

PILAS DE COMBUSTIBLE PEM: INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN Y MODELADO ORIENTADOS AL CONTROL DE TEMPERATURA

Moré, J. J.^(1,2) Puleston, P. F.^(1,2) Kunusch, C.^(1,2) Triaca, W. E.^(2,3)

⁽¹⁾ LEICI, Dpto. de Electrotecnia, UNLP, La Plata, Argentina.

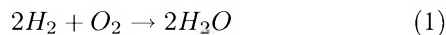
e-mail: jeronimojmore@gmail.com

⁽²⁾ Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

⁽³⁾ Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Fac. de Ciencias Exactas, UNLP, La Plata, Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno y el oxígeno directamente en electricidad. Su principio de funcionamiento se conoce desde hace más de un siglo y la reacción química que representa el proceso que tiene lugar en una celda de combustible es:



Por lo tanto, el hidrógeno es oxidado, produciendo agua. Para que esta reacción tenga lugar y sea posible extraer la energía liberada de ella, una celda de combustible se construye de una forma particular. El núcleo de la misma está constituido por dos electrodos y un electrolito. En las celdas de membrana electrolítica polimérica (PEM, del inglés *Polymer Electrolyte Membrane*), el electrolito es un film muy delgado de un material polimérico que permite, si se encuentra correctamente humidificado, la circulación de protones. Los electrodos se construyen de un material poroso y conductor eléctrico, generalmente una mezcla de polvo de carbón grafitizado y PTFE. En ellos se coloca un catalizador, comúnmente platino, que facilita el proceso químico dentro de la celda. En la Fig. 1 se ilustra esquemáticamente una celda de combustible, con las reacciones parciales que ocurren en cada electrodo de la misma (Larminie y Dicks, 2003).

En el ánodo, gracias a la presencia del catalizador, el hidrógeno se disocia en electrones y protones. El electrolito permite la circulación de protones, pero no de electrones. Así, en el cátodo, el oxígeno reacciona con los protones que atraviesan el electrolito y con los electrones que deben viajar desde el ánodo por un circuito externo. De esta manera, se genera energía eléctrica, produciendo agua y calor como subproductos.

La reacción química que se sucede en la celda de combustible, que en forma global se indica en (1), genera una diferencia de potencial de reposo de aproximadamente 1 V. Llevado a la práctica, se logra una tensión de funcionamiento de una celda de combustible dentro del rango de 0,4 y 0,8 V aproximadamente, dependiendo de la corriente extraída. Por lo tanto, para lograr niveles de tensión útiles para las diversas

aplicaciones prácticas, es necesario conectar varias celdas en serie, formándose entonces lo que se llama una pila de combustible.

La conexión en serie de las distintas celdas se realiza mediante las denominadas placas bipolares. Son placas de un material conductor de electricidad y poco poroso, por lo general grafito. Estas placas no sólo realizan la conexión eléctrica entre celdas, sino que cuentan también con una serie de canales para la distribución de los gases reactivos entre ellas.

Esta tecnología despierta mucho interés en todo el mundo, principalmente debido a que se perfila como un reemplazante de las actuales tecnologías basadas en combustibles fósiles, tanto en la industria automotriz como en la generación de electricidad domiciliaria. En este sentido, las pilas de combustible presentan como principales ventajas: mayor eficiencia respecto a los motores de combustión interna convencionales; bajas emisiones, ya que los subproductos de la reacción química son agua y calor; y bajo ruido, aún cuando es necesario el uso de compresores, bombas y ventiladores para su funcionamiento.

Como se da en un gran número de reacciones químicas, la que ocurre dentro de las celdas y pilas de combustible se ve beneficiada por el incremento de temperatura. En particular, en el caso de las de tipo PEM, la temperatura óptima de trabajo generalmente se encuentra en el rango de 60 a 80 °C. El valor exacto de temperatura óptima

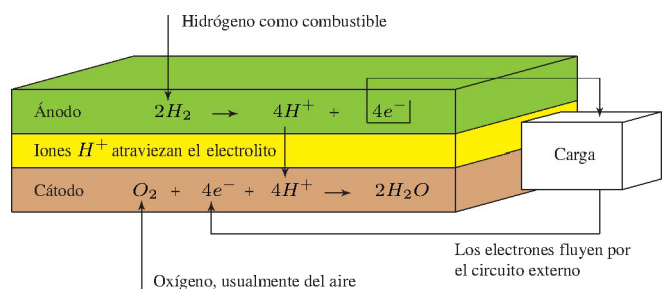


Fig. 1: Reacciones parciales en los electrodos de la celda de combustible

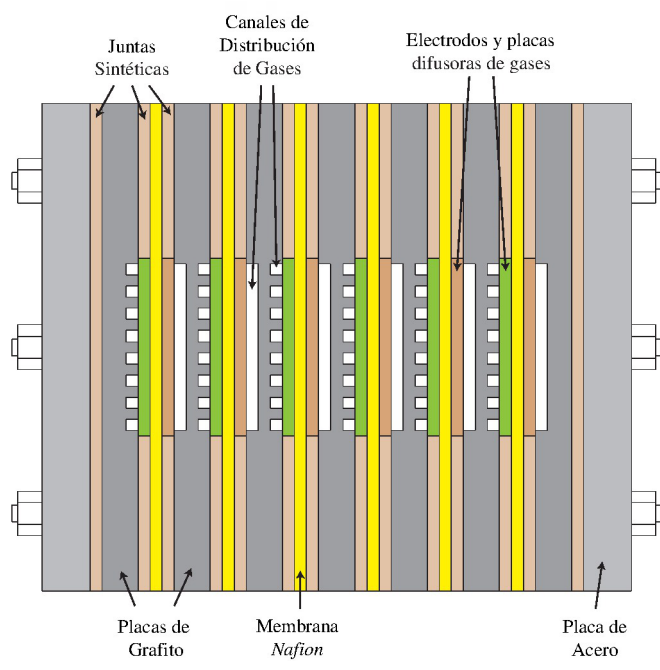


Fig. 2: Corte esquemático de una pila de combustible básica

de una celda o pila de combustible varía según el diseño particular de la misma y que membrana se utilice. Es así que resulta de vital interés regular la temperatura óptima de las celdas y pilas de combustible de manera de mantenerla dentro del valor óptimo de funcionamiento.

Se encuentra que la regulación de temperatura en una celda o pila PEM se puede dividir en dos casos diferentes. El primero de ellos se da en las pilas de combustible de bajas potencias (<100 W) donde es necesario entregarle calor para llevarla a la temperatura de trabajo. El segundo caso se da en pilas de gran potencia (>1 kW) donde el calor generado internamente en la pila (por la reacción química y la circulación de corriente) hace que sea necesario extraer calor para mantener la temperatura en el valor deseado. Para las pilas de potencias intermedias (entre 100 y 1000 W), la necesidad de calentar o refrigerar depende principalmente del diseño particular y del valor de corriente de trabajo.

En este marco, en el presente artículo se presenta la metodología propuesta para resolver el problema de control de temperatura de una pila de combustible tipo PEM experimental de baja potencia desarrollada en el INIFTA (ver Fig. 2).

2. MODELO TÉRMICO

El modelado de la pila de combustible tiene como objetivos principales el análisis del comportamiento térmico de la misma y el diseño y ensayo de controladores adecuados. En particular, se buscó encontrar un modelo de tipo modular, que permitiera de forma simple considerar mayor o menor cantidad de celdas en la pila. Además de esto, como para el desarrollo

del modelo térmico se utilizaron conceptos de la termodinámica y una geometría relativamente general, la metodología aquí expuesta es extrapolable a otras pilas de combustible, ajustando las dimensiones y características de los materiales.

La pila de combustible experimental sobre la cual se trabajó fue desarrollada en el *Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA)* con diseños propios (Tori *et al.*, 2005). La pila de combustible está formada por 6 celdas, compuestas por membranas *Nafion*[®] 115, cada una de $120 \mu\text{m}$ de espesor y con un área activa de 9 cm^2 . Las placas difusoras de gases están construidas en base a fibra de carbón de $250 \mu\text{m}$. Las placas bipolares fueron fabricadas en grafito y tienen 8 cm de lado por 6 mm de ancho. Todo el conjunto se completa mediante dos placas de acero de 1 cm de espesor en los extremos, como puede verse en el corte esquemático de la Fig. 2. Como elementos de sellado entre las placas bipolares y las membranas se utilizan juntas sintéticas de $250 \mu\text{m}$ de espesor.

El desarrollo del modelo constó de dos etapas principales. En la primera de ellas se desarrolló el modelo teórico de una celda unitaria, resultado que luego fue utilizado para la obtención del modelo de la pila de combustible completa. Para ello, se consideraron valores típicos de las características relevantes de los materiales involucrados (Khandelwal y Mench, 2006). Como segunda etapa del modelado, se realizó un ajuste y validación basado en mediciones sobre la pila.

2.1. Modelo Térmico de una celda unitaria.

Como suposiciones para el desarrollo del modelo se consideraron parámetros concentrados, por lo que las temperaturas de cada pieza que forman la celda se consideró única y en el centro de cada una de ellas. Por otro lado, se despreciaron las capacidades térmicas de las juntas de sintéticas, de las placas difusoras de gases, de la membrana y de los gases dentro de los canales de distribución. Esta aproximación es posible debido a que los volúmenes de todos ellos son muy pequeños respecto a los de las placas de acero y los de las placas de grafito.

En la Fig. 3 se muestra un esquema de un corte de la pila de combustible, con los flujos de calor considerados luego de otras simplificaciones. La zona entre líneas punteadas de la mencionada figura es lo que corresponde a una celda unitaria. Para completar el modelo de la misma deben considerarse además las dinámicas de las placas de acero, por donde ingresa la potencia en forma de calor de las resistencias calefactoras. Sin embargo, esta zona marcada es de particular interés para el desarrollo del modelo térmico completo, como se indica en la subsección 2.2.

Con las consideraciones realizadas, es posible el planteo de un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, que representen térmicamente cada sección de la celda de combustible. A partir de ellas, es posible encontrar un equivalente eléctrico del modelo, que resulta

particularmente útil para el análisis del sistema. De la misma manera, es posible también encontrar un modelo de estados (Moré *et al.*, 2008), el cual es más adecuado para realizar simulaciones y diseño de controladores.

2.2. Modelo Térmico de la Pila de Combustible

Como se mencionó al principio de esta sección, una de las finalidades del modelo térmico buscado era que el mismo resultara modular. Por lo tanto, si bien es posible el cálculo del modelo térmico a partir de un esquema de la pila (como se hizo para la celda unitaria), se buscó aprovechar los resultados previos para simplificar el problema.

El proceso de construcción se basa en considerar el modelo térmico de la zona marcada entre líneas punteadas en la Fig. 3. En particular, contando con un equivalente eléctrico de dicha sección, es simple encontrar que conectando en serie 6 de estos tramos, se puede obtener la versión completa del modelo de la pila de combustible en cuestión.

Esta metodología permite entonces, a partir del modelo térmico de una celda única, obtener el modelo térmico de una pila de combustible de cualquier número de celdas, sólo intercalando bloques. En este caso, se asume como simplificación que la potencia calorífica producida en cada una de las membranas es igual en todas ellas.

Para completar el modelo, se debe incorporar la dinámica de los sensores de temperatura utilizados, asumiendo como salidas las temperaturas medidas.

Tras la realización de pequeños ajustes sobre algunos parámetros del modelo en base a mediciones reales sobre la pila de combustible (que se verán en la sección 4), se obtiene el modelo térmico final de la pila de combustible. Detalles adicionales pueden encontrarse en Moré *et al.* (2008).

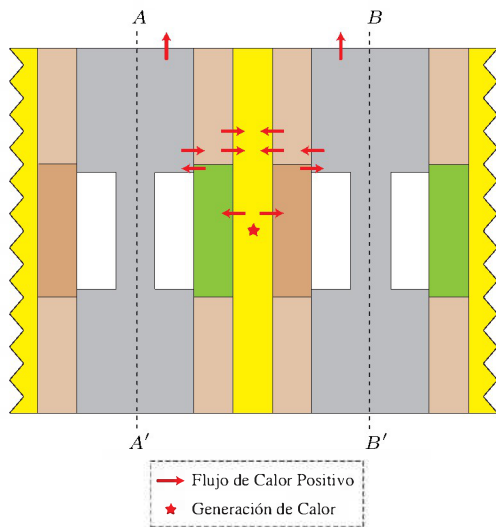


Fig. 3: Vista esquemática de los flujos de calor considerados

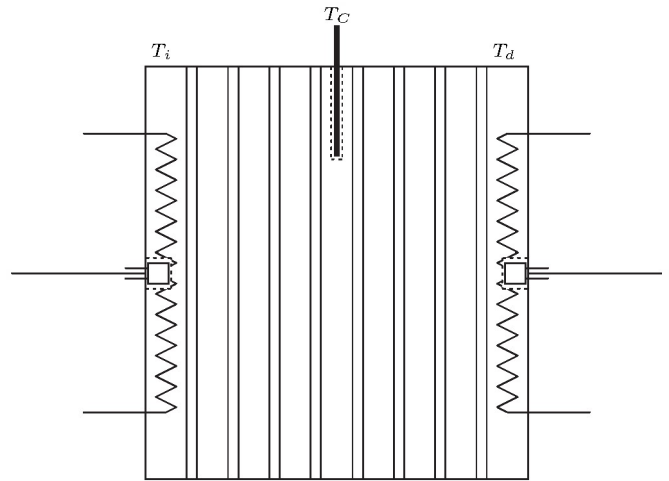


Fig. 4: Instrumentación propuesta para la medición y control de temperatura

3. INSTRUMENTACIÓN

Tanto en aplicaciones industriales como en laboratorios de investigación y desarrollo, es de vital importancia contar con un esquema de medición y actuación en tiempo real de las variables a controlar. De esta manera, la presente sección detalla el arreglo de sensores implementado para la medición del perfil de temperatura en la pila de combustible y el actuador desarrollado para calentamiento de la misma. La Fig. 4 muestra esquemáticamente la ubicación de los sensores de temperatura y las resistencias calefactoras instaladas. Los detalles de los mismos se brinda a continuación.

3.1. Sensores de Temperatura.

Mediante el diseño de la instrumentación para el sensado de temperatura en la pila, se busco contar con un mayor conocimiento del perfil de temperatura en la misma. Esto resulta de especial interés en laboratorio, para la realización de estudios y análisis del comportamiento del sistema.

Por lo tanto, se instalaron 3 sensores de temperatura (Fig. 4): en ambos extremos de la pila se trata de sensores semiconductores TMP35DZ, los cuales entregan una tensión proporcional a la temperatura, a razón de 10 mV/°C; en el centro, se instaló una termocupla tipo K, cuyo circuito de adaptación de señal entrega, en el rango de trabajo, una tensión equivalente a 40 mV/°C.

Si bien en este planteo particular se decidió utilizar tres sensores de temperatura, es posible instalar mayor cantidad en otras placas bipolares, a fin de un conocimiento más completo del gradiente de temperatura. En la sección siguiente se brindan detalles acerca del actuador utilizado para el manejo de las resistencias calefactoras.

3.2. Actuador para las resistencias calefactoras.

En un gran número de aplicaciones que requieren algún control de temperatura, típicamente suele utilizarse un esquema de actuación tipo ON/OFF. No obstante, a partir de estudios experimentales se detectó que este tipo de actuación aplicada a la pila genera un *ripple* de temperatura inadmisibles para esta aplicación de laboratorio particular. Esto determinó que es indispensable modificar el circuito de actuación, a los efectos de disponer de niveles intermedios de potencia y así llevar el *ripple* de temperatura a valores aceptables.

Existen diversos métodos para poder entregar potencia de forma proporcional a una acción de control dada. En particular, un método eficiente para lograrlo es lo que suele llamarse *control por ciclos distribuidos* (McCarthy y Danesh, 1978). Este método se basa en entregar un determinado valor de potencia promedio en una ventana de tiempo.

Este tipo de actuador consiste en una mejora por sobre un controlador del tipo *semiproporcional*, el cual se basa en una ventana de tiempo fija t_0 sobre la cual se conecta la carga durante un determinado tiempo $t_{on} < t_0$. El valor de t_{on} es seleccionado de acuerdo al valor de potencia media que se desea entregar a la carga. El método se llama *semiproporcional* porque la conexión y desconexión de la carga se realiza en los cruces por cero de la tensión de red, de manera que existe un número finito de valores que puede tomar t_{on} y así también la potencia entregada al sistema.

La mejora por sobre este método consiste en distribuir los ciclos o semiciclos en los que se conecta la carga en todo el intervalo de tiempo t_0 , lo que reduce el *ripple* por sobre el valor medio de potencia entregada al sistema (Fig. 5). La selección de t_0 se realiza considerando que sea suficientemente mayor al período de la tensión de red, lo cual asegura un gran número de niveles posibles de potencia media. Por otro lado, t_0 debe ser suficientemente menor respecto a la constante de tiempo dominante del sistema.

Para la instrumentación de la pila de combustible, este actuador fue construido a partir de un circuito integrado llamado *Binary Rate Multiplier (BRM)*. En particular se utilizó un BRM de 6 bits denominado SN7497. Este circuito cuenta con 6 líneas binarias (una por cada bit) que permite seleccionar la potencia entregada a las resistencias calefactoras, una entrada de reloj f y una salida Q para comandar un *triac* que conecta o no las resistencias calefactoras.

Internamente, el integrado realiza 6 divisiones de frecuencia de la señal de reloj f (por 2, 4, 8, etc.). Estos divisores se activan mediante una compuerta AND con el bit de entrada correspondiente. Las salidas de los divisores de frecuencia pasan por un sub-sistema que detecta los flancos positivos de la señal cuadrada, para generar así un pulso negativo en su salida. Finalmente,

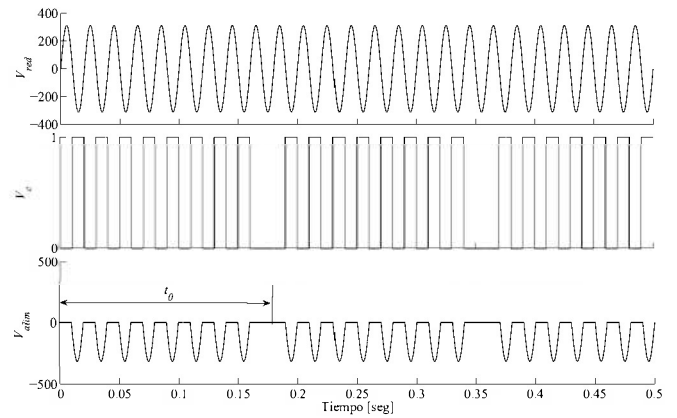


Fig. 5: Tensión de red, señal de control de la llave y tensión de alimentación de las resistencias calefactoras

las 6 salidas de estos sub-sistemas ingresan a una compuerta OR, cuya salida es la salida Q del integrado.

Utilizando como señal de reloj f una versión conformada o cuadrada de la tensión de red, el sistema se sincroniza con los cruces por cero de la tensión para comandar la llave correctamente. Luego, colocando en los 6 bits de entrada del integrado un número binario que sea función de la señal de error en temperatura, la salida Q generará los pulsos sincronizados con los cruces por cero para conmutar el *triac*, que hará las veces de llave.

Es importante destacar que utilizando como f a una señal de igual frecuencia y fase que la tensión de red, este dispositivo trabajará con un t_0 igual a 640 ms, con lo que se tendrán 64 semi-ciclos de red en la ventana. Por otro lado, con los 6 bits se pueden seleccionar 64 niveles distintos de potencia en la carga (desde 0 hasta el máximo). Dada las características del control por ciclos distribuidos aquí explicado, un aumento en el número de bits tendrá el efecto de una reducción del *ripple* en torno al valor de temperatura deseado. Sin embargo, el aumentar el número de bits en 2 (es decir, pasar de 6 bits a 8) eleva considerablemente el costo del actuador.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La presente sección presenta resultados de dos casos de estudio diferentes. En el primero de ellos, se brindan comparaciones entre mediciones de temperatura reales sobre la pila de combustible con respecto a resultados de simulación obtenidos para igual entrada al modelo. En el segundo caso, se muestra el resultado de un control a lazo cerrado mediante un controlador PID, pudiéndose apreciar una notable mejora con respecto a un control de temperatura ON/OFF.

Caso A. A través de aplicar a la entrada del actuador por ciclos distribuidos un escalón arbitrario, se tomaron registros de la evolución temporal de las 3 temperaturas medidas sobre la pila de combustible.

En la Fig. 6 se ilustran los resultados medidos y simulados de la temperatura central en la pila de combustible. Puede verse claramente que el modelo se ajusta bien a los datos experimentales, y sobre todo permite ver que la constante de tiempo dominante del modelo es muy cercana a la de la planta real. Por lo tanto, el ajuste realizado es suficiente para el planteo del lazo cerrado que se da a continuación.

Caso B. El lazo de control de temperatura para las simulaciones que se detallan a continuación se cerró mediante un controlador PID, tomando como salida la temperatura central de la pila.

La salida de este controlador es redondeada al entero más próximo para luego enviarse al BRM que se encarga de alimentar a las resistencias calefactoras. Los resultados de simulación de este lazo cerrado se muestran en la Fig. 7, donde se muestran las temperaturas del centro de la pila (con *set-point* de 60 °C) y la temperatura de los extremos de la pila, que se encuentran superpuestas. Además se muestra también el resultado de simulación para el caso de un control tipo ON/OFF. Para detalles adicionales en cuanto al diseño e implementación del control de temperatura, referirse a Moré *et al.* (2009).

De la Fig. 7 se observa que existe un pequeño *ripple* en la temperatura, pero su valor es despreciable frente a la temperatura de referencia. Por otro lado, el sobrepico inicial de temperatura es también pequeño, por lo que este control presenta un buen desempeño dinámico para regular la temperatura en la pila. Además, se aprecia una notable mejora respecto al caso de utilizar un control de tipo ON/OFF.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al INIFTA y muy especialmente al Dr. A. Visintin y al Ing. C. Tori por su apoyo y buena disposición, así como también al Ing. G. Garaventa y al Ing. A. Zumarraga por su colaboración.

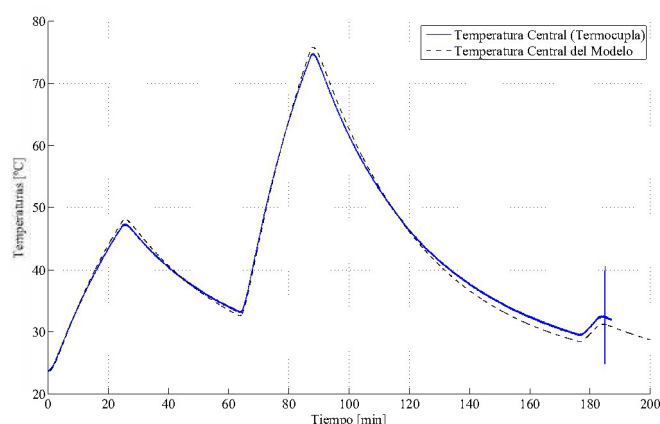


Fig. 6: Comparación entre el modelo desarrollado y los datos experimentales para la temperatura central.

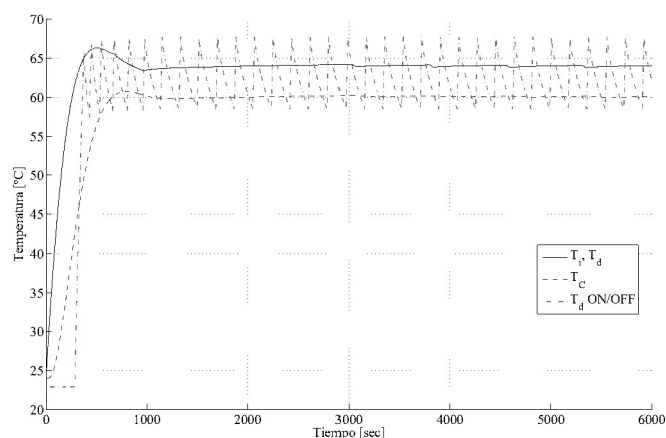


Fig. 7: Resultado de simulación a lazo cerrado del control de temperatura en la pila

REFERENCIAS

- Khandelwal, M. y M.M. Mench (2006). Direct measurement of through-plane thermal conductivity and contact resistance in fuel cell materials. *Journal of Power Sources* **161**, 1106–1115.
- Larminie, J. y A. Dicks (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. second ed.. John Wiley & Sons Inc.
- McCarthy, E.P. y J. Danesh (1978). A novel method of direct digital integral-cycle power control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation* **IECI-25**(2), 149–154.
- Moré, J. J., C. Kunusch, P. F. Puleston y C. Tori (2008). Instrumentación y modelado térmico de una pila de combustible pem. *XXI Congreso Argentino de Control Automático (AADECA 2008)*.
- Moré, J. J., P. F. Puleston, C. Kunusch y A. Visintin (2009). Control de temperatura de una pila de combustible tipo pem. *Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN)*.
- Tori, C. A., A. Visintin y W. E. Triaca (2005). Comportamiento en operación de una celda de combustible, unitaria, de tecnología pem de hidrógeno y oxígeno. *Primer Congreso de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN)*.