

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/234606565>

# Sistema de Seguimiento de la Tasa de Exceso de Oxígeno para Pilas de Combustible Mediante Cálculo Simplificado

Conference Paper · July 2012

CITATIONS

0

READS

162

6 authors, including:



**Oriol Aviño**

Spanish National Research Council

33 PUBLICATIONS 133 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Carlos Restrepo**

Delft University of Technology

56 PUBLICATIONS 671 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Roberto Giral**

Universitat Rovira i Virgili

141 PUBLICATIONS 3,290 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Javier Calvente**

Universitat Rovira i Virgili

91 PUBLICATIONS 2,325 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



[GENOME View project](#)



[Arquitecturas de buses de continua basados en pilas de combustibles PEM para sistemas autónomos: diseño, supervisión y control View project](#)

# Sistema de seguimiento de la tasa de exceso de oxígeno para pilas de combustible mediante cálculo simplificado.

Oriol Aviñó-Salvadó, Carlos Restrepo, Alfonso Romero, Roberto Giral, Javier Calvente, Enric Vidal-Idiarte  
DEEEA, Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, España

e-mail: alfonsojose.romero@urv.cat, roberto.giral@urv.cat

**Resumen**—En este artículo se presenta un equipo desarrollado para monitorizar el funcionamiento de una pila de combustible. Se pretende calcular el parámetro denominado tasa de exceso de oxígeno ( $\lambda_{O_2}$ ) a partir de las variables medidas sobre la propia pila. El principal objetivo es tener en todo momento un conocimiento detallado de si la pila está trabajando en un punto eficiente y seguro. Se presenta el diseño completo de la etapa de monitorización basada en un microcontrolador dsPIC así como algunas simulaciones y resultados experimentales que justifican la validez del trabajo realizado. Se comparan también los resultados obtenidos para el cálculo del parámetro  $\lambda_{O_2}$  con un modelo clásico bien conocido en la literatura y una aproximación muy simple obtenida empíricamente y que permitiría reducir la potencia de cálculo requerida para la estimación del parámetro. Asimismo se detallan los resultados de los cálculos realizados para estimar el error cometido al realizar la citada aproximación.

**Palabras Clave**—Pila de combustible, tasa de exceso de oxígeno, sistema de monitorización.

## I. INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible son dispositivos que generan energía eléctrica a partir de un aporte continuo de elementos químicos. Debido a esto pueden entregar energía eléctrica mientras se mantenga el suministro de los reactivos [1]. Actualmente, la pila basada en membrana de intercambio de protones (PEM) gozan de gran popularidad debido a que presentan ventajas con respecto a otros sistemas de generación de energía y a otros tipos de pilas: baja temperatura de operación, alta densidad de potencia (lo que implica tamaño reducido), baja corrosión de los catalizadores y alta eficiencia [2].

Además de lo nombrado, las pilas de combustible necesitan contar con sistemas mecánicos que proporcionen el aporte de oxígeno al cátodo, formados por un compresor de aire y un intercambiador de humedad, un sistema de alimentación de combustible al ánodo. Igualmente disponen de una válvula de purga utilizada para eliminar impurezas y remanentes como gases inertes y partículas de agua que afectan a la potencia producida así como reactivos excedentes de la reacción. Las pilas también cuentan con un sistema de control de temperatura formado por un ventilador que regula la pila a la temperatura de operación adecuada.

Estas partes mecánicas son las que finalmente limitan las características dinámicas de salida en los sistemas basados en pilas PEM.

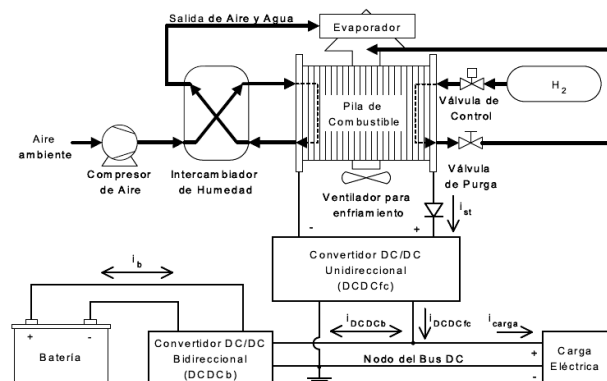


Fig. 1. Topología híbrida basada en pilas de combustible [3]

Los tiempos de reacción y las constantes de tiempo del sistema vienen marcadas por el sistema de entrega de los reactivos. Un incremento brusco en la demanda de la carga provocará una gran disminución de tensión en un corto tiempo, fenómeno conocido como de agotamiento de oxígeno [4]. Estas condiciones de operación son muy perjudiciales para la pila de combustible (en adelante también “FC”) y, por esta razón, la FC se considera un equipo de respuesta dinámica lenta respecto a muchos transitorios de carga requeridos. Para ello los sistemas basados en FC se deben complementar con baterías, ultra condensadores u otras fuentes auxiliares de potencia para asegurar una respuesta rápida a cualquier cambio en la carga de potencia. Consecuentemente, el sistema formado por la FC y otras fuentes de potencia auxiliares, conocidos como sistemas híbridos con FC han sido una de las áreas de estudio más intensivo en los últimos años [5-8].

En la figura 1 se muestra un esquema de los sistemas auxiliares que conforman una sistema basado en FC. Además de las fuentes auxiliares de potencia, se debe diseñar de una etapa intermedia de procesamiento de energía (típicamente un convertidor DC/DC) que, entre otras funciones, no permita a la pila de combustible trabajar en condiciones que la puedan llevar a una situación peligrosa [8]. Se han publicado diferentes trabajos analizando el comportamiento de las pilas de combustible en diferentes condiciones de trabajo.

En este trabajo se presenta el diseño de un equipo para monitorizar la tasa de exceso de oxígeno en una pila de combustible. Éste se utilizará más adelante para controlar la respuesta de un convertidor que se conectará a la salida de la pila de combustible para evitar que se trabaje en un punto peligroso para el equipo.

$T$	Temperatura [K]
$W_{cp}$	Flujo entrada aire en el cátodo [slmp]
$I_{st}$	Corriente en el "stack". [A]
$\phi_{ca,in}$	Humedad relativa (%)

TABLA I. VARIABLES IMPLICADAS EN EL CÁLCULO DE  $\lambda_{O_2}$

En [9] se muestra un sistema de testeo de la FC, equipado con sistemas de control versátiles que regulan el flujo de combustible, el flujo de aire, y la temperatura, para estudiar el comportamiento de una PEMFC bajo diferentes condiciones estequiométricas del aire. El diseño de una máquina de reluctancia de alta velocidad y trifásica (SRM) presentado en [9] es necesario para manejar un compresor vigilando la gestión del aire para una aplicación de automoción con FC, ya que esta clase de compresor es ampliamente usado en aplicaciones de alta velocidad. Los dos modelos de lazos de control predictivos propuestos y comparados en [10] tienen como objetivo satisfacer el criterio de evitar el fenómeno de agotamiento de oxígeno y el criterio de máxima eficiencia para la FC. Un objetivo muy similar se persigue en [11], donde se analizan las limitaciones en las prestaciones y las ventajas e inconvenientes asociadas con compresor impulsado por el suministro de aire y se discuten diferentes arquitecturas de controladores feed-forward y feed-back para evitar el agotamiento de oxígeno durante cambios de carga. Un modelo dinámico circuital eléctrico de una PEMFC que estima la relación de exceso de oxígeno es presentado en [12], y se usa en [13] para implementar un sistema de simulación en tiempo real. En [14] un modelo simplificado de motor síncrono de imanes permanentes se usa para alimentar la FC con aire. Este control asegura menores excursiones desde el punto de equilibrio del motor, reduciendo el riesgo de agotamiento de oxígeno, y se reacciona rápidamente a cambios en la carga.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en el apartado II se muestran los modelos utilizados en la bibliografía para calcular el factor de exceso de oxígeno y proponemos una simplificación mostrando los cálculos efectuados para el error cometido. En el apartado III se muestra el diseño hardware y software de un instrumento basado en un microprocesador dsPIC para la monitorización de la tasa de exceso de oxígeno. En el apartado IV se mostrarán los resultados obtenidos experimentalmente comparando los dos modelos aplicados para el cálculo y en el V veremos las conclusiones y propuestas de trabajo futuro.

## II. CÁLCULO DE LA TASA DE EXCESO DE OXÍGENO ( $\lambda_{O_2}$ )

La tasa de exceso de oxígeno ( $\lambda_{O_2}$ ) es la variable que define la relación (1) entre el oxígeno entregado al cátodo de la FC ( $W_{O_2,ca,in}$ ) y el consumido en la reacción ( $W_{O_2,reacted}$ ) [2], en cuyo cálculo se ven involucradas las variables definidas en la tabla I.

$$\lambda_{O_2}(T, \phi_{ca,in}, W_{cp}, I_{st}) = \frac{W_{O_2,ca,in}}{W_{O_2,reacted}} \quad (1)$$

Se trata de una variable de gran interés debido a que un valor de la misma por debajo de la unidad supone un daño en la FC, por lo que diversos autores han realizado controles en diversos puntos de trabajo [3, 15]. Por tanto debe cumplirse la condición (2):

$$\lambda_{O_2} \geq 1 \quad (2)$$

El cálculo anterior es complejo y requiere de un tiempo importante de cálculo, limitando el ancho de banda para la implementación de un control. Sin embargo, en base a los valores observados en el sistema de monitorización de una pila Ballard Nexa 1200, se ha logrado obtener una aproximación (3). Ésta permite simplificar notablemente los cálculos.

$$\lambda_{O_2}(W_{cp}, I_{st}) \cong 1,27 \cdot \frac{W_{cp}}{I_{st}} \quad (3)$$

Para ello se ha realizado la interpolación y correlación de los valores de corriente en la FC, flujo de entrada de aire y tasa de exceso de oxígeno. Todos ellos se obtuvieron mediante la observación de los datos mostrados por pantalla en el sistema de monitorización suministrado por el fabricante.

La aproximación propuesta (3) no depende de la temperatura, así como tampoco de la humedad relativa  $\phi_{ca,in}$ . De hecho, numerosas publicaciones [10, 12, 15, 16] hacen aproximaciones al respecto del valor de dichas variables. Por ello, es de interés estudiar el error que puede suponer el no tenerlas en cuenta.

Desarrollando la ecuación (1), y asumiendo un valor de humedad relativa que tienda a cero, se obtiene la siguiente expresión:

$$\lambda_{O_2}(W_{cp}, I_{st}) = 1,31 \cdot \frac{W_{cp}}{I_{st}} \quad (4)$$

Se ha verificado que el máximo de  $\lambda_{O_2}(\phi_{ca,in})$  se da para  $\phi_{ca,in}=0$ , mientras que su mínimo se encuentra para  $\phi_{ca,in}=1$ . Así pues se asumen dichos valores en la ecuación (1) para calcular el error absoluto máximo en base a un punto de trabajo crítico. Dicho punto se toma entorno a la corriente máxima de la FC, en éste caso 60 A. Se sabe que para un nivel de carga extremo  $\lambda_{O_2}$  presenta un valor mínimo, por lo que un error debido a la aproximación sería más crítico. De acuerdo con lo anterior, se obtiene la expresión del error absoluto (5).

En éste sentido, en la figura 2 se muestra la evolución del error absoluto de  $\lambda_{O_2}$  en función del flujo de entrada de aire y la temperatura. Se ha tomado todo el rango de funcionamiento posible de dichas variables en base al manual de la FC [17].

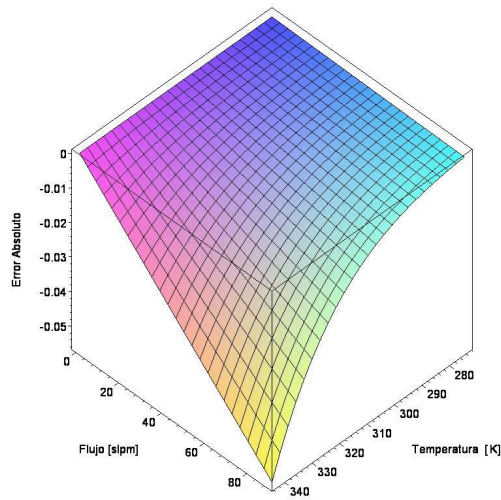


Fig. 2. Representación del error absoluto (5) en función de Temperatura [K] y Flujo de entrada de aire [slmp]

$$E_{abs}(I_{st} = 60) = \lambda_{O_2}(T, \phi_{ca,in}, W_{cp}, I_{st}) - 1,31 \cdot \frac{W_{cp}}{I_{st}} \quad (5)$$

Dado que el error absoluto crece para una mayor temperatura y un mayor volumen de flujo de entrada de aire, se calcula el error relativo (6) en base al punto donde el error absoluto es máximo,

$$\begin{aligned} e_{rel}(T = 353.15, \phi_{ca,in} = 1, W_{cp} = 85, I_{st} = 60) = \\ \frac{\lambda_{O_2}(T, \phi_{ca,in}, W_{cp}, I_{st}) - 1,31 \cdot \frac{W_{cp}}{I_{st}}}{\lambda_{O_2}(T, \phi_{ca,in}, W_{cp}, I_{st})} \cdot 100 = -2,92\% \end{aligned} \quad (6)$$

Se entiende que dicho valor del error es tolerable en una aplicación de cálculo de la tasa de exceso de oxígeno, ya que es del orden del que podría inducir el propio dispositivo de medida. Sin embargo, por lo crítico del punto de trabajo, se cree oportuno ajustarlo para que el error asociado al método de cálculo jamás induzca a la obtención de un valor menor al real. Para ello, conviene que el signo del error sea positivo, por lo que se reduce el coeficiente que multiplica la relación entre flujo de aire y corriente en la pila en la ecuación (4). La inversión de signo se produce para (7), como se observa en la figura 3.

$$E_{abs}(I_{st} = 60) = \lambda_{O_2}(T, \phi_{ca,in}, W_{cp}, I_{st}) - 1,27 \cdot \frac{W_{cp}}{I_{st}} \quad (7)$$

De acuerdo con la figura 3 se calcula el error relativo máximo, tomando la temperatura mínima ambiente a que la FC puede funcionar,  $T=276.15$  K [17].

$$\begin{aligned} e_{rel}(T = 276.15, \phi_{ca,in} = 1, W_{cp} = 85, I_{st} = 60) = \\ \frac{\lambda_{O_2}(T, \phi_{ca,in}, W_{cp}, I_{st}) - 1,27 \cdot \frac{W_{cp}}{I_{st}}}{\lambda_{O_2}(T, \phi_{ca,in}, W_{cp}, I_{st})} \cdot 100 = 3,05\% \end{aligned} \quad (8)$$

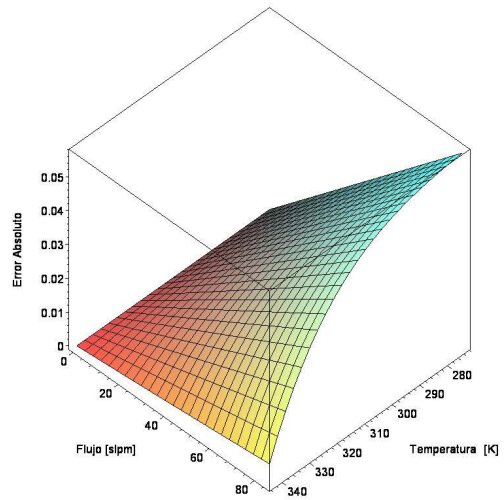


Fig. 3. Representación del error absoluto (7) en función de Temperatura [K] y Flujo de entrada de aire [slmp]

Si bien el error en base a la ecuación (8) es asumible, se debe asegurar que la aproximación (3) sigue siendo válida cuando la FC se encuentra en régimen dinámico. Para ello se estudia el comportamiento del error relativo en función de las posibles combinaciones entre la intensidad en la FC y el flujo de entrada de aire. Considerando la premisa de temperatura  $T=276.15$  K, con la que el error presenta su máximo, se determina que el error se mantiene estable entorno al 3,05 %. Por tanto, se puede dar por válida la aproximación (3).

### III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EMBEBIDO DE LA TASA DE EXCESO DE OXÍGENO

En los apartados anteriores, se han presentado las principales razones por las cuales la tasa de exceso de oxígeno debe permanecer por encima de ciertos valores. Con tal de monitorizar dicho valor y comprobar la validez de la aproximación propuesta en el punto anterior, se decidió diseñar el sistema que se detalla a continuación.

Éste presenta principalmente las siguientes etapas: sensado y acondicionamiento de la información de las corrientes y tensión de salida de la FC, digitalización mediante el conversor A/D del microcontrolador de las variables principales, cálculo de la tasa de exceso de oxígeno, salida en forma analógica y lineal de las variables  $\lambda_{O_2}$ , flujo de aire y temperatura de la pila mediante un conversor D/A y finalmente muestra por pantalla LCD las variables clave.

Igualmente, se ha provisto al sistema de un teclado, con la finalidad de ofrecer diferentes opciones al usuario creando una interfaz, una alarma lumínica para indicar si en algún momento la tasa de exceso de oxígeno es inadecuada y la circuitería necesaria para la implementación de una comunicación con un dispositivo de almacenamiento externo.

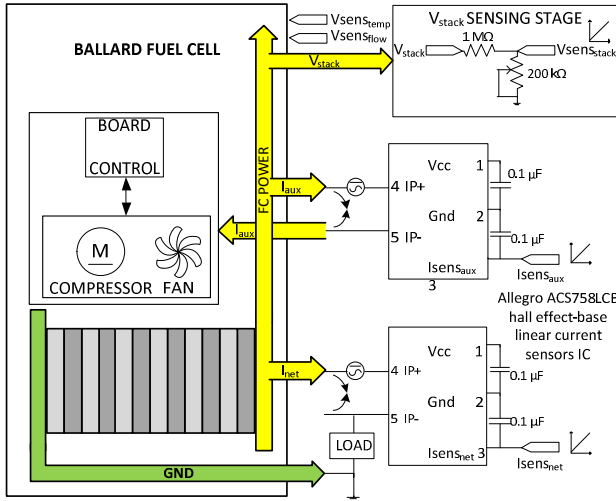


Fig. 4. Representación del sistema de la FC y sus etapas de sensado

Esta sección presenta las principales características a nivel de hardware y software del sistema.

#### A. Hardware del sistema de monitorización de la tasa de exceso de oxígeno.

##### 1) Sensado y acondicionamiento de variables clave.

Las variables clave para el cálculo de la tasa de exceso de oxígeno son la corriente total de la pila, el flujo de aire de entrada y finalmente la temperatura de la pila.

En la placa de control de la FC proporcionada por el fabricante, se han podido identificar y sensar las señales provenientes de los sensores del flujo de entrada de aire y de la temperatura de la pila. Igualmente se mide el voltaje en bornes de la FC mediante un divisor resistivo.

Con el fin de medir los valores de las corrientes de la pila se usan dos sensores lineales Allegro ACS758LCB de efecto-Hall, que monitorizan la corriente neta aportada a la carga “ $I_{net}$ ” y la corriente que realimenta los elementos de control de la FC, “ $I_{aux}$ ”. Dichos sensores presentan una salida de 2,5 V para 0 A y una sensibilidad de 40 mV/A. En la figura 5 se muestra el acondicionamiento realizado de acuerdo con (9) con el objetivo de obtener una señal de la suma de ambas adaptada al rango de valores necesario (de 0 a 62,5 A).

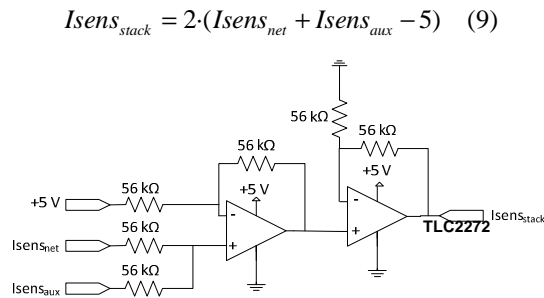


Fig. 5. Etapa de acondicionamiento de la suma de corrientes.

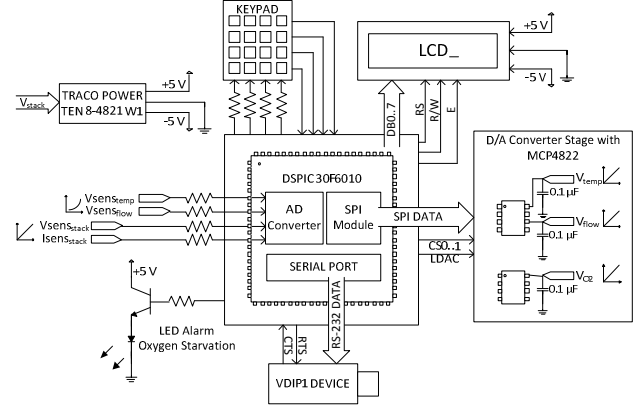


Fig. 6. Esquema del sistema de monitorización

##### 2) Sistema embebido de monitorización.

Para la realización del sistema se escogió el dsPIC 30F6010, por su flexibilidad y por ser un microcontrolador de bajo coste que proporciona una capacidad de cálculo suficiente para la implementación del sistema de monitorización propuesto. Éste dispositivo aporta, entre otros, los módulos de adquisición A/D con 10 bits de resolución, transmisión RS-232, comunicación mediante bus SPI, así como hasta 68 entradas/salidas digitales que permiten realizar las diferentes tareas necesarias.

##### 3) Etapa de conversión D/A.

El objetivo principal del sistema anterior es el cálculo de  $\lambda_{O_2}$  y una representación lineal de las señales de flujo de entrada de aire y temperatura de la FC. Dado que se quieren monitorizar externamente los resultados y se pretende en un futuro utilizar la información de salida del equipo para realizar un control de un convertor DC/DC conectado a la salida de la FC, se dota al sistema de una etapa de conversión D/A mediante comunicación SPI con el microcontrolador. Los convertidores utilizados son los MCP4822.

#### B. Software del sistema de monitorización de la tasa de exceso de oxígeno.

De acuerdo con la estructura hardware implementada, se requiere desarrollar un software capaz de llevar a cabo las diferentes tareas de cálculo y gestión de datos.

Como se muestra en la figura 7, dicho sistema se encarga de la adquisición, cálculo y envío a los convertidores D/A de las diferentes variables (flujo de aire, temperatura y  $\lambda_{O_2}$ ) y también de la muestra por pantalla de las variables clave.

##### 1.) Adquisición, cálculo y envío a los convertidores D/A de las diferentes variables.

El sistema de monitorización que proporciona el fabricante de la FC usada en el experimento tan sólo es capaz de mostrar la evolución de las variables cada

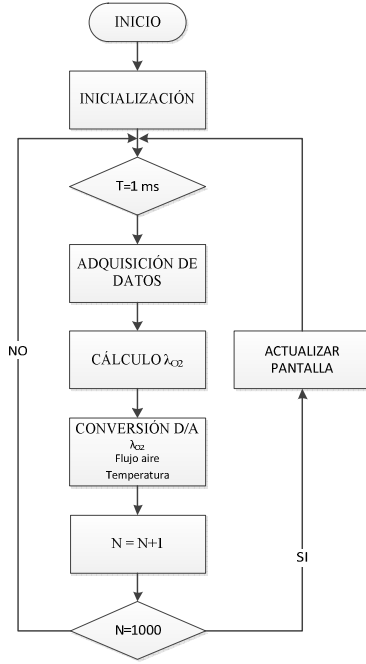


Fig. 7. Algoritmo implementado para la monitorización de  $\lambda_{O_2}$ .

200 ms. Es, por tanto, necesario mejorar dicha característica en el sistema de monitorización a desarrollar para poder observar con mayor detalle el comportamiento de la FC ante transitorios de carga rápidos.

Así pues, se diseña el sistema para que sea capaz de realizar la monitorización de las variables a una frecuencia de 1 kHz. Se ha escogido dicha frecuencia porque se ha estimado un tiempo de procesado de 650  $\mu$ s para la realización del cálculo de  $\lambda_{O_2}$  mediante (1) y (3). Para ello se programa uno de los timers del dsPIC para que genere una interrupción cada 1 ms, momento en el que se adquieren las diferentes variables de entrada,  $I_{sens\_stack}$ ,  $V_{sens\_stack}$ ,  $V_{sens\_temp}$ ,  $V_{sens\_flow}$ , mediante el conversor A/D. Los voltajes de los sensores de temperatura y flujo de entrada de aire identificados en la placa de control del fabricante se han caracterizado de acuerdo con los siguientes polinomios.

$$W_{cp} = 1,551 \cdot V^3_{sens\_flow} + 2,632 \cdot V^2_{sens\_flow} + 1,452 \cdot V_{sens\_flow} \quad [slpm]$$

$$T = 6,222 \cdot V^3_{temp} - 53,16 \cdot V^2_{temp} + 169,5 \cdot V_{temp} - 161,9 \quad [^{\circ}C]$$

Una vez conocidos los valores de las variables clave, se puede proceder al cálculo (1) de  $\lambda_{O_2}$ , así como mediante la aproximación propuesta (3). Es necesario mencionar que para (1), se ha tomado  $\phi_{ca,in} = 1$ .

Finalmente, el valor obtenido, junto con los del flujo de entrada de aire y temperatura de la FC se transmite al conversor D/A; siendo éstas señales accesibles para su monitorización.

## 2.) Muestra por pantalla de las variables clave.

Con el fin de crear un entorno más amigable con el usuario, cada segundo se refrescan los datos de  $\lambda_{O_2}$ , tensión, intensidad y temperatura en una pantalla LCD.

## IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se comparan los resultados obtenidos en base al método de cálculo teórico de la tasa de exceso de oxígeno (1) y su aproximación (3). Para ello se utiliza la FC Ballard Nexa 1200.

Se monitorizan mediante un osciloscopio la corriente y las señales provenientes de los conversores D/A que representan el flujo de entrada de aire y la tasa de exceso de oxígeno calculada mediante (1) y (3).

Como se observa en las figuras 8 y 9, el cálculo de la tasa de exceso de oxígeno realizado mediante ambos métodos presentan un comportamiento prácticamente idéntico. Además, tal y como se esperaba, el cálculo aproximado (Ch3) presenta un valor ligeramente mayor.

Se pueden justificar las constantes variaciones del coeficiente, aún en modo estacionario, debido a los picos de consumo de corriente. Se ha identificado que esos picos de consumo se deben a la electro-mecánica de la FC midiendo por separado ambas corrientes.

Respecto al flujo de entrada de aire, hay que tener en cuenta su lenta dinámica en el caso de aplicar grandes incrementos de carga, que causa caídas drásticas de  $\lambda_{O_2}$ , tal

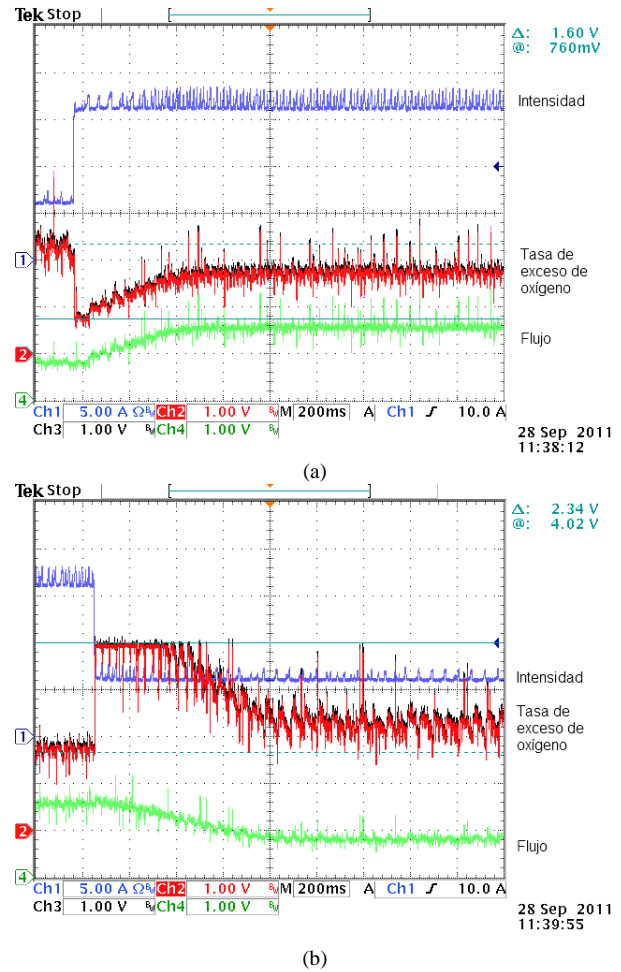


Fig. 8. Evolución de  $\lambda_{O_2}$  para a) incremento de carga de 10 A, b) decremento de carga de 10 A

y como se puede observar en la figura 8.a.

Cabe reseñar que las señales mostradas muestran las siguientes sensibilidades:  $I_{st}$  (Ch1): 5 A/V,  $\lambda_{O_2}$  (Ch2, Ch3): 2 V<sup>-1</sup> y  $W_{cp}$  (Ch4): 32 slmp/V

En el caso de decrementos de carga, figura 8.b, se da el efecto contrario (se aprecia saturación del convertidor D/A para  $\lambda_{O_2}$  superior a 8). Sin embargo, dicho efecto no es crítico para la FC.

## V. CONCLUSIONES

Del trabajo que se ha realizado se pueden extraer algunas conclusiones como que es posible realizar un sistema de monitorización del factor de exceso de oxígeno de bajo coste y que funcione correctamente con los requerimientos temporales necesarios para testear transitorios rápidos. La aproximación que se ha empleado para el cálculo de la tasa de exceso de oxígeno es válida en todo el margen de funcionamiento considerado y ha demostrado un bajo error frente al modelo normalmente utilizado tanto mediante simulaciones como experimentalmente.

Como trabajo futuro se propone utilizar el equipo para realizar controles de convertidores a la salida de la pila de combustible que permitan limitar la razón de cambio de la corriente a su salida.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación Español bajo los proyectos TEC2009-13172, DPI2009-14713-C03-02, y la beca FPU AP2008-03305.

## REFERENCIAS

- [1] J. Correa, F. Farret, L. Canha, and M. Simoes, "An electrochemical based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 1103 – 1112, 2004.
- [2] T. Pukrushpan, G. Stefanopoulou, and H. Peng, "Control of fuel cell breathing," *Control Systems, IEEE*, vol. 24, pp. 30-46, 2004.
- [3] C.A. Ramos-Paja, C. Carrejo, A. Romero, E. Vidal-Idiarte, R. Giral, C. Bordons, M. Milanovic, "Control suave del exceso de oxígeno en una pila de combustible limitando la razón de cambio de la potencia con una rampa de compensación dinámica," presented at SAAEI, 2008.
- [4] T. Pukrushpan, and H. Peng, , *Control of fuel cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*.: Springer-Verlag London, 2004.
- [5] F. Segura, J. M. Andujar, and E. Duran, "Analog Current Control Techniques for Power Control in PEM Fuel-Cell Hybrid Systems: A Critical Review and a Practical Application," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 1171-1184, 2011.
- [6] A. Shahin, M. Hinaje, J. P. Martin, S. Pierfederici, S. Rael, and B. Davat, "High Voltage Ratio DC-DC Converter for Fuel-Cell Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3944-3955, 2010.
- [7] M. J. Vasallo, J. M. Andujar, C. Garcia, and J. J. Brey, "A Methodology for Sizing Backup Fuel-Cell/Battery Hybrid Power Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1964-1975, 2010.
- [8] Z. Xuancai, L. Xiao, S. Guoqiao, and X. Dehong, "Design of the Dynamic Power Compensation for PEMFC Distributed Power System," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1935-1944, 2010.
- [9] F. Marignetti, M. Minutillo, A. Perna, and E. Jannelli, "Assessment of Fuel Cell Performance Under Different Air Stoichiometries and Fuel Composition," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 2420-2426, 2011.
- [10] A. Arce, A. J. del Real, C. Bordons, D. R. Ramirez, "Real-Time Implementation of a Constrained MPC for Efficient Airflow Control in a PEM Fuel Cell," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1892-1905, 2010.
- [11] S. Kyung-Won and A. Stefanopoulou, "Performance Limitations of Air Flow Control in Power-Autonomous Fuel Cell Systems," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 465-473, 2007.
- [12] C. A. Ramos-Paja, R. Giral, L. Martinez-Salamero, J. Romano, A. Romero, G. Spagnuolo, "A PEM Fuel-Cell Model Featuring Oxygen-Excess-Ratio Estimation and Power-Electronics Interaction," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1914-1924, 2010.
- [13] J. Jee-Hoon, S. Ahmed, and P. Enjeti, "PEM Fuel Cell Stack Model Development for Real-Time Simulation Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 4217-4231, 2011.
- [14] R. J. Talj, D. Hissel, R. Ortega, M. Becherif, and M. Hilairet, "Experimental Validation of a PEM Fuel-Cell Reduced-Order Model and a Moto-Compressor Higher Order Sliding-Mode Control," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1906-1913, 2010.
- [15] J.K. Gruber, C. Bordons, M.Doll, "Control de la tasa de exceso de oxígeno de una pila de combustible," *XXIX Jornadas de Automática, 2008. SAAEI '08*, 2008.
- [16] S. Jing and I. Kolmanovsky, "Load governor for fuel cell oxygen starvation protection: a robust nonlinear reference governor approach," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 911-920, 2005.
- [17] Ballard, *Nexa Power Module User's Manual*. Burnaby, Canada, 2003.