



## Caracterización de la Operación de Celdas de Combustible como Fuente de Generación de Electricidad

F. Gonzalez-Longatt<sup>1</sup>, A. Facendo<sup>1</sup>, C. Peraza<sup>1,2</sup>, C. Villanueva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, <sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Valencia, <sup>3</sup>Universidad de Carabobo

### RESUMEN

El mundo ha estado experimentado un proceso de desregulación que ha permitido una competencia en el sector de generación de electricidad. Abriendo oportunidades para la generación de potencia por los usuarios de electricidad usando sistemas de generación de tamaño reducido y con tecnologías consideradas como emergentes, todo esto como consecuencia de un crecimiento del mercado eléctrico, el desarrollo de los mercados financieros y el acelerado progreso técnico; dando origen a la generación distribuida. Las celdas de combustible (FC) emergen como tecnología de generación, con rápido desarrollo, ya que poseen características que las hacen favorables, como la baja emisión de contaminante, operación silenciosa y un limitado número de partes móviles: de ellas las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), y las de membrana de intercambio de protones (PEMFC) se encuentran comercialmente disponibles. En este artículo, inicialmente se presenta la modelación de la SOFC y la PEMFC; incluyendo el pre-procesador de combustible, y el convertidor electrónico de potencia a frecuencia fundamental; estos fueron implementados en un programa de simulación computarizada. A partir de parámetros típicos para estas tecnologías de FC, se procedió a efectuar simulaciones en régimen estacionario, a fin de construir las curvas características de operación. El régimen transitorio de estas FC, fue examinado inicialmente para cambios crecientes de la demanda de energía eléctrica en forma de escalón, y además se examinó el comportamiento ante falla en terminales de variada duración. Resultados de este examen sobre la SOFC y PEMFC son mostrados en este artículo. Resulta evidente la lenta respuesta de la SOFC debido a la respuesta de la dinámica asociada al preprocesador de combustible, haciendo a esta tecnología susceptible para su uso suministrando carga base; en cambio la PEMFC, exhibe una muy rápida respuesta dinámica siendo propicia para operar en seguimiento de la demanda.

### PALABRAS CLAVE

Celdas de Combustible, Modelación y Simulación, Caracterización.

fglongatt@ieee.org

## **INTRODUCCIÓN**

Manejar los suministros de energía globales se está volviendo cada vez más un problema para el futuro de la humanidad. Si los niveles de uso actuales se mantienen, los recursos de combustible fósil, serán utilizados dentro de sólo unas generaciones [1]. A nivel mundial el uso de fuentes no renovables de energía ha sido dominante por algunos años. En la actualidad un alto porcentaje de la capacidad instalada de generación proviene de plantas térmicas que operan a partir de los ciclos termodinámicos, utilizando la energía contenida en los combustibles fósiles para mover una turbina encargada de hacer girar el rotor de un generador cuyo objetivo final es el producir electricidad. Este tipo de tecnología trae consigo la emisión de gases contaminantes que resultan ser tóxicos, nocivos para la salud, y además agresivos al ambiente [2].

En el presente existe un termino que ha surgido como consecuencia de eventos relacionados directamente con las formas de generación de energía eléctrica tradicionales, llamado generación distribuida (GD), que no es mas que pequeños generadores de potencia localizados típicamente cerca de los usuarios donde la energía es consumida, esta forma de generación le permite a los usuarios aumentar sus capacidades de potencia eléctrica, y hacer énfasis en la confiabilidad y la calidad de servicio [3]. La GD ha dado paso al desarrollo de nuevas tecnologías como: turbinas eólicas, plantas hidráulicas a pequeñas escala, biomasas, micro turbinas, arreglos fotovoltaicos, y celdas de combustible.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que oxida el combustible (sin combustión) para convertir directamente la energía química contenida en el combustible en energía eléctrica. Con un bajo impacto ambiental, operando prácticamente libre de ruido, una alta eficiencia y una larga vida útil, debido al limitado numero de partes móviles, las celdas de combustible representan un muy buen competidor en el futuro del mercado de generación de electricidad [4].

Los sistemas de generación de energía por celdas de combustible prometen proporcionar una infinidad de ventajas, cuando se comparan con los sistemas de generación de energía convencionales. No obstante cabe destacar que las celdas de combustible en el caso específico de generación de electricidad, poseen características y formas de operación muy diferentes a la generación de electricidad tradicional, éste es un hecho que no puede pasar inadvertido.

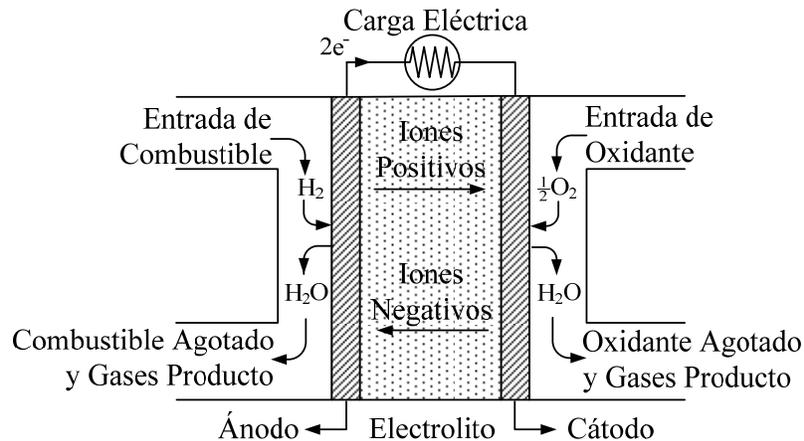
En base a esto el principal énfasis de esta investigación es la caracterización de la operación de celdas de combustible como fuente de generación de electricidad para identificar las principales características de operación. Para ello inicialmente se establecen los modelos de celdas de combustible considerados. Se describen las ecuaciones que precisan la dinámica de las celdas de combustible. Además presenta los resultados de la simulación para evaluar el desempeño de la celda de combustible en régimen estacionario y transitorio. Finalmente se muestra las conclusiones de la investigación.

## **MODELACIÓN**

Una celda de combustible, es un dispositivo de conversión de energía que teóricamente tiene la capacidad de producir tanta energía como combustible y oxidante sea suministrado a los electrodos [5]. El proceso ocurre de forma natural, causado por la necesidad de las partículas cargadas de emigrar hacia regiones de baja energía electroquímica. Las partículas cargadas presentes en el hidrógeno se mueven hacia el oxígeno y se unen entre si ya que las partículas del oxígeno tienen baja energía electroquímica [6].

El movimiento de estas partículas cargadas puede usarse para generar energía eléctrica, que es esencialmente el movimiento controlado de electrones, al separar el hidrógeno y oxígeno por un electrolito (o membrana electrolítica), ocurre un fenómeno muy interesante y útil, los

protones de los átomos de hidrógeno se mueven a través de la membrana pero los electrones no pueden. Estos electrones buscan recombinarse del otro lado de la membrana para lograr un estado estable. Cuando un circuito eléctrico se introduce, conectando ambos lados, los electrones viajan a través del mismo. Este movimiento de electrones a través de este circuito eléctrico externo es controlado para generar la energía eléctrica. La Figura 1 ilustra el desempeño básico de una celda de combustible [4].



**Figura 1. Estructura de una Celda de Combustible**

En el proceso electroquímico, un lado de la membrana es llamado ánodo y el otro es llamado cátodo. La reacción total que ocurre está dividida en dos pequeñas reacciones, una reacción de oxidación y una reacción de reducción. La reacción de oxidación parte de la disociación de átomos de hidrogeno en los protones y electrones y tiene lugar en el ánodo, representado en la ecuación (1). Después de la disociación, los protones libres atraviesan el electrolito, y los electrones se mueven a través del circuito externo que conecta el ánodo con el cátodo [6].



Una vez que los protones han cruzado el electrolito y los electrones fluido a través del circuito externo, hasta llegar al cátodo, ocurre una reacción de reducción, donde los protones y electrones del hidrógeno se recombinan para formar agua, tal como le refleja la ecuación (2).



De modo que la reacción global de la celda de combustible es:



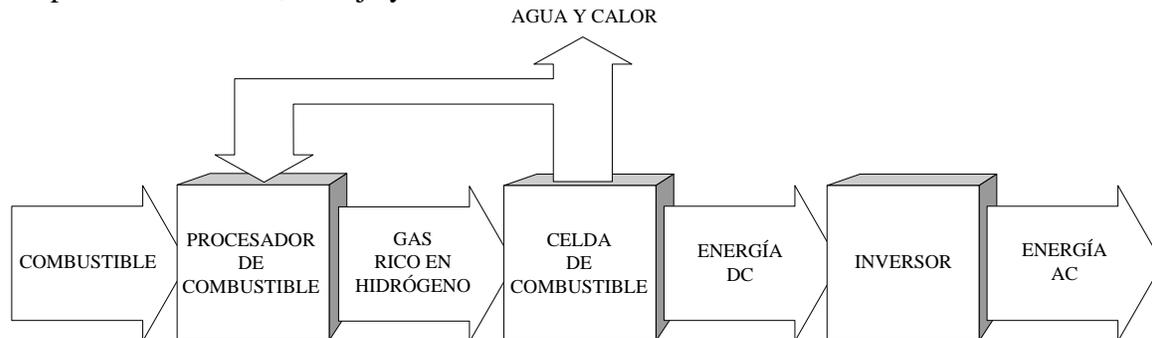
La efectividad de este proceso depende fundamentalmente de la capacidad del electrolito para crear la reactividad química necesaria para el transporte de iones. Debido a esto las celdas de combustible son clasificadas de acuerdo con el tipo de electrolito que utilizan [5]:

- Celdas de Combustible Alcalinas, AFC (*Alkaline Fuel Cells*)
- Celdas de Combustible de Carbonato Fundido, MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cells*)
- Celdas de Combustible de Ácido Fosforito, PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cells*)
- Celdas de combustible de Metanol Directo, DMFC (*Direct Metanol Fuel Cells*)
- Celdas de Combustible de Oxido Sólido, SOFC (*Solid Oxide Fuel Cells*)
- Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, PEMFC (*Proton Exchange Membrane*)

### A. Planta de Celda de Combustible

Una planta de celdas de combustible consta de tres partes fundamentales, la Figura 2 muestra la estructura básica de un sistema de generación con celdas de combustible [7]:

- *Procesador de Combustible*: dispositivo utilizado para extraer el hidrógeno de combustibles como: gas natural, hidrocarburo gaseoso, metanol, nafta o carbón.
- *Sección de Potencia (Celda de Combustible)*: unidad encargada de generar la electricidad en corriente continua a través de celdas individuales contenidas dentro de *stack* (pila). Variando el número de celdas o de *stack* se obtiene una aplicación de potencia dada.
- *Unidad Acondicionadora de Potencia (Inversor)*: dispositivo capaz de convertir la corriente directa de salida de celda en una corriente alterna, que incluye un control para la potencia de salida, voltaje y frecuencia.



**Figura 2. Estructura de una planta de Celdas de Combustible**

Esta investigación está centrada en la caracterización de la operación de celdas de combustible como fuente de generación de electricidad específicamente la celda de combustible de óxido sólido y el sistema de celda de combustible de membrana de intercambio protónico. La referencia [5] proporciona un modelo dinámico básico de la sección de potencia del sistema SOFC que incluye el procesador de combustible, mientras que la referencia [8] aporta un modelo dinámico de la sección de potencia del sistema PEMFC que contiene un procesador de combustible y un modelo dinámico de la unidad acondicionadora de potencia.

### B. Modelo de Sistema SOFC

Las referencias [9] y [10] presentan un análisis minucioso del comportamiento dinámico de la reacción de la SOFC enfocado en (3). Considerando las siguientes premisas:

- Los gases que entran a la celda de combustible son ideales, es decir,  $H_2$  y  $O_2$  respectivamente.
- Es suficiente definir un solo valor de presión en el interior de los electrodos. Se obvian posibles caídas de presión internas.
- La dinámica de la temperatura en la celda de combustible es muy lenta, por tanto se considera estable en todo momento.
- La ecuación de Nerst es aplicada para determinar el potencial en terminales de la celda de combustible.

Las principales ecuaciones que describen la dinámica de la SOFC pueden ser escritas de la siguiente manera [5]:

$$\dot{I}_{fc} = \frac{1}{\tau_e} (I_{fc} - I_{ref}) \quad (4)$$

La respuesta dinámica de la corriente eléctrica de salida de la SOFC es modelada a través de una función de transferencia de primer orden con una constante de tiempo  $\tau_e$ . El tiempo de respuesta está asociado con la velocidad con que la reacción química es capaz de restaurar el cambio de las condiciones de estado en terminales. La corriente de referencia ( $I_{ref}$ ) de la celda de combustible puede ser restringida en un rango, de acuerdo con el flujo de hidrogeno que alimenta a la celda:

$$I_{ref} = \begin{cases} q_{H_2} \frac{U_{max}}{2K_r}, & \text{si } I_{fc}^{in} \geq q_{H_2} \frac{U_{max}}{2K_r} \\ q_{H_2} \frac{U_{min}}{2K_r}, & \text{si } I_{fc}^{in} \geq q_{H_2} \frac{U_{min}}{2K_r} \\ I_{fc}^{in} = \frac{P_{fc}}{V_{fc}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

La respuesta dinámica del procesador de combustible está relacionada con el tiempo que toma cambiar los parámetros químicos de la reacción luego de un cambio en el flujo de combustible. Esta respuesta es modelada por medio de una función de transferencia de primer orden con una constate de tiempo  $\tau_f$ .

$$\dot{q}_{H_2} = \frac{1}{\tau_f} \left( \frac{2K_r}{U_{opt}} I_{fc} - q_{H_2} \right) \quad (6)$$

Las respuestas dinámicas de las presiones parciales internas del sistema SOFC son determinadas a través de las siguientes ecuaciones:

$$\dot{P}_{H_2} = \frac{1}{\tau_{H_2}} \left( \frac{1}{K_{H_2}} (q_{H_2} - 2K_r I_{fc}) - P_{H_2} \right) \quad (7)$$

$$\dot{P}_{H_2O} = \frac{1}{\tau_{H_2O}} \left( \frac{2K_r I_{fc}}{K_{H_2}} - P_{H_2} \right) \quad (8)$$

$$\dot{P}_{O_2} = \frac{1}{\tau_{O_2}} \left( \frac{1}{K_{O_2}} \left( \frac{1}{r_{H-O}} q_{H_2} - K_r I_{fc} \right) - P_{H_2} \right) \quad (9)$$

La ecuación de Nernst representa el voltaje en terminales de la celda, la misma determina el rendimiento de la celda de combustible, a través de una relación entre el potencial ideal estándar ( $E_0$ ) y el potencial considerando los efectos de la temperatura y las presiones parciales de los reactantes [4]:

$$V_{fc} = N_0 \left( E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \right) - r I_{fc} \quad (10)$$

### C. Modelo de Sistema PEMFC

El modelo SOFC presentado en la referencia [10], fue modificado para simular un sistema PEMFC [8]. Debido a esto se toman en cuenta las mimas premisas consideradas para el modelo SOFC. Las ecuaciones que representan la dinámica de la PEMFC pueden ser escritas de la siguiente manera [8]:

$$q_{H_2} = \frac{CV}{\tau_1\tau_2s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1} q_{met} \quad (11)$$

La respuesta dinámica del procesador de combustible es modelada a través de una función de transferencia de segundo orden. A fin de simplificar los cálculos se asignan variables de estado intermedias, la función de transferencia de segundo orden es rescrita en función del tiempo de la siguiente forma:

$$\dot{q}_{H_2} = \frac{1}{\tau_1}(X_2 - q_{H_2}) \quad (12)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{\tau_2}(CVX_3 - X_2) \quad (13)$$

$$\dot{X}_4 = \frac{K_3}{\tau_3} \left( \frac{N_0}{2FU} I_{fc} + q_{met} - q_{H_2} \right) \quad (14)$$

De esta operación surge una ecuación algebraica:

$$X_3 = X_4 + \frac{K_3 N_0}{2FU} I_{fc} - K_3 q_{H_2} + q_{met} \quad (15)$$

De la misma manera que en el modelo SOFC las respuestas dinámicas de las presiones parciales internas del sistema PEMFC son determinadas a través de las ecuaciones:

$$\dot{P}_{H_2} = \frac{1}{\tau_{H_2}} \left( \frac{1}{K_{H_2}} (q_{H_2} - 2K_r I_{fc}) - P_{H_2} \right) \quad (16)$$

$$\dot{P}_{H_2O} = \frac{1}{\tau_{H_2O}} \left( \frac{2K_r I_{fc}}{K_{H_2}} - P_{H_2} \right) \quad (17)$$

$$\dot{P}_{O_2} = \frac{1}{\tau_{O_2}} \left( \frac{1}{K_{O_2}} \left( \frac{1}{r_{H-O}} q_{H_2} - K_r I_{fc} \right) - P_{H_2} \right) \quad (19)$$

En el caso del modelo de PEMFC la ecuación de Nernst es:

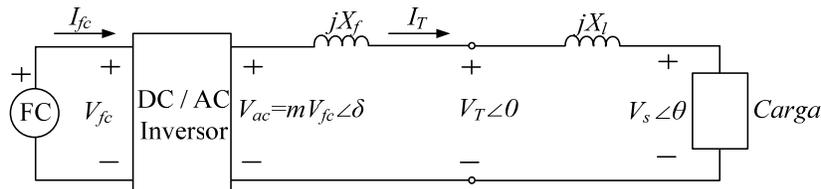
$$V_{fc} = N_0 \left( E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \right) - \eta_{act} - \eta_{ohm} \quad (20)$$

$$\eta_{act} = B \ln(CI_{fc}) \quad (21)$$

$$\eta_{ohm} = rI_{fc} \quad (22)$$

### C. Modelo de Unidad Acondicionadora de Potencia

La unidad acondicionadora de potencia es utilizada para convertir la energía DC producida por la celda de combustible, en energía AC. Esta unidad incluye un convertidor DC/DC seguido de un inversor DC/AC. Sin embargo este modelo solo considera el inversor DC/AC debido a que las constantes de tiempo del convertidor DC/DC son muy pequeñas (en el orden de los milisegundos).



**Figura 3. Esquema de Conexión de la Planta de Celda de Combustible**

En el modelo del inversor el voltaje y la potencia (activa y reactiva) de salida son controlados utilizando el índice de modulación ( $m$ ) y el ángulo de fase del voltaje ( $\delta$ ). Considerando a la celda de combustible (SOFC o PEMFC) como una fuente, el inversor y la carga, son conectadas de acuerdo con la Figura 3. Las ecuaciones que definen el modelo pueden ser escritas como:

$$V_{ac} = mV_{fc} \angle \delta \quad (23)$$

$$P_{elec} = \frac{mV_{fc}V_T}{X_f} \sin(\delta) \quad (24)$$

$$Q_{elec} = \frac{(mV_{fc})^2 - mV_{fc}V_T \cos(\delta)}{X_f} \quad (25)$$

$$I_T = \frac{Pl}{V_T \cos(\theta)} \quad (26)$$

$$I_{fc} = mI_T \cos(\theta + \delta) \quad (27)$$

El voltaje en terminales de la carga es considerado constante. Se emplea un controlador PI para controlar el índice de modulación, la función de transferencia puede ser expresada en función del tiempo de la siguiente forma:

$$\dot{m} = \frac{K_1(V_r - V_{ac})}{1 + K_2V_{fc} \angle \delta} \quad (28)$$

Una relación entre el ángulo de fase del voltaje y el flujo de hidrógeno que ingresa a la celda de combustible es establecida para controlar la potencia de salida del inversor. Asumiendo pocas pérdidas en el inversor se tienen que:

$$P_{elec} = P_{fc} = V_{fc}I_{fc} \quad (29)$$

La relación del flujo de combustible con la corriente interna de la celda de combustible esta definida por:

$$q_{H_2} = \frac{N_0}{2FU} I_{fc} \quad (30)$$

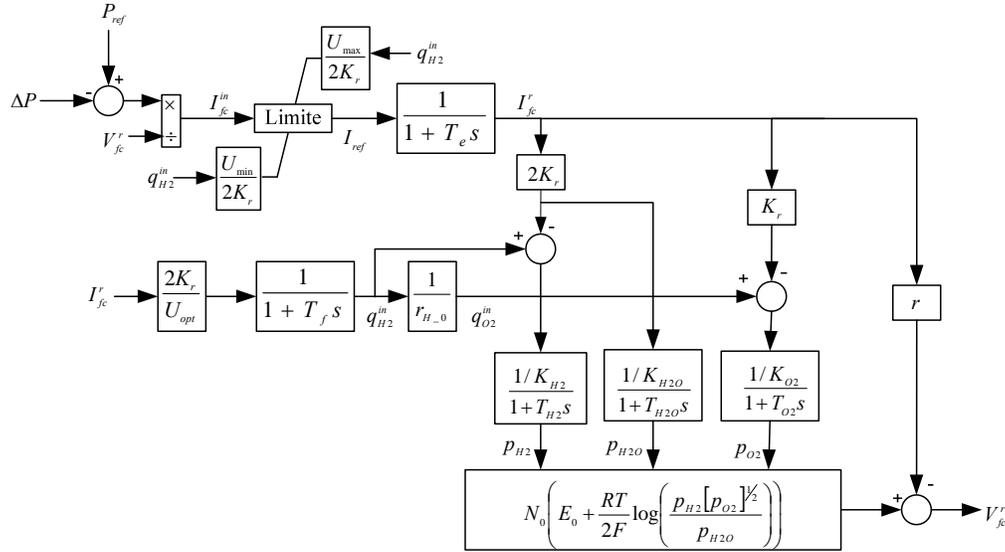
De (24), (29) y (30), se obtiene que:

$$\sin(\delta) = \frac{2FUX_f}{mV_T N_0} q_{H_2} \quad (31)$$

## SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Para efectuar la caracterización de la operación de celdas de combustible como fuente de generación de electricidad y la posterior identificación las principales características, se procedió a implementar los modelos de las celdas de combustible en un programa para la simulación del comportamiento dinámico de sistemas de potencia, codificado en Matlab<sup>®</sup>. Se implemento el modelo de la SOFC, que se discutió teóricamente en las secciones precedentes, y que se muestra en la Figura 3; los parámetros usados en el modelo se obtuvieron de [10] y son presentados en la Tabla 1. De igual modo, el modelo para la dinámica de la PEMFC discutido, fue imputado (Figura 4) y los parámetros asociados al del modelo para una celda real se obtuvieron de [8] y son presentados en la Tabla 1.

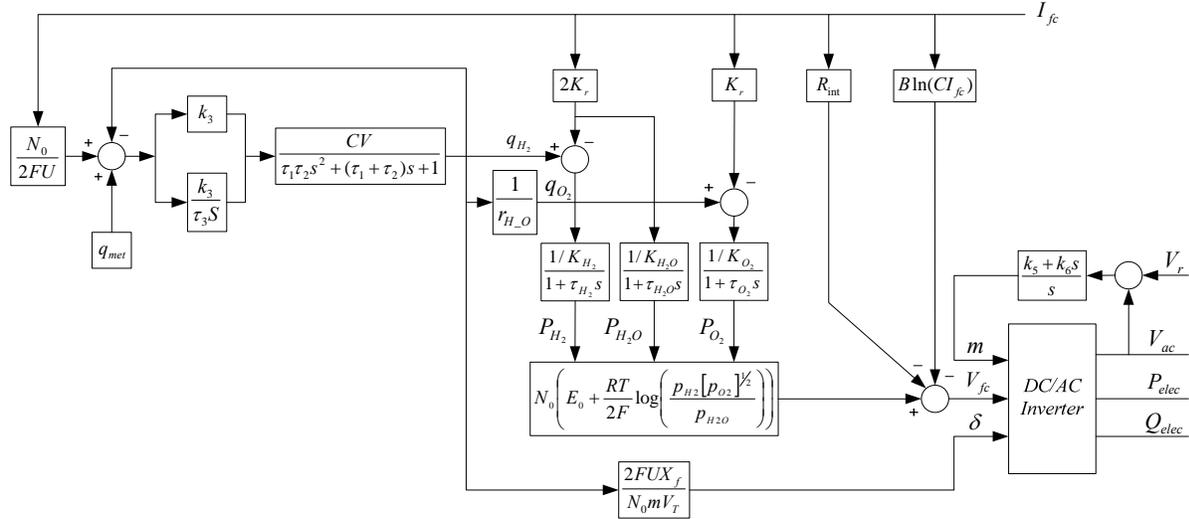
La caracterización de la operación de la celda de combustible se realizada mediante simulaciones y persigue una definición formal de las principales características operativas de la celda, a fin de obtener un perfil de funcionamiento. Simulaciones fueron realizadas para evaluar el comportamiento tanto en régimen estacionario como en régimen transitorio.



**Figura 3. Diagrama de Bloques de Modelo para la Dinámica de SOFC**

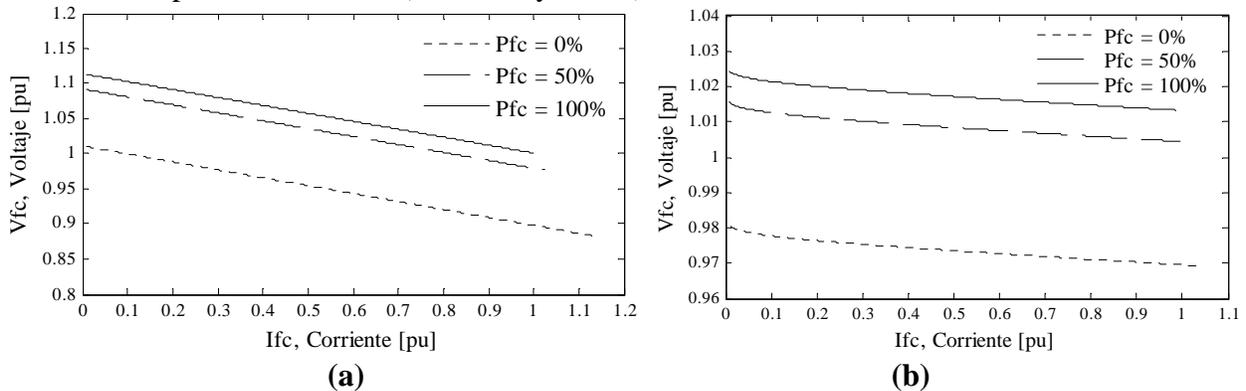
**Tabla 1. Parámetros de los Modelos de SOFC y PEMFC [5], [8]**

Descripción	Valor SOFC	Valor PEMFC
Potencia nominal ( $P_{nom}$ )	100 kW	5 kW
Voltaje nominal ( $V_{nom}$ )	333,8 V	48 V
Temperatura absoluta ( $T$ )	1273°K	343°K
Constante de Faraday ( $F$ )	96487 C/mol	96484600 C/kmol
Constante universal de los Gases ( $R$ )	8314 J/(kmol·°K)	8314.47 J/kmol°K
Potencial ideal ( $E_0$ )	1,18 V	0.6 V
Numero de celdas en serie en la pila ( $N_0$ )	384	88
Constante, $K_r = N_0/4F$	$0.996 \times 10^{-6}$ kmol/(A·s)	$2.2802 \times 10^{-7}$ kmol/(A·s)
Utilización de combustible ( $U$ )	0,9	0.8
Constante válvula de hidrógeno ( $K_{H_2}$ )	$8,43 \times 10^{-4}$ kmol/(s·atm)	$4,22 \times 10^{-5}$ kmol/(s·atm)
Constante válvula de oxígeno ( $K_{O_2}$ )	$2,52 \times 10^{-3}$ kmol/(s·atm)	$2,11 \times 10^{-5}$ kmol/(s·atm)
Constante válvula de agua ( $K_{H_2O}$ )	$2,81 \times 10^{-4}$ kmol/(s·atm)	$7,716 \times 10^{-6}$ kmol/(s·atm)
Constante de tiempo flujo de hidrogeno ( $\tau_{H_2}$ )	26,1 seg.	3,37 seg.
Constante de tiempo flujo de agua ( $\tau_{H_2O}$ )	78,3 seg.	18.418 seg.
Constante de tiempo flujo de oxígeno ( $\tau_{O_2}$ )	2,91 seg.	6,74 seg.
Constante de tiempo del reformador de combustible ( $\tau_1$ )	NA	2 seg.
Constante de tiempo del reformador de combustible ( $\tau_2$ )	NA	2 seg.
Constante de tiempo del reformador de combustible ( $\tau_3$ )	NA	2 seg.
Constante de tiempo eléctrica ( $\tau_e$ )	0,8 seg.	NA
Constante de tiempo del procesador de combustible ( $\tau_f$ )	5 seg.	NA
Pérdidas ohmicas ( $r$ )	0,126 $\Omega$	0.00303 $\Omega$
Factor de conversión ( $CV$ )	NA	2
Ganancia del PI reformador de combustible ( $K_3$ )	NA	0.25
Constante de voltaje de activación ( $B$ )	NA	$0.04777 \text{ A}^{-1}$
Constante de voltaje de activación ( $C$ )	NA	0.0136 V
Referencia de metanol ( $q_{met}$ )	NA	0.000015 kmol/s
Relación de hidrógeno a oxígeno ( $r_{H_2O}$ )	1,145	1.168
Reactancia del filtro del inversor ( $X_f$ )	0.05 $\Omega$	0.05 $\Omega$
Ganancia del PI en el Inversor ( $K_1$ y $K_2$ )	10	10
Voltaje de Referencia en el Inversor ( $V_r$ )	400 V	120 V



**Figura 4. Diagrama de Bloques de Modelo para la Dinámica de PEMFC**

Los puntos de operación en régimen estacionario pueden ser obtenidos de la curva del voltaje ( $V_{fc}$ ) en función de la corriente ( $I_{fc}$ ), trazados en la Figura 5 para los modelos implementados. Se fijaron las presiones parciales del hidrógeno, agua y oxígeno para ciertos niveles de la potencia nominal (0%, 50% y 100%).



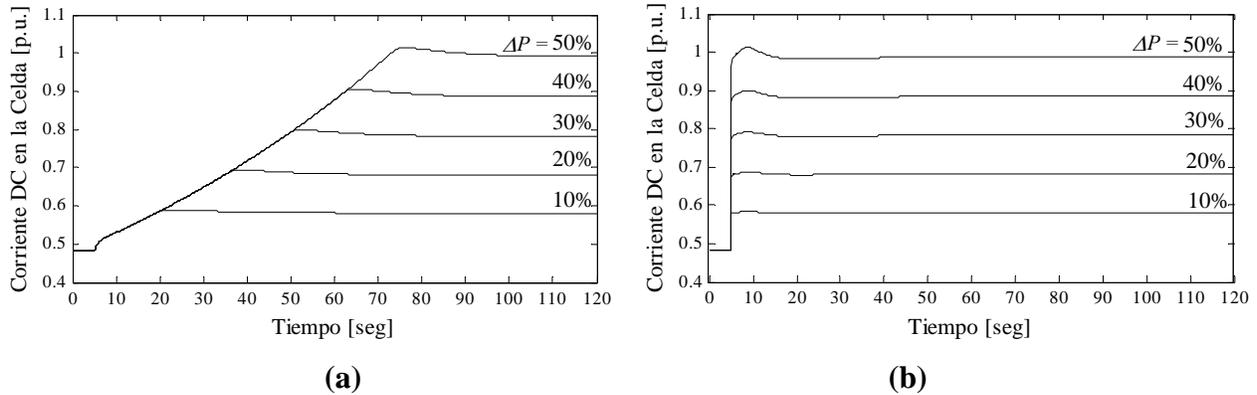
**Figura 5. Curva Característica Voltaje versus Corriente en el Modelo (a) SOFC y (b) PEMFC**

En las características mostradas se ve una pendiente más aguda en la curva de la SOFC, lo que implica mayores caídas de voltaje proporcional a la carga; sin embargo la PEMFC presenta una característica no lineal, muy suave a valores altos de corriente que la hace adecuada para aplicaciones estacionarias, con menor caída de voltaje interno. A valores bajos de carga, las pérdidas por activación se hacen marcadas en las PEMFC, contribuyendo con una curva que indica amplias caídas de voltaje con pequeños aumentos en la carga, para niveles muy bajos de carga (<10%).

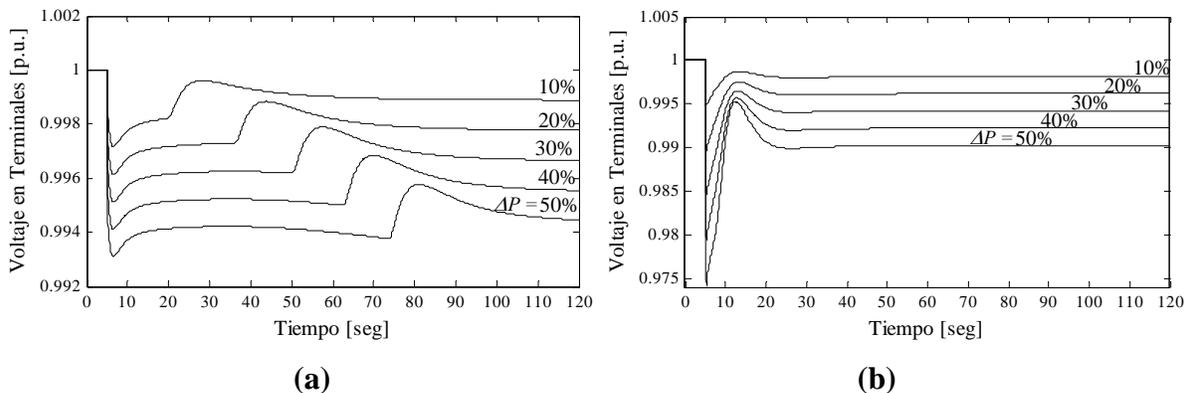
A fin de examinar el desempeño de la celda de combustible en régimen transitorio, grupos de simulaciones fueron efectuadas a las celdas de combustible: (1) cambios en la demanda en forma de escalón de potencia eléctrica en terminales y (2) cortocircuito trifásico en terminales de la celda de combustible.

Con los cambios en la demanda, examina la respuesta transitoria para cambios normales; efectuándose para diferentes amplitudes de cambio. Para ambos modelos se asume un sistema que opera a 0.5 p.u. de la potencia nominal, con factor de potencia constante e igual a 0.95, en un tiempo igual 5 segundos se producen los cambios tipo escalón en la demanda de potencia activa y

reactiva, varios casos son analizados de forma aislada donde el incremento de la potencia activa es aumentado subsecuentemente en 10% hasta efectuar un incremento del 50%. Todas las variables tanto eléctricas como físicas-químicas fueron trazadas, sin embargo, por limitaciones de espacio solo se presentan algunas variables de interés.



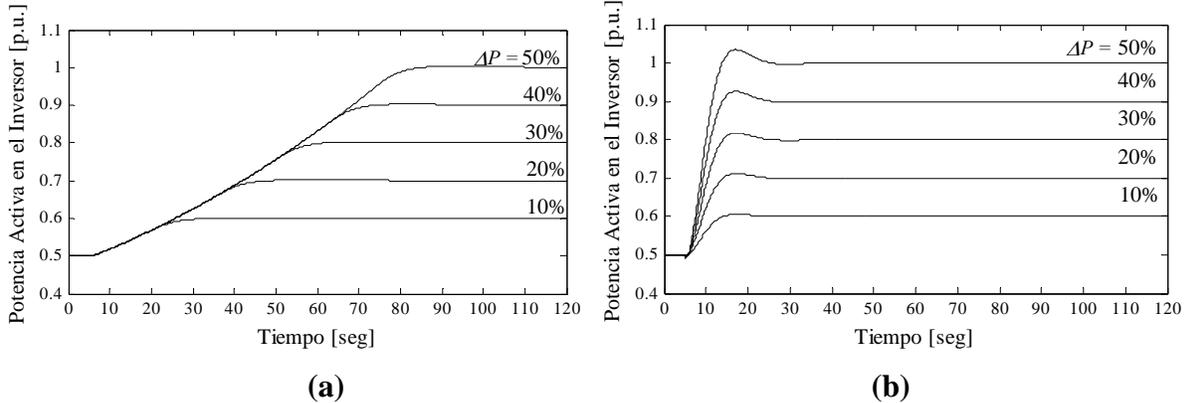
**Figura 6. Respuesta de la Corriente en Terminales: (a) SOFC y (b) PEMFC**  
 Al producirse una variación en la demanda de potencia en terminales de la planta de energía, la corriente ( $I_T$ ) de salida del inversor varía instantáneamente de acuerdo con los requerimientos de la red; esto produce efecto directo sobre la corriente interna de la celda de combustible ( $I_{fc}$ ), la variación de ésta última genera los cambios necesarios dentro de la celda de combustible para cubrir la nueva demanda de energía requerida en terminales. En la Figura 6 se aprecia como la respuesta inicial de la corriente ( $I_{fc}$ ) en el modelo SOFC es en un principio rápida (primeros 2 segundos) y seguidamente se vuelve lenta y continúa hasta alcanzar la nueva condición de estado estable, la segunda fase de la respuesta de corriente es controlada por la respuesta del procesador de combustible. En el modelo PEMFC la respuesta de la corriente es instantánea, sin embargo se pueden observar los efectos del procesador de combustible luego del incremento. Se ve que las características del transitorio en la SOFC no son dependientes de la magnitud del cambio situación opuesta a lo que sucede con el sobre impulso en la PEMFC.



**Figura 7. Respuesta del Voltaje en Terminales del Inversor: (a) SOFC y (b) PEMFC**

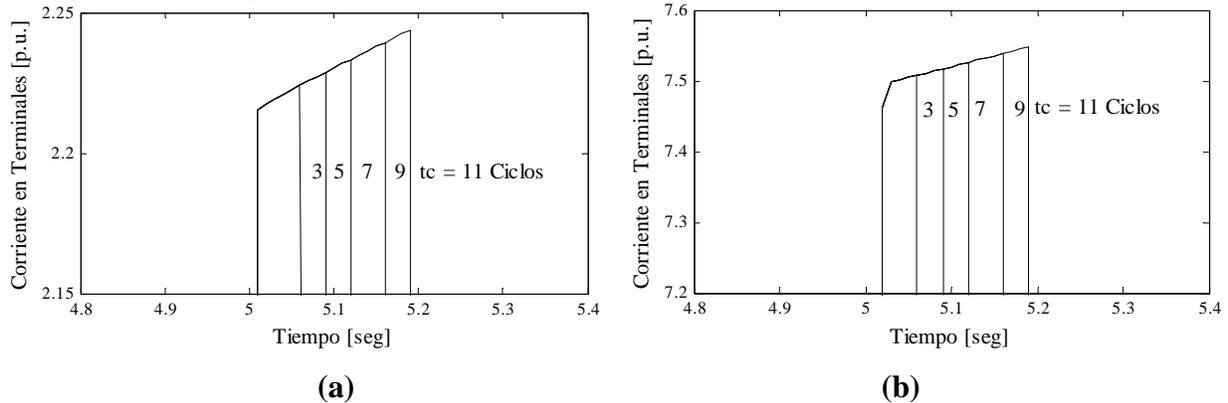
La respuesta lenta de todas las variables químicas de la SOFC poseen impacto en el voltaje en terminales de la celda, con el voltaje deprimido por un período largo (40 seg. aproximadamente) Figura 7(a), sin embargo, al actuar el procesador de combustible un sobreimpulso es logrado, y que depende de la magnitud del cambio en la demanda. Por su parte, la PEMFC, exhibe un transitorio muy rápido en el voltaje, con tiempos de establecimiento menores a los de las SOFC (Figura 7(b)). El impacto de la dinámica en las variables químicas y

eléctricas de las SOFC, las hace poco adecuada para seguir los cambios de potencia rápido en terminales, Figura 8(a), de hecho su respuesta es sobre amortiguada y con transitorios tan largos como la magnitud del cambio exigido; en cambio la PEMFC, posee una recuesta rápida subamortiguada, con un tiempo de establecimiento dependiente del cambio en la demanda pero mucho mas corto comparado con la SOFC.



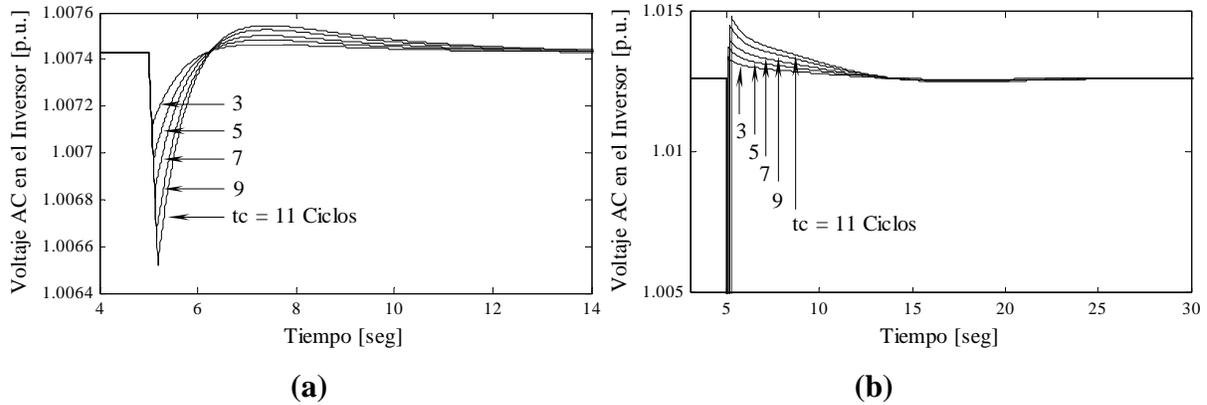
**Figura 8. Respuesta de la Potencia Activa: (a) SOFC y (b) PEMFC**

Para evaluar la dinámica de las celdas de combustible en condiciones anormales, se asume un sistema que opera a 0.7 p.u. de la potencia nominal, con factor de potencia constante e igual a 0.95, en un tiempo igual 5 segundos se aplica un corto circuito. Simulaciones fueron efectuada para diferentes tiempos de duración del corto circuito: 3, 5, 7, 9 y 11 ciclos (a 60 Hz).

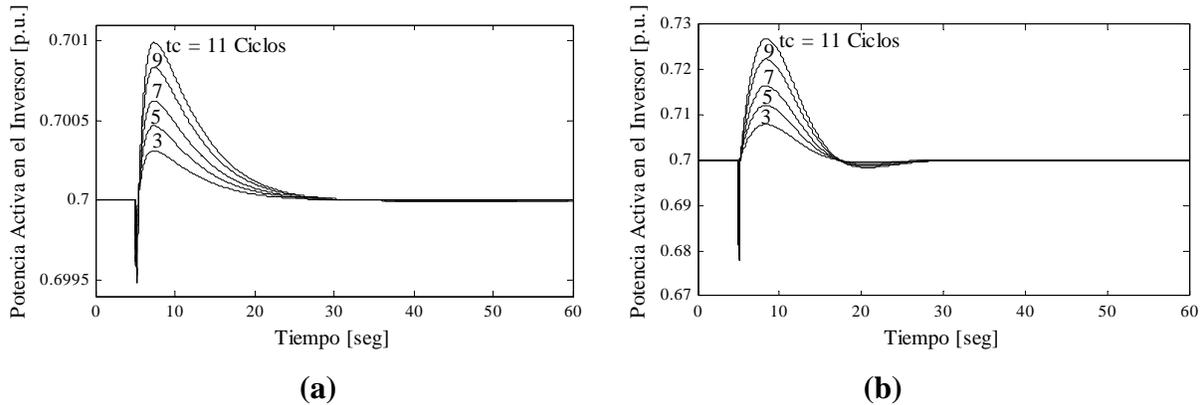


**Figura 9. Respuesta de la Corriente en Terminales: (a) SOFC y (b) PEMFC**

En condición de falla, existe una gran irrupción inicial de corriente, siendo mucho mayor en la PEMFC que la SOFC, sin embargo; durante la falla la corriente tiende a aumentar como una respuesta natural del sistema a aumentar el voltaje en terminales, ese crecimiento se en forma lineal con una mayor pendiente en la SOFC sobre la PEMFC (Figura 9). Por su parte, el voltaje en terminales de la planta, en condiciones de falla, decaer rápidamente; sin embargo, el control del inversor tiene a modificar sus ajustes para preservar el voltaje. El despeje exitoso de la falla produce un transitorio en ambas celdas, siendo mucho más rápido en la SOFC sobre la PEMFC, pero con una mayor variación perceptible en esta última. De hecho, el despeje produce un pico mayor en la PEMFC siendo este dependiente del tiempo de duración de la falla.



**Figura 10. Respuesta del Voltaje en Terminales del Inversor: (a) SOFC y (b) PEMFC**



**Figura 11. Respuesta de la Potencia Activa: (a) SOFC y (b) PEMFC**

El impacto del cambio en el voltaje y la corriente en la celda de combustible posterior al despeje exitoso de la falla produce un transitorio en la potencia activa de características sub amortiguadas. En el caso de la SOFC este transitorio tiene menor sobre impulso que la PEMFC, debido a la dinámica asociada a sus procesos químicos y de reforma de combustible. Sin embargo la duración de los transitorios es similar rondando del tiempo de establecimiento los 25 segundos.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación presento dos modelos de sistemas de generación a base de celdas de combustible, el primero emplea una SOFC y segundo una PEMFC. Con el fin de evaluar el comportamiento de ambos sistemas tanto en régimen estacionario como en régimen transitorio y caracterizar el comportamiento de los mismos como fuente de generación de electricidad. Para el régimen estacionario resaltan la diferencia en las pérdidas del voltaje en terminales con el aumento de la corriente de salida de ambos modelos, debido en gran medida a la alta resistencia interna de la SOFC con respecto de la PEMFC. En cuanto al régimen transitorio se determino que para cambios de demanda el sistema PEMFC posee una rápida respuesta los que la hace factible para ser utilizada en maniobras de seguimiento de carga. Por otro lado durante la presencia de un corto circuito el sistema SOFC presenta mayores ventajas ya que ésta impide el aumento excesivo de la corriente de salida, lo que la hace factible en aplicaciones estacionarias.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bewag Aktiengesellschaft. [Online]. Available: <http://www.bewag.de>.
- [2] González Longatt F. “Sistemas para la Conversión de la Energía del Viento: Generalidades”. En memoria de la *I Jornada ELECTRICOM*. Ciudad. Venezuela, 2005.
- [3] F. González-Longatt. “Tecnologías de Micro-Fuentes (Micro-Sources) disponible actualmente para la Generación Distribuida (GD)”. *Trabajo de Ascenso a la categoría de agregado*. Universidad Nacional Experimental Politécnica de Fuerza Armada. Maracay, Venezuela 2004.
- [4] EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation, “Fuel Cell Handbook”. *Sixth Edition, 2002*.
- [5] Francisco M. González-Longatt. “Modelo Dinámico para Celda de Combustible: Aplicación en Generación Distribuida”. *Ier Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (I CIBELEC 2004) 3-7 Mayo 2005*. Mérida, Venezuela, 2004.
- [6] J.A. Smith, M.H. Nehrir, V. Gerez, and S.R. Shaw. “A Broad Look at the Workings, Types, and Applications of Fuel Cells”. *Department of Electrical & Computer Engineering*, Montana State University, Bozeman, MT 59717.
- [7] F. González-Longatt, C. Peraza y C. Villanueva. “Comportamiento Dinámico de Plantas de Celdas de Combustible: Ambiente Distribuido”. *Revista de Ingeniería de Universidad de Carabobo (UC)*, Diciembre 2004, Vol 11, N° 3, Valencia, 2005.
- [8] M. El-Sharkh, A. Rahman, M. Alam, A. Sakla, P. Byrne, T Thomas, “Analysis of Active and Reactive Power Control of a Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant,” *IEEE Transaction on Power System*, VOL. 19, No. 4, November 2004.
- [9] Y. Zhu and K. Tomsovic, “Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells”, *Electric Power Systems Research* 62(2002), pp. 1-11.
- [10] J. Padulles, G.W. Ault, J.R. McDonald, “An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation”, *J. Power Sources* 86 (2000) 495\_ 500.