

# CONTROL DE LA TASA DE EXCESO DE OXÍGENO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE

J.K. Gruber y C. Bordons

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n., 41092 Sevilla  
jgruber@cartuja.us.es, bordons@esi.us.es

M. Doll

Institut für Systemdynamik, Universitätsbereich Vaihingen, Universität Stuttgart,  
Pfaffenwaldring 9 (3. OG), 70569 Stuttgart, Germany

## Resumen

*Las pilas de combustible representan un área de gran interés industrial por la posibilidad de generar energía limpia, especialmente las pilas de tipo PEM (Polymer Electrolyte Membrane or Proton Exchange Membrane) por su uso en aplicaciones estacionarias y automovilísticas. La tasa de exceso de oxígeno que expresa la proporción entre el oxígeno que entra y el oxígeno que reacciona en las células de la pila, se usa habitualmente para garantizar seguridad y obtener un alto rendimiento. Para controlar la tasa de oxígeno se desarrolla una estrategia jerárquica de control que consiste en una prealimentación y un controlador PI que usa el voltaje del motor del compresor para manipular el flujo de aire que entra a la pila de combustible. El diseño del controlador se realiza con una pila de combustible comercial. La estrategia de control se implementa y valida en experimentos reemplazando el controlador de fábrica. El comportamiento del sistema y del controlador se muestra mediante resultados experimentales.*

**Palabras clave:** Pila de combustible, tasa de exceso de oxígeno, control jerárquico, prealimentación.

## 1. Introducción

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que generan continuamente energía eléctrica a partir de reactivos. Aunque las pilas de combustible se inventaron hace más de un siglo han recibido una gran atención en las últimas décadas por su generación de energía limpia, tanto en aplicaciones estacionarias como automovilísticas. Todavía quedan muchos problemas no resueltos en cuanto a materiales, fabricación y mantenimiento siendo el control automático uno de los más importantes. Este trabajo se centra en pilas de combustible de tipo PEM (Polymer Electrolyte Membrane o Proton Exchange Membrane)

que operan a temperaturas bajas y poseen una respuesta dinámica rápida, densidad energética alta, tamaño pequeño, corrosión baja y alta eficiencia. Un alto rendimiento de estos dispositivos está vinculado directamente al control automático, justificando el estudio de diferentes alternativas de control.

Para mantener la reacción química en activo hay que suministrar hidrógeno y oxígeno, reactivos comunes para las pilas de combustible de tipo PEM. La variable de control principal en pilas de combustible de tipo PEM es el flujo de aire suministrado por un compresor. El suministro de hidrógeno, normalmente almacenado en bombonas o tanques de alta presión, se realiza a través de válvulas rápidas con el fin de seguir una proporción deseada del flujo de aire. La proporción entre el flujo de oxígeno que entra en la pila de combustible y el oxígeno consumido como consecuencia de la reacción electroquímica, se denomina tasa de exceso de oxígeno o  $\lambda_{O_2}$  [1]. Esta tasa tiene que cumplir la relación estequiométrica requerida para generar la corriente demandada, en caso contrario ocurre el fenómeno de *starvation* (insuficiencia de oxígeno). Este fenómeno resulta en una degradación rápida de las células y una generación eléctrica baja y la única manera de terminarlo es parar los flujos de reactivos y la demanda de corriente [2]. Existen varios estudios sobre este fenómeno no deseado y en la literatura se propone el control de  $\lambda_{O_2}$  para evitarlo [1, 3]. Se han propuesto muchas diferentes estrategias de control, entre ellas el control por prealimentación [4], LQR [4, 5], redes neuronales [6] y control predictivo basado en modelo [2, 7], pero no han sido validadas en sistemas reales. En este trabajo se desarrolla una estrategia jerárquica de control basada en una prealimentación y un controlador PI usando el motor del compresor para regular la tasa de exceso de oxígeno. La estrategia se implementa en una pila de combustible real y se valida el control mediante resultados experimentales.

El artículo está organizado de la siguiente manera:

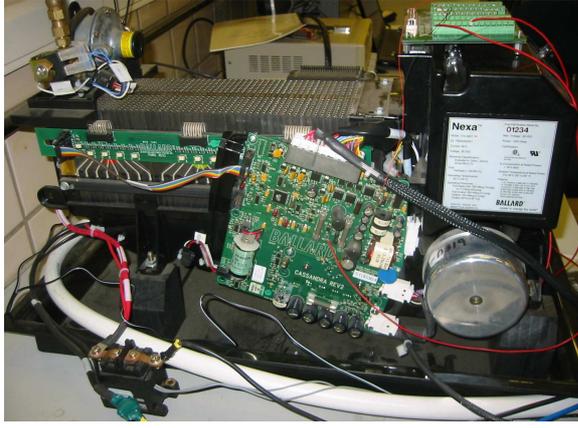


Figura 1: La pila de combustible Nexa de Ballard en el laboratorio.

el apartado 2 presenta el funcionamiento de la pila de combustible y el problema de control. En el apartado 3 se presenta una descripción detallada del diseño del controlador. En el apartado 4 se muestran los resultados experimentales obtenidos y en el apartado 5 las conclusiones.

## 2. Descripción del sistema

Este apartado da una descripción detallada de la pila de combustible usada, de la entrada, salida y perturbación del sistema, así como el objetivo de control.

### 2.1. Módulo Nexa

Para la realización del trabajo se ha usado una pila de combustible de tipo PEM de Ballard de 1,2 kW (Nexa Power Module [11], ver la figura 1), que se puede considerar como sistema de referencia por su uso extenso por muchos grupos de investigación y es representativa para el estado de arte de la tecnología PEM. La pila consta de 46 células, cada una con una membrana de 110 cm<sup>2</sup>. El sistema dispone de una humidificación auto-regulable y un ventilador pequeño para la refrigeración. Para evitar daños de la membrana se controla la proporción de presión entre ánodo y cátodo y, como consecuencia, los flujos de hidrógeno y aire están correlacionados. El controlador desarrollado en este trabajo se ha implementado sustituyendo el controlador de fábrica. Para simular una demanda energética variable se ha usado una carga eléctrica externa.

La pila de combustible viene, en su configuración original, con un sistema de control y un programa para medir y adquirir datos de estados internos por un puerto serie. El programa da acceso a muchas medidas, pero con un tiempo de muestreo

relativamente alto de 200 ms. Además, se pueden escribir los datos medidos con el programa de Ballard en un archivo, pero no es posible acceder a ellos en tiempo real para otros fines.

Para permitir el acceso inmediato a las medidas de los sensores de la pila de combustible, Alejandro del Real y Alicia Arce, del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla, desarrollaron anteriormente un programa para leer los datos del puerto serie. Con el fin de medir algunas variables con un tiempo de muestreo más pequeño se ha usado una tarjeta multifuncional (PCI 6229) de *National Instruments*. Las salidas analógicas de la tarjeta permiten aplicar señales directamente a los actuadores de la pila de combustible y, como consecuencia, la implementación de un controlador externo.

### 2.2. Salida y perturbación del sistema

La pila de combustible se usa en una configuración con dos salidas medibles, el voltaje  $V_{st}$  de las células de la pila y el flujo de aire  $W_{cp}$  en la entrada del cátodo. Además se considera la corriente de carga  $I_{load}$  como perturbación medible. La tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  es una variable concentrada y se puede estimar con ayuda de las salidas y la perturbación.

En general se define la tasa de exceso de oxígeno como la proporción entre el oxígeno que entra al cátodo y el oxígeno que reacciona en las células de la pila. La tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  se considera una variable de rendimiento del sistema y su control es una tarea importante desde que este parámetro determina la seguridad de la pila de combustible.

La tasa de exceso de oxígeno viene definida como [4]:

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,ca,in}}{W_{O_2,reacted}} \quad (1)$$

con el flujo de oxígeno como una función del flujo de aire seco  $W_{a,ca,in}$  en la entrada del cátodo:

$$W_{O_2,ca,in} = x_{O_2,ca,in} W_{a,ca,in} \quad (2)$$

La fracción de masa de oxígeno  $x_{O_2,ca,in}$  se puede calcular con

$$x_{O_2,ca,in} = \frac{y_{O_2,ca,in} M_{O_2}}{y_{O_2,ca,in} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca,in}) M_{N_2}} \quad (3)$$

donde  $M_{O_2}$  y  $M_{N_2}$  son las masas molares de oxígeno y nitrógeno, respectivamente. Para la fracción de masa de oxígeno se asume un valor de  $y_{O_2,ca,in} = 0,21$ . El flujo de aire seco en la entrada del cátodo viene definido como:

$$W_{a,ca,in} = \frac{1}{1 + \omega_{ca,in}} W_{cp} \quad (4)$$

con la humedad específica

$$\omega_{ca,in} = \frac{M_v}{M_{a,ca,in}} \frac{p_{v,ca,in}}{p_{a,ca,in}} \quad (5)$$

y la masa molar de aire en la entrada del cátodo

$$M_{a,ca,in} = y_{O_2,ca,in} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca,in}) M_{N_2} \quad (6)$$

Las presiones de vapor  $p_{v,ca,in}$  y de aire seco  $p_{a,ca,in}$  para calcular la humedad específica  $\omega_{ca,in}$  vienen definidas como:

$$p_{v,ca,in} = \phi_{ca,in} p_{sat}(T_{ca,in}) \quad (7)$$

$$p_{a,ca,in} = p_{ca,in} - p_{v,ca,in} \quad (8)$$

donde  $\phi_{ca,in}$  es la humedad relativa de aire en la entrada del cátodo.  $p_{sat}(T_{ca,in})$  y  $p_{ca,in}$  representan la presión de vapor saturado para determinada temperatura  $T_{ca,in}$  y la presión en la entrada del cátodo, respectivamente.

La tasa de reacción de oxígeno es proporcional a la corriente eléctrica substraída  $I_{st}$  de la pila de combustible y se puede expresar como:

$$W_{O_2,reacted} = M_{O_2} \frac{nI_{st}}{4F} \quad (9)$$

donde  $n = 46$  es el número de las células de la pila y  $F$  la constante de Faraday.

### 2.3. Objetivo de control

Como se ha mencionado en el apartado 2.2, la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  tiene una influencia fundamental sobre la seguridad de la pila de combustible. Por ello, [1] propone regular  $\lambda_{O_2} = 2$  para garantizar seguridad y lograr una eficiencia alta. En [9] se propone un perfil variable para la tasa de exceso de oxígeno para obtener la eficiencia más alta para cada valor de la carga eléctrica. Desviaciones de  $\lambda_{O_2}$  de la referencia implican una eficiencia más baja y desviaciones negativas aumentan la probabilidad de insuficiencia de oxígeno.

La insuficiencia de oxígeno ocurre cuando la presión parcial de oxígeno cae bajo un nivel crítico en cualquier lugar del cátodo [1]. El resultado es una disminución rápida del voltaje de las células y puede causar daños físicos de la membrana. Para evitar este fenómeno, la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  debe ser siempre mayor de 1:

$$\lambda_{O_2} > 1 \quad (10)$$

Por tanto, uno de los objetivos de control es la regulación de la tasa de exceso de oxígeno para evitar la insuficiencia de oxígeno.

El segundo objetivo de control de la pila de combustible es la maximización de la potencia neta.

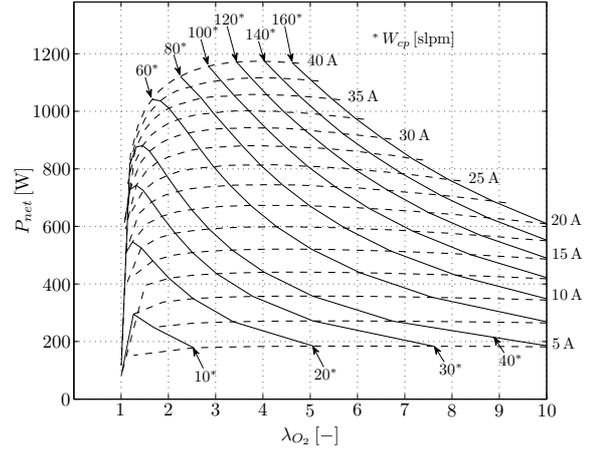


Figura 2: Potencia neta del model de simulación de la pila de combustible [10] en régimen estacionario para diferentes valores de la corriente de las células (línea rayada) y flujo de aire (línea continua).

La potencia neta  $P_{net}$  se puede definir de forma general como la diferencia entre la potencia generada  $P_{FCS}$  por las células y la potencia  $P_{aux}$  usada por el compresor, el ventilador y otros elementos auxiliares. Por lo tanto, la potencia neta viene definida como:

$$P_{net} = P_{FCS} - P_{aux} \quad (11)$$

La figura 2 muestra la relación entre la potencia neta  $P_{net}$  y la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  para diferentes corrientes de las células  $I_{st}$ . La figura se ha generado con un modelo de simulación detallado basado en primeros principios de la pila de combustible presentado en [10]. Empezando con un flujo de aire  $W_{cp}$  bajo se puede ver que la potencia neta aumenta con un creciente flujo de aire y una corriente constante. Después de llegar a la potencia neta máxima para una corriente determinada, un aumento adicional del flujo de aire resulta en una reducción de la potencia neta. La potencia neta máxima se encuentra, independientemente de la corriente  $I_{st}$ , alrededor de una tasa de exceso de oxígeno de aproximadamente 4. El valor exacto para obtener la potencia neta máxima se determinará en experimentos con la pila de combustible.

### 2.4. Entrada de control

El objetivo principal de un controlador externo es la regulación de la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$ . Como se ha mostrado en la figure 2 y en (1),  $\lambda_{O_2}$  depende básicamente de la corriente  $I_{st}$  y el flujo de aire  $W_{cp}$  en la entrada del cátodo. Como la corriente  $I_{st}$  es una perturbación no manipulable, hay que regular el flujo de aire para controlar la tasa de exceso de oxígeno.

Como la pila de combustible usada es un sistema cerrado, no se puede regular el compresor en su configuración original. Por lo tanto, se ha reemplazado el controlador de fábrica usando un microcontrolador ML4425CS conectado al motor del compresor. Con ello se ha creado una nueva entrada del sistema, el voltaje del motor del compresor  $V_{cm}$ , que permite la manipulación del motor del compresor y, como consecuencia, del flujo de aire en la entrada del cátodo.

### 3. Diseño de control para la tasa de exceso de oxígeno

Con los objetivos de control definidos y la nueva entrada de sistema se ha realizado el diseño del controlador. La idea es controlar la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  manipulando el voltaje del motor del compresor  $V_{cm}$ . Como ya se ha comentado anteriormente, las medidas de los sensores de la pila de combustible se puede leer sólo cada 200 ms del puerto serie. Con la estimación de la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  y usando los datos del puerto de serie, no se puede controlar un sistema con una dinámica tan rápida como es la pila de combustible [10]. Como la estimación de la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  (1) depende directamente del flujo de aire  $W_{cp}$  y de la corriente en las células  $I_{st}$ , se hace necesaria una frecuencia de señal más alta para estas dos medidas. Para superar este problema, se han realizado varios experimentos para identificar las dinámicas de tales variables.

#### 3.1. Medición del flujo de aire $W_{cp}$

Se mide el flujo de aire con un sensor que ha sido instalado en la entrada del compresor por el fabricante de la pila de combustible. En varios experimentos se ha medido la salida del sensor  $V_{sensor}$  (un voltaje) mediante la tarjeta de adquisición de datos con un tiempo de muestreo de 10 ms. Se ha observado que el voltaje  $V_{sensor}$ , después de aplicar un escalón en la entrada  $V_{cm}$ , llega a régimen estacionario en sólo un muestreo. Eso significa que el flujo de aire  $W_{cp}$  llega a régimen estacionario en menos de 10 ms. Las medidas del flujo de aire  $W_{cp}$  proporcionadas por el puerto serie se han correlacionado con el voltaje del sensor  $V_{sensor}$  medido con la tarjeta de adquisición de datos. Con esta configuración se puede calcular un mapa no lineal entre el voltaje del sensor y el flujo de aire

El sensor en la entrada del cátodo es un sensor termal que mide la velocidad del flujo de aire. Por lo tanto, hay que identificar la velocidad del aire como polinomio, dependiendo del voltaje del sensor [12]. Se han utilizado los valores del flujo de aire

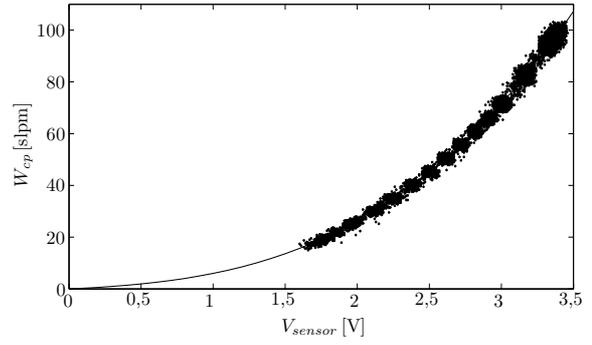


Figura 3: No linealidad estática entre el flujo de aire  $W_{cp}$  en la entrada del cátodo y el voltaje del sensor  $V_{sensor}$ . Comparación entre los datos experimentales (puntos) y la curva característica identificada (línea continua).

$W_{cp}$  proporcionados por el puerto de serie para calibrar la curva característica del sensor. Con el método de mínimos cuadrados se ha identificado la curva como polinomio de tercer orden:

$$W_{cp} = \psi_3 V_{sensor}^3 + \psi_2 V_{sensor}^2 + \psi_1 V_{sensor} \quad (12)$$

La figura 3 muestra la comparación entre la curva característica identificada y las medidas del flujo de aire proporcionadas por el puerto serie.

#### 3.2. Estimación de la tasa de exceso de oxígeno $\lambda_{O_2}$

La tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  (1) es una variable concentrada. Por ello no se puede medir directamente y hay que usar una estimación basada en las demás medidas. La estimación de la variable de rendimiento depende del flujo de aire  $W_{cp}$ , la corriente en las células  $I_{st}$ , la presión  $p_{ca,in}$ , la humedad relativa  $\phi_{ca,in}$  y la temperatura  $T_{ca,in}$ . Como se ha descrito en el apartado anterior, se puede medir el flujo de aire directamente. Para la corriente en las células  $I_{st}$  se dispone de medidas por el puerto serie, pero con un tiempo de muestreo muy alto. Además, los valores de la corriente  $I_{st}$  están filtrados numéricamente antes de estar disponible en el puerto serie.

La instalación de un nuevo sensor para medir la corriente en las células  $I_{st}$  ha sido imposible por la construcción de la pila de combustible como sistema cerrado. Por ello, se ha usado un estimador para la corriente en las células. La corriente generada por las células se usa para suministrar la carga ( $I_{load}$ ) y la corriente para los componentes auxiliares de la pila de combustible ( $I_{aux}$ ). Por lo tanto, la corriente generada por las células viene definida como:

$$I_{st} = I_{load} + I_{aux} \quad (13)$$

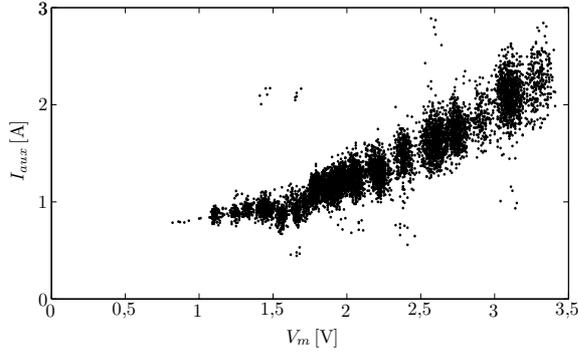


Figura 4: Corriente  $I_{aux}$  de los componentes auxiliares para diferentes valores del voltaje  $V_{cm}$  del motor de compresor.

Entonces, para calcular la corriente generada en las células  $I_{st}$  se usa las medidas de la carga  $I_{load}$  y se estima la corriente de los componentes auxiliares  $I_{aux}$ . Se han realizado varios experimentos con la pila de combustible para obtener información sobre el comportamiento de la corriente  $I_{aux}$  de los componentes auxiliares. La figura 4 muestra algunos resultados experimentales correlacionando la corriente  $I_{aux}$  con el voltaje de entrada  $V_{cm}$ . Se puede ver que la relación entre las dos variables parece tener la forma de un polinomio de segundo orden, pero también se observan algunos puntos muy lejos de esta relación.

Para estimar la corriente  $I_{aux}$  durante los experimentos se ha implementado un algoritmo adaptativo. Con el método de mínimos cuadrados recursivos, la corriente  $I_{aux}$  se calcula como:

$$I_{aux} = c_0 + c_1 V_{cm} + c_2 V_{cm}^2 \quad (14)$$

siendo  $V_{cm}$  la entrada y  $c_0$ ,  $c_1$  y  $c_2$  los parámetros adaptativos. Con (14) y el valor de la carga  $I_{load}$  medido se puede calcular la corriente  $I_{st}$  generada por las células usando (13). La figura 5 muestra la comparación entre la corriente generada por las células, la corriente estimada y la carga externa. Se puede observar que la corriente estimada tiene el mismo valor que la corriente medida en régimen estacionario. En transiciones, la corriente estimada muestra un comportamiento similar a la carga.

Por el diseño de la pila de combustible no ha sido posible medir la presión  $p_{ca,in}$  en la entrada del cátodo. Por ello se ha desarrollado un modelo simple para estimar la presión. En simulaciones del modelo matemático [10] se ha observado que la presión  $p_{ca,in}$  depende principalmente del flujo de aire en la entrada del cátodo pero, en parte, también de la reacción química en las células y, como consecuencia, de la corriente  $I_{st}$  generada en las células. Con este conocimiento, el siguiente

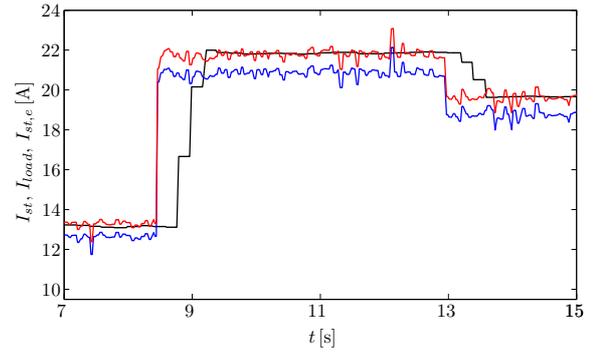


Figura 5: Comparación de la corriente  $I_{st}$  (línea negra), carga  $I_{load}$  (línea azul) y corriente estimada  $I_{st,e}$  (línea roja) durante un experimento.

modelo de la presión en la entrada del cátodo

$$p_{ca,in} = 1,0033 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot W_{cp} - 475,7 \cdot 10^{-6} \cdot I_{st} \quad (15)$$

ha sido identificado.

Además se han hecho dos suposiciones: la humedad relativa del aire en la entrada del cátodo tiene un valor de  $\phi_{ca,in} = 1$  y la temperatura  $T_{ca,in}$  es la del aire ambiental. Finalmente, con la medición del flujo de aire  $W_{cp}$  y las simplificaciones descritas se puede estimar la tasa de exceso de oxígeno según (1).

### 3.3. Estructura del controlador

Para controlar la tasa de exceso de oxígeno se ha desarrollado un controlador jerárquico que consiste en una prealimentación estática, un controlador integral y un controlador proporcional-integral. La prealimentación y el controlador integral en paralelo representan el controlador maestro y calculan una referencia  $W_{cp}^{ref}$  para el flujo de aire en la entrada del cátodo, con el fin de estabilizar la tasa de exceso de oxígeno en un valor determinado. El controlador esclavo, un PI, calcula mediante la referencia  $W_{cp}^{ref}$  el voltaje  $V_{cm}$  necesario para estabilizar el flujo de aire  $W_{cp}$  en el valor deseado  $W_{cp}^{ref}$ .

Con las ecuaciones (1)-(9) del apartado 2.2 y la sustitución de la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  por el valor deseado  $\lambda_{O_2}^{ref}$ , el flujo de aire necesario en la entrada del cátodo viene definido como:

$$W_{cp}^{ref,FF} = \lambda_{O_2}^{ref} I_{st} \frac{nM_{O_2}}{4Fx_{O_2,ca,in}} \cdot \left( \frac{M_v}{M_{a,ca,in}} \frac{\phi_{ca,in} p_{sat}(T_{ca,in})}{p_{ca,in} - p_{v,ca,in}} \right) \quad (16)$$

Para evitar errores de la tasa de exceso de oxígeno en régimen estacionario y conseguir una estabilización más rápida, se ha añadido un controlador

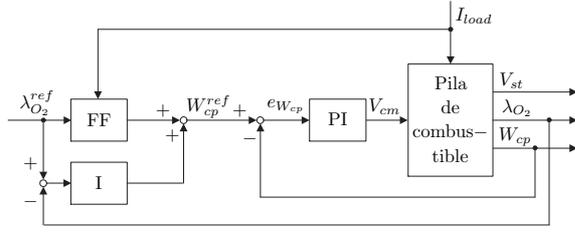


Figura 6: Esquema de control con la prealimentación y el controlador integral puro como maestro y el controlador PI como esclavo.

integral discreto en paralelo a la prealimentación. Con el valor  $W_{cp}^{ref,FF}$  calculado por la prealimentación, la referencia del flujo de aire en la entrada del cátodo viene definida como:

$$W_{cp}^{ref} = W_{cp}^{ref,FF} + W_{cp}^{ref,I} \quad (17)$$

Finalmente, el controlador esclavo, un PI discreto, utiliza el error del flujo de aire  $e_{W_{cp}} = W_{cp}^{ref} - W_{cp}$  para calcular la señal de entrada  $V_{cm}$ . La estructura de control se puede ver en la figura 6.

#### 4. Resultados experimentales

En primer lugar se han realizado varios experimentos con la pila de combustible en bucle abierto. Durante estos experimentos se ha comprobado el comportamiento estacionario para diferentes valores del voltaje de motor de compresor  $V_{cm}$  y de la corriente  $I_{st}$  generada por las células. La información obtenida se ha usado para generar un mapa correlacionando la potencia neta  $P_{net}$ , el flujo de aire  $W_{cp}$  y la tasa de exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  (ver la figura. 7). Los resultados experimentales muestran que la potencia neta apenas cambia en un intervalo amplio de la tasa de exceso de oxígeno. Por lo tanto, se ha fijado la referencia para la tasa de exceso de oxígeno en un valor de  $\lambda_{O_2}^{ref} = 4$  con el fin de maximizar la potencia neta (ver apartado 2.3). La figura 7 también muestra el mapa estacionario del modelo de simulación [10]. La comparación de los resultados experimentales con los resultados del modelo de simulación presentan una buena coherencia pero con un pequeño desplazamiento en la potencia neta obtenida.

Después de determinar un valor adecuado para la referencia de la tasa de exceso de oxígeno, se ha implementado la estrategia de control en la configuración de la figura 6 con un tiempo de muestreo de 20 ms. En los experimentos se ha observado que el sistema de supervisión instalado por el fabricante de la pila realiza una parada de emergencia de la pila de combustible cuando la velocidad del motor del compresor disminuye demasiado rápido.

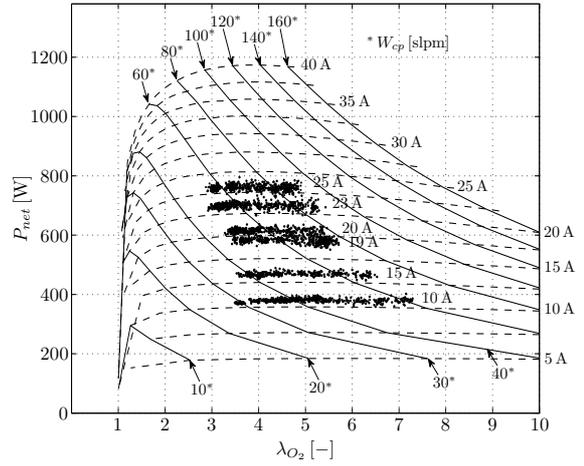


Figura 7: Comportamiento estacionario de la pila de combustible. Comparación del modelo [10] para diferentes corrientes  $I_{st}$  generadas por las células (línea rayada) y flujo de aire  $W_{cp}$  (línea continua) con resultados experimentales (puntos).

Por ello se ha usado un filtro limitando la velocidad de reducción de la referencia del flujo de aire a un valor de  $-40$  slpm/s. En el caso de un incremento del flujo de aire necesario, dicho filtro está inactivo.

La figura 8 presenta resultados experimentales de la pila de combustible controlada por el controlador jerárquico propuesto. Durante el experimento se han aplicado cambios en la carga externa  $I_{load}$  en forma de escalones. En los resultados se puede ver que el controlador estabiliza la tasa de exceso de oxígeno alrededor del valor deseado. Después de un aumento en la carga, el error se compensa rápidamente. Los picos largos, después de una reducción de la carga eléctrica, resultan del filtro que limita la velocidad de disminución del flujo de aire. Los resultados muestran que la estrategia jerárquica aplicada a la pila de combustible controla el sistema en un intervalo amplio de la carga externa. Además se puede observar que la potencia neta  $P_{net}$  y el voltaje  $V_{st}$  en las células alcanzan el régimen estacionario poco después de aplicar un cambio en la carga eléctrica.

Los resultados de la figura 9 están basados en el mismo experimento presentado en la figura 8. La figura muestra en detalle la trayectoria de la tasa de exceso de oxígeno después de algunos cambios en la carga externa. Se puede observar que la estrategia jerárquica reacciona rápidamente a errores en la tasa de exceso de oxígeno. El controlador compensa desviaciones negativas en aproximadamente 100 ms. Esa reacción rápida es importante para reducir la probabilidad de insuficiencia de oxígeno. En el caso de desviaciones positivas, la compensación de errores necesita más tiempo por

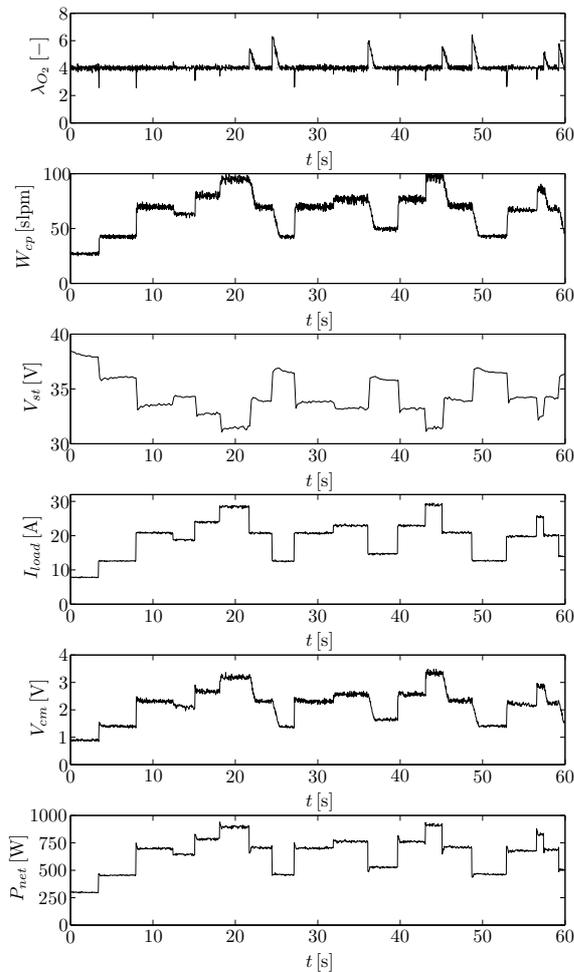


Figura 8: Resultados experimentales de la pila de combustible controlada por la estrategia jerárquica de control con cambios en la carga externa.

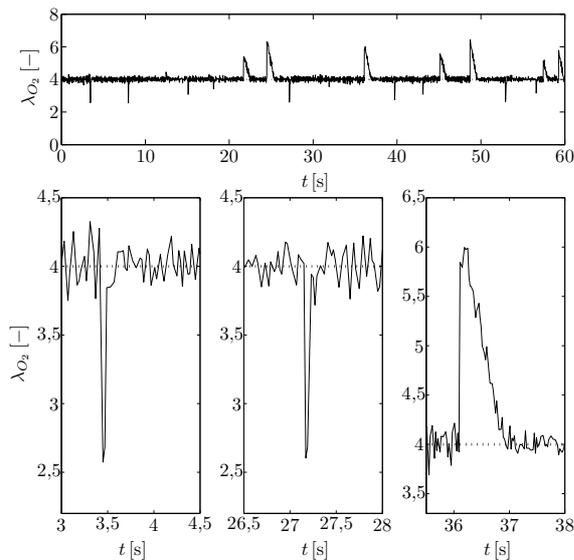


Figura 9: Resultados detallados del comportamiento de la pila de combustible controlada por la estrategia jerárquica de control.

el filtro de referencia usado. A pesar de que el controlador necesita más tiempo, estos picos no dañan la pila de combustible dado que la tasa de exceso de oxígeno es mayor que el valor deseado y, como consecuencia, claramente por encima de valores críticos.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una estrategia jerárquica de control de la tasa de exceso de oxígeno de una pila de combustible usando el motor del compresor para manipular el flujo de aire. La estrategia de control ha sido implementada y comprobada con una pila de combustible autónoma comercial. Para este propósito se ha sustituido el controlador de fábrica por el controlador presentado.

Los resultados experimentales de la pila de combustible controlada por el controlador propuesto han mostrado que la estrategia jerárquica compensa desviaciones negativas en aproximadamente 100 ms y reduce la probabilidad de insuficiencia de oxígeno. Por la dinámica rápida, la estrategia de control propuesta no puede reducir la magnitud de los picos en la tasa de exceso de oxígeno después de un cambio en la carga externa. Para la reducción de la magnitud de estos picos se puede incorporar baterías o ultra-condensadores.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto de investigación DPI2007-66718-C04-01. Se agradece especialmente la colaboración de M.J. Lares-Cano.

## Referencias

- [1] Pukrushpan, J.T., Stefanopoulou, A.G., Peng, H., (2004) "Control of fuel cell breathing", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 24, pp 30-46.
- [2] Bordons, C., Arce, A., del Real, A.J., (2006) "Constrained predictive control strategies for PEM fuel cells", *2006 American Control Conference*, pp 2486-2491.
- [3] Thounthong, P., Sethakul, P., (2007) "Analysis of a fuel starvation phenomenon of a PEM fuel cell", *2007 Power Conversion Conference*, pp 731-738.
- [4] Pukrushpan, J.T., Stefanopoulou, A.G., Peng, H., (2004) "Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modelling and Analysis and Feedback Design", *Advances in Industrial Control*, Springer.

- [5] Rodatz, P., Paganelli, G., Guzzella, L., (2003) “Optimization air supply control of a PEM Fuel Cell system”, *IEEE Proceeding of American Control Conference*.
- [6] Almeida, P.E.M., Simões, M.G., (2005) “Neural optimal control of PEM fuel cells with parametric CMAC networks”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41(1), pp 237-245.
- [7] Gruber, J.K., Bordons, C., Dorado, F., (2008) “Nonlinear control of the air feed of a fuel cell”, *2008 Automatic Control Conference*, Seattle.
- [8] Larminie, J., Dicks, A., (2003) “Fuel cell systems explained”, J. Wiley & Sons, 2<sup>da</sup> edición.
- [9] Arce, A., Ramirez, D.R., del Real, A.J., Bordons, C., (2007) “Constrained explicit predictive control strategies for PEM fuel cell”, *46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp 6088–6093.
- [10] del Real, A.J., Arce, A., Bordons, C., (2007) “Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model”, *Journal of Power Sources*, Vol. 173(1), pp 310–324.
- [11] Ballard, (2003) “Nexa Power Module User’s Manual”, *Ballard Power Systems Inc.*, Burnaby, Canada.
- [12] Olin, J.G., (1999) “Industrial thermal mass flowmeters”, *Measurement & Control*, Vol. 193, pp 83-90.