C) de 0.5 mg/cm<sup>2</sup>, tanto en ánodo como en cátodo. Los platos colectores de corriente utilizados son de grafito de alta densidad con un espesor de 5 mm. Se presentan los resultados de la puesta en operación del generador de energía eléctrica.

## **1.- Introducción**

En la actualidad el uso de los combustibles derivados del petróleo produce emisiones contaminantes, por lo tanto, afecta el cambio climático, provocando el calentamiento global y deterioro en la salud de los seres vivos. Muchos laboratorios e instituciones del mundo han reportado prototipos en desarrollo y comercialización de dispositivos basados en la tecnología de las celdas de combustible, esto ayudará a disminuir la dependencia energética de los hidrocarburos.

Las celdas de combustible con membrana polimérica de conducción protónica son dispositivos que producen energía eléctrica C.D., mediante una reacción electroquímica que ocurre en los electrodos que se encuentran en su interior cuando se les alimenta hidrógeno (combustible) y oxígeno (oxidante), para producir una densidad de corriente, agua y calor, este proceso no produce contaminantes [1].

La versatilidad que presentan las celdas de combustible como son el tamaño, alta eficiencia, cero emisiones contaminantes y mantenimiento mínimo por no tener piezas que se muevan en el sistema, se les ha encontrado un gran número de aplicaciones en sistemas tales como el transporte, estacionarios y portátiles.

## **2.- Condiciones experimentales.**

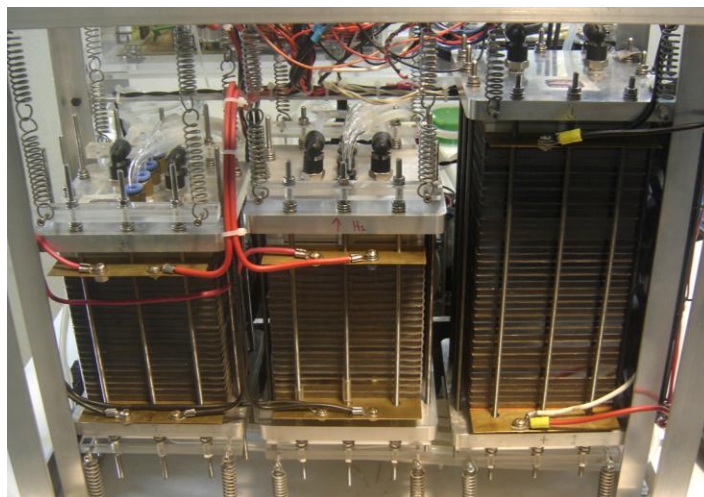
### **2.1.-Celdas de combustible.**

El diseño de las tres celdas de combustible se realizó utilizando el software AutoCAD, tomando en cuenta los diferentes diseños que se proponen en la literatura [2-3-4-5] y la construcción de los platos monopolares, bipolares y finales de aluminio se maquinaron mediante una fresadora de control numérico CNC, los empaques, membranas y piezas de acrílico se cortaron por medio de una cortadora láser.

Las celdas de combustible, están constituidas por platos de carbón de alta densidad con un espesor de 5mm, 100mm de ancho y 100mm de largo, el diseño de campo de flujo del gas para el ánodo y cátodo es en forma de canales rectos transversales, láminas de latón para colectar la corriente, platos de acrílico para canalizar la entrada y salida del hidrógeno y

aire, platos finales de aluminio, empaques de silicón y espárragos de acero inoxidable. Entre cada plato colector de corriente existe un ensamble membrana-electrocatalizador, MEA, los cuales están formados por membrana Nafion® NRE-212, difusores de tela de carbón con carga de catalizador de Pt al 20% peso/C con cargas de  $0.5 \text{ mg/cm}^2$ , tanto en el ánodo como cátodo. El desempeño de las celdas de combustible se determinó mediante polarización potencioestática en un módulo de pruebas.

En la figura 1 se muestran las tres celdas de combustible, a la izquierda la celda #1 de 100W con 20 ensambles (MEA), al centro la celda #2 de 140W con 21 ensambles y a la derecha la celda #3 de 150W con 21 ensambles.

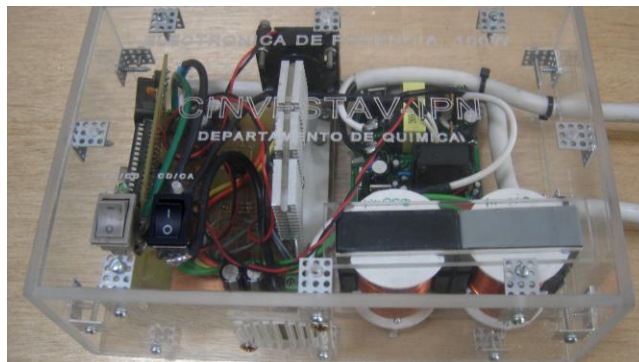


*Figura 1. Celdas de combustible con membrana de intercambio protónico.*

## 2.2.- Electrónica de potencia.

Se diseñó y construyó la electrónica de potencia de 100W para poder tener energía eléctrica regulada, la cual está constituida por un convertidor CD/CD basado en microprocesador que se acopla a la celda de combustible #1 y poder aprovechar la máxima potencia de la celda. El convertidor puede operar con un voltaje de entrada de entre 6V a 15V y producir un voltaje de salida de 13.8V con una variación de  $\pm 0.5 \text{ Volts}$ . Se acopló un inversor de 100W al convertidor, que opera con un voltaje de entrada de 13.8V con una variación de  $\pm 1 \text{ Volts}$  a 8A y produce un voltaje de salida de 115V CA, 60Hz.

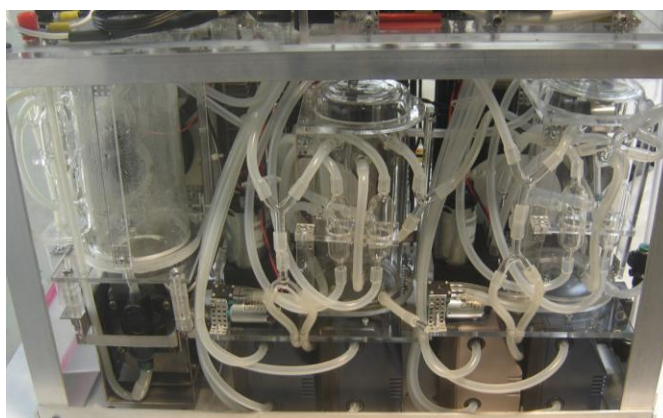
En la figura 2 se muestra una foto de la electrónica de potencia, convertidor CD/CD conectado al inversor CD/CA de 100W.



*Figura 2. Electrónica de potencia 100W, convertidor CD/CD e inversor CD/CA.*

### 2.3.- Sistemas auxiliares de alimentación del hidrógeno, aire y agua a las celdas.

Se diseñaron y construyeron tres sistemas auxiliares de alimentación de aire y recirculación del hidrógeno con humidificación, uno para cada celda de combustible [6]. Todas las bombas utilizadas para alimentar el hidrógeno, aire y agua son de diafragma y operan a una presión de 0.1 atm. Las bombas de recirculación del hidrógeno cuentan con un flujo de 4 l/min., las del aire tienen un flujo de 17 l/min. y las de agua 50ml/min. En la figura 3 se muestra una foto de la parte del generador donde se ubican los sistemas auxiliares de alimentación de los combustibles.



*Figura 3. Sistemas auxiliares de alimentación de los combustibles a las celdas.*

## 2.4.- Diagrama de las celdas de combustible y sistemas periféricos del generador.

En la figura 4 se muestra el diagrama con los componentes que integran el sistema autónomo: tanque con hidrógeno presurizado a 4 atm, sistemas auxiliares de recirculación del hidrógeno presurizado a 0.1 atm con humidificación, ventiladores para el enfriamiento de la celda #1 y alimentación del oxidante (oxígeno del aire), celdas de combustible, convertidor CD/CD e inversor CD/CA. Las líneas muestran el flujo de los diferentes estados de la energía eléctrica y combustible.

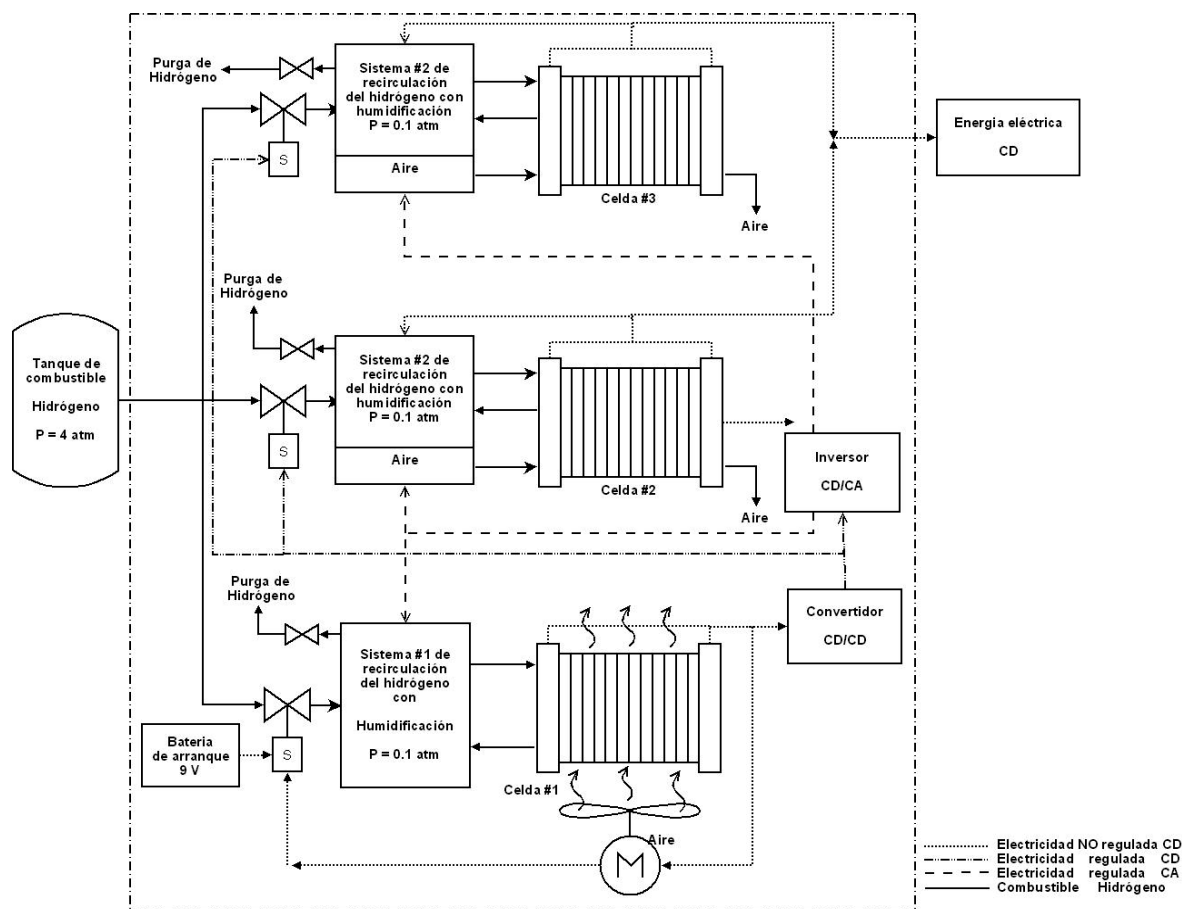


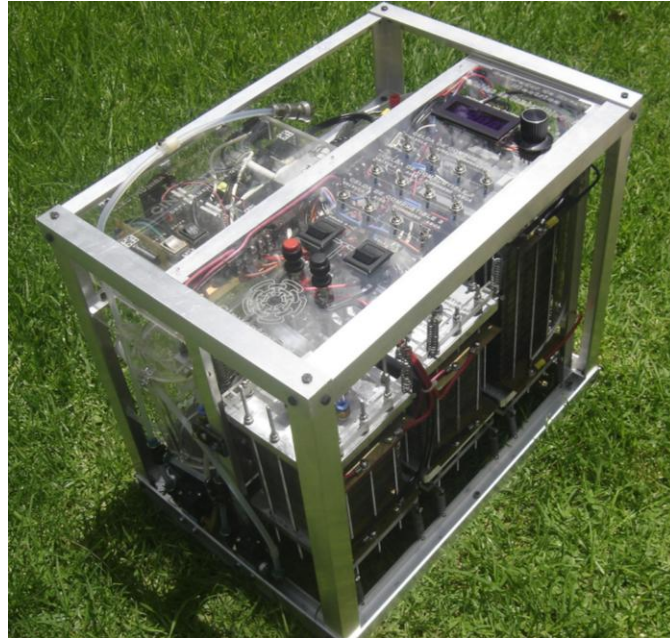
Figura 4. Diagrama del sistema autónomo basado en celdas de combustible.

## 2.5.- Generador de energía eléctrica.

El generador de energía eléctrica está constituido por un gabinete con ángulos de aluminio y placas de acrílico, el cual contiene tres celdas de combustible tipo PEM con sus respectivos sistemas de alimentación de los combustibles y una electrónica de potencia.

El generador proporciona energía eléctrica CD no regulada de la celda #2 y #3 conectadas en paralelo. El sistema tiene un peso de 30 kg

En la figura 5 se muestra una foto del generador; accionado por celdas de combustible con membrana de conducción protónica PEM, y todos los sistemas periféricos.



*Figura 5. Generador de energía eléctrica.*

### **3.- Resultados y discusión**

#### **3.1.-Caracterización de las celdas de combustible.**

La figura 5 muestra la respuesta voltaje-corriente-potencia de la celda de combustible #1 que contiene 20 ensambles membrana electrocatalizadores con una área de 75 cm<sup>2</sup>.

Las condiciones de operación con las que se caracterizó la celda #1 fueron: alimentación del hidrogeno húmedo (Grado UPC 99.9993%) con recirculación y flujo de 4.0 l/min a temperatura ambiente y una presión de 0.1bar, alimentación del aire con ventilación forzada. Temperatura de operación 40 °C.

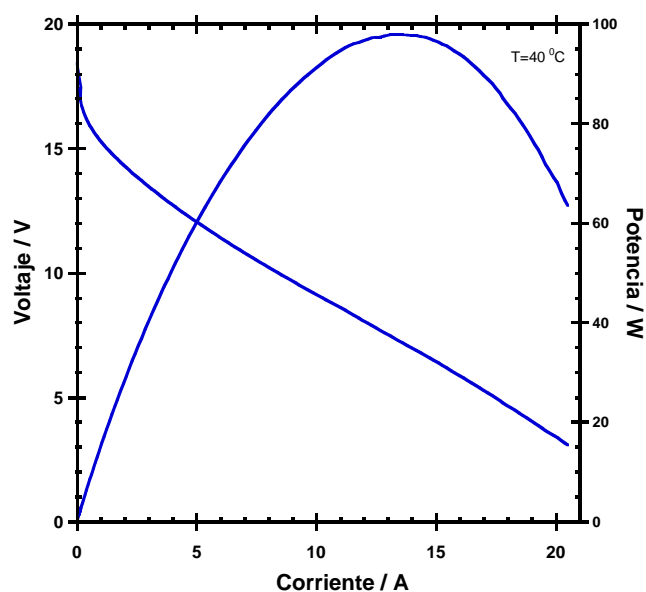


Figura 5. Desempeño de la celda de combustible #1.

Se observa un voltaje a circuito abierto de 18 V y un incremento de la corriente al disminuir el voltaje, alcanzando una potencia máxima de 98 W @ 7 V y 14 A. La figura 6 corresponde al grafico de estabilidad de la celda, se aplico un potencial de 7 V y 7.5 V por 3 horas.

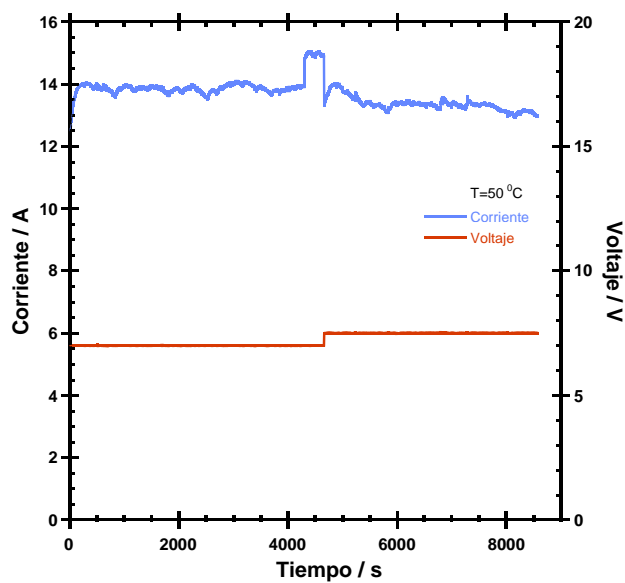
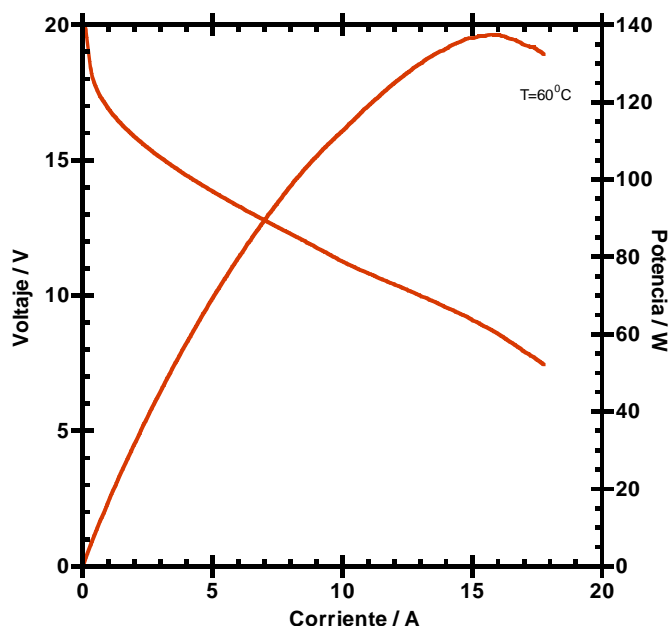


Figura 6. Grafica de estabilidad de la celda de combustible #1.

Es importante controlar la temperatura de operación a 50 °C en la celda de combustible, se logro con la ayuda de tres ventiladores que hicieron que el aire entrara forzado en los canales transversales de enfriamiento de los platos bipolares y poder disipar parte del calor generado por producto de la reacción, a esta temperatura se puede asegurar que las membranas no se deshidraten por un sobre calentamiento.

La figura 7 muestra la respuesta voltaje-corriente-potencia de la celda de combustible #2 que contiene 21 ensambles membrana electrocatalizadores con una área de 65 cm<sup>2</sup>.

Las condiciones de operación con las que se caracterizó la celda fueron: alimentación del combustible húmedo (H<sub>2</sub> Grado UPC 99.9993%) con recirculación y flujo de 4.0 l/min a temperatura ambiente y una presión de 0.1bar, alimentación del oxidante (aire) mediante bombas con un flujo de 17 l/min. Con una temperatura de operación 60 °C.

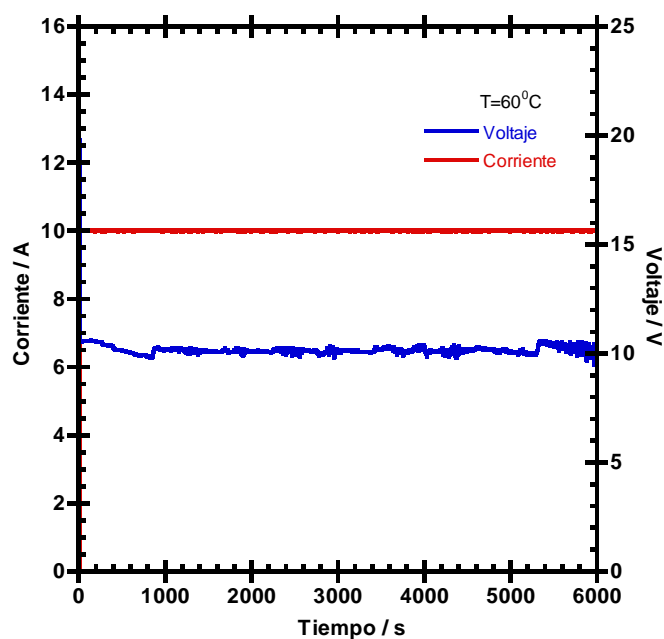


*Figura 7. Desempeño de la celda de combustible #2.*

Se observa un voltaje a circuito abierto de 20 V y un incremento de la corriente al disminuir el voltaje, alcanzando una potencia máxima de 138 W @ 9.2 V y 15 A.



La figura 8 corresponde al grafico de estabilidad de la celda, se polarizó galvanostáticamente a 10A por más de una hora.



*Figura 8. Grafica de estabilidad de la celda de combustible #2.*

La figura 9 muestra la respuesta voltaje-corriente-potencia de la celda de combustible #3 que contiene 21 ensambles membrana electrocatalizadores con una área de 65 cm<sup>2</sup>.

Las condiciones de operación con las que se caracterizó la celda fueron: alimentación del combustible húmedo (H<sub>2</sub> Grado UPC 99.9993%) con recirculación y flujo de 4.0 l/min a temperatura ambiente y una presión de 0.1bar, alimentación del oxidante (aire) mediante bombas con un flujo de 17 l/min. Con una temperatura de operación 60 °C.

Se observa un voltaje a circuito abierto de 18 V y un incremento de la corriente al disminuir el voltaje, alcanzando una potencia máxima de 150 W @ 10 V y 15 A.

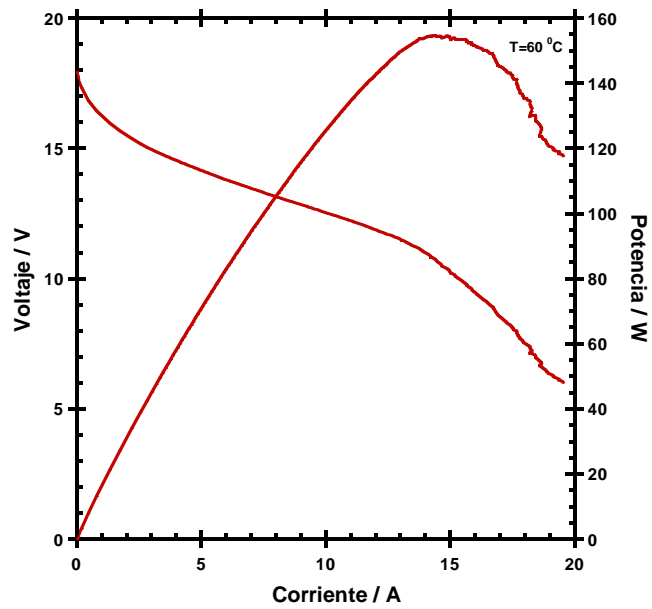


Figura 9. Desempeño de la celda de combustible #2.

La figura 10 corresponde al grafico de estabilidad de la celda, se aplico un potencial de 12 V por más de una hora.

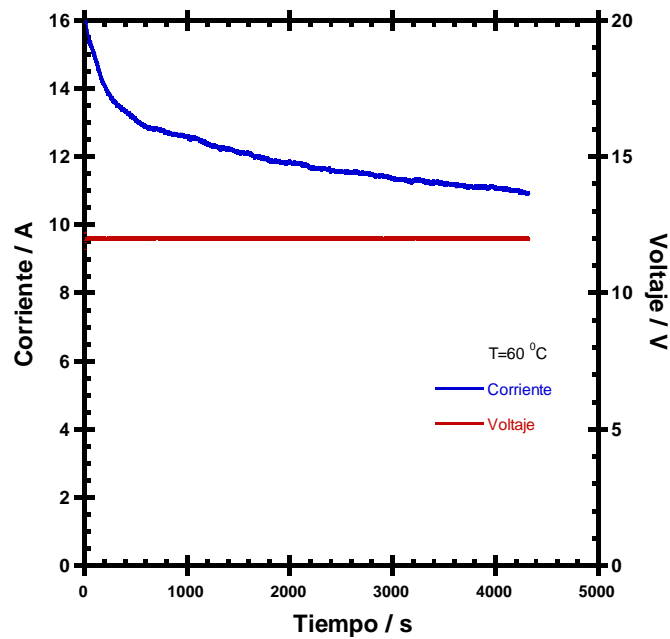


Figura 10. Grafica de estabilidad de la celda de combustible #3.

### 3.2.-Principio del funcionamiento de generador eléctrico.

El hidrógeno presurizado a 4atm en los tanques es alimentado a las celdas por medio de los tres sistemas auxiliares de recirculación y humidificación del hidrógeno a 0.1atm. Tres ventiladores enfrían y alimentan el oxígeno del aire a la celda #1, que son accionados por la energía eléctrica no regulada de la celda, al igual que el convertidor CD/CD que regula la energía eléctrica y alimenta al inversor CD/CA para prender las bombas de recirculación del hidrógeno a la celda #1 y de aire para las celdas 2 y 3, cada una de las celdas (2,3) acciona sus respectivas bombas para alimentarse hidrógeno y agua con su energía eléctrica no regulada, haciendo con esto un sistema autosuficiente para su total funcionamiento.

El consumo de hidrógeno es variable ya que en todo momento la carga que se le demanda a las celdas oscila, considerando que las tres celdas funcionen a su máxima potencia el consumo de hidrógeno total es de aproximadamente de 7.5 l/min.

### 4.- Conclusiones

La celda de combustible #1 es autosuficiente para accionar los sistemas auxiliares de alimentación de los gases y la electrónica de potencia, alcanzando una potencia máxima de 98 W @ 7 V y 14 A.

La celda de combustible #2 alcanzo una potencia máxima de 138 W @ 9.2 V y 15 A. y la celda de combustible #3 una potencia máxima de 150 W @ 10 V y 15 A.

Las celdas presentan una estabilidad aceptable, las fluctuaciones de corriente en las figuras, se atribuyen a la saturación del agua producida en las cavidades del cátodo por producto de la reacción y el aire que entra no es suficiente para removerla.

Las celdas de combustible 2 y 3 se acoplaron en paralelo para proporcionar la energía eléctrica disponible del generador.

Se logro construir en el laboratorio las celdas de combustible, los sistemas auxiliares de alimentación de los gases, la electrónica de potencia y poner en operación un generador de energía eléctrica.

## **5.- Agradecimientos**

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por el ICYTDF al proyecto OCF-OSF.

## **6.- Referencia**

[1] Barriers, and R&D Needs, *The Hydrogen Economy: Opportunities, Cost*, The National Academies Press, Washington DC, 2004.

[2] A. Rodríguez Castellanos, E. López Torres, O. Solorza Feria, *J. Mex. Chem. Soc.*, 50(4), 97, (2007).

[3] F. Urbani, G. Squadrito, O. Barbera, G. Giacoppo, E. Passalacqua, O. Zerbinati, *Journal of Power Sources*, 169, 334, (2007).

[4] Xianguo Li, Imran Sabir, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 359, (2005).

[5] Frano Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, 147, Ed. Elsevier Academic Press, USA, (2005).

[6] Frano Barbir, Haluk Görgün, *Journal of Applied Electrochemistry*, 360, (2007).