

# Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.

S. Strahl, A. Husar, J. Riera

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (UPC/CSIC), C/Llorens i Artigas 4, 08028 Barcelona, Spain

{sstrahl,ahusar,riera} @iri.upc.edu

Ramon Costa Castelló

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ramon.costa@upc.edu

## Resumen

En este trabajo se analiza el modelo de una pila de combustible tipo PEM de cátodo abierto. Se caracterizan sus puntos de equilibrio. Se analiza el plano de fase del modelo alrededor de diferentes puntos de operación y se plantea una linealización del comportamiento del sistema. Finalmente se plantea un diseño basado en control robusto. Este diseño se valida con el modelo completo.

**Palabras clave:** pila de combustible, control robusto, modelado

## 1. INTRODUCCIÓN

La sociedad industrializada depende en gran medida de la energía que actualmente se obtiene principalmente de combustibles fósiles. La demanda energética y las emisiones de carbono, residuo de los combustibles fósiles, han aumentado en los últimos 40 años. Además de la degradación del medio ambiente, la principal preocupación dentro de este contexto corresponde al agotamiento de las principales fuentes de combustibles fósiles. Esta situación ha desatado un gran interés por las fuentes de energía alternativa y sostenible. En las últimas dos décadas se han potenciado y desarrollado diferentes fuentes de energía, destacando entre otras la fotovoltaica y la eólica. Diferentes estudios de la *association of European Renewable Energy Research Centres* (EUREC) realizados en el contexto del Séptimo Programa Marco de Investigación y Desarrollo han demostrado que estas fuentes de energía renovable tienen el potencial necesario para satisfacer la demanda energética actual.

A diferencia de los combustibles fósiles estas nuevas fuentes de energía sostenible no llevan implícitos mecanismos de almacenamiento y presentan el problema de disponibilidad, es decir sólo pueden utilizarse cuando las condiciones medioambientales son las apropiadas. Por ello es importante disponer de mecanismos de almacenamiento que aumenten la disponibilidad energética y faciliten el transporte. Una de las principales tendencias corresponde al uso del hidrógeno como vector

energético, éste cumple con las condiciones necesarias, presenta ventajas en comparación con otras fuentes de energía y puede ser producido a partir de fuentes de energía renovable convencionales.

Una de los principales dispositivos de obtención de energía a partir del hidrógeno es el uso de pilas de combustible. Éstas convierten la energía química del hidrógeno directamente en energía eléctrica y calor con un muy elevado rendimiento. Durante los últimos 20 años se han logrado muy importantes avances dentro del ámbito de las pilas de combustible en términos de materiales, diseño de componentes, la producción y la mejora de la densidad de energía del sistema. En la práctica existen diferentes tipos de pilas de combustible, una de las más exitosas corresponde a las pilas de tipo PEM (Proton Exchange Membrane). Este tipo de pilas funciona a temperaturas relativamente bajas (60 - 80°C) cosa que reduce mucho el coste de los materiales. Además de la baja temperatura este tipo de pilas presentan un tiempo de puesta en marcha bajo, una respuesta transitoria rápida, una alta eficiencia y una importante densidad energética. En términos de éxito comercial las pilas tipo PEM son las líderes del mercado. Las desventajas de las pilas de combustible tipo PEM son su relativamente baja durabilidad y su alto coste debido al uso de platino como catalizador electro-químico.

La temperatura de la pila de combustible tiene un fuerte efecto sobre el contenido de agua en el ionómero de la membrana y las capas catalizadoras: la difusión de agua a través de la membrana, así como la dinámica de absorción de agua del ionómero son función de la temperatura [1, 2, 3]. Los efectos de la temperatura sobre el transporte de agua en las capas catalizadoras se basan en la absorción y desabsorción de agua, así como la evaporación y la condensación en los poros. Como se analizó mediante el modelado en estado estacionario, el contenido de agua en la capa catalizadora tiene un efecto directo sobre el área electroquímicamente activa [4]. Si el agua se evacua de los poros de la capa catalizadora, los protones no pueden llegar a los sitios activos para la reacción electroquímica con los gases reactivos y los electrones, que es el factor clave de rendimiento de la pila de

combustible PEM.

La gestión óptima de la temperatura/humedad es crucial en las pilas de combustible PEM. Desafortunadamente todavía no está claro cómo controlar adecuadamente la temperatura de un sistema de la pila de combustible y su relación con la eficiencia del sistema. En este trabajo se realiza un análisis basado en modelo de las características de temperatura/humedad y su relación con la potencia generada por el sistema, una caracterización del comportamiento dinámico de la pila y una propuesta de controlador robusto. El trabajo está estructurado de la siguiente forma, la sección 2 presenta el sistema bajo estudio, la sección 3 contiene el modelo utilizado para el estudio, la sección 4 analiza los puntos de operación del sistema, la sección 5 analiza el comportamiento del sistema mediante el análisis de su plano de fase, la sección 6 describe el diseño del sistema de control utilizando técnicas de control robusto, la sección 7 muestra el comportamiento del sistema de lazo cerrado y finalmente la sección 8 presenta algunas conclusiones.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

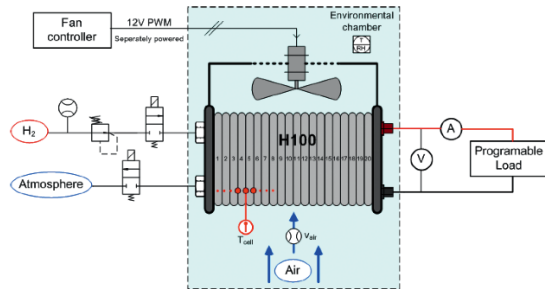


Figura 1: Esquema de una pila de combustible tipo H100.

En este estudio se analizará la pila de combustible (*stack*) comercial H-100 desarrollada por *Horizon Fuel Cells Technologies*, esta está compuesta por 20 celdas y presenta una potencia nominal de 100W. Esta pila es de cátodo abierto y presenta una área activa de 22,5cm<sup>2</sup>, es auto-humidifica y refrigerado por aire. Incluye un único ventilador de refrigeración directamente unido a la carcasa de la pila de combustible, que refrigera la pila por convección forzada y, al mismo tiempo proporciona oxígeno al cátodo. Por lo tanto, el suministro de aire del cátodo y la pila de refrigeración no se pueden desacoplar.

La figura 1 muestra un esquema del sistema de pila de combustible instalado en una estación de prueba de laboratorio. El ventilador es alimentado

mediante fuente de alimentación de 12V externa. Un controlador fija la velocidad de giro del ventilador. La velocidad del aire de entrada de cátodo se mediante un sensor de flujo de aire de alta precisión *E75 de E + E Elektronik*. La entrada del ánodo se alimenta con hidrógeno seco. Un regulador de presión manual mantiene la presión de entrada de ánodo a aproximadamente 0,4bar.

## 3. MODELO DEL SISTEMA

En trabajos previos se ha desarrollado un modelo [5] para el sistema descrito en la sección 2. Este está descrito por :

$$\dot{x}_1 = K_1 \cdot z_1 y + K_1 \cdot z_1^2 + (K_2 \cdot z_2 - K_2 \cdot x_1) \mathbf{1} \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = K_3 \cdot z_1 - K_4 \cdot f_p(x_1) \cdot x_2 - f_d(x_2) \quad (2)$$

$$y = K_5 \cdot x_1 \cdot f_a(x_1, x_2, z_1) \quad (3)$$

Como se puede observar se trata de un modelo de segundo orden. Los estados corresponden a la temperatura de la pila de combustible ( $x_1$ ) y la saturación de agua líquida ( $x_2$ ). La saturación corresponde a la relación del volumen de líquido respecto al volumen total de espacio vacío en la estructura porosa. Por lo tanto la saturación describe el contenido de agua líquida en la capa catalizadora [6]. El sistema presenta 3 entradas, la corriente de carga ( $z_1$ ), la temperatura ambiental ( $z_2$ ) y la velocidad de aire ( $u$ ) del ventilador. Esta última suele usarse como acción de control. La salida del sistema,  $y$ , corresponde a la tensión del *stack*. Así la potencia del sistema corresponde a  $y \cdot z_1$ .

Las ecuaciones (1)-(2)-(3) presentan forma afin, son altamente no lineales pues  $f_p$ ,  $f_d$  y  $f_a$  lo son. Además la acción de control está multiplicada por funciones que dependen de los estados.

## 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE TRABAJO

Con el objetivo de caracterizar los puntos de operación del sistema en esta sección se caracterizan los puntos de equilibrio del sistema (1)-(2)-(3) con el objetivo de simplificar el análisis se aplica el cambio de variable siguiente :

$$u \triangleq \frac{v}{K_2 z_2 - K_2 x_1} \quad (4)$$

donde  $v$  puede interpretarse como el intercambio calorífico entre el interior y el exterior. Con este cambio el sistema presenta la forma

$$\dot{x}_1 = K_1 \cdot z_1 \cdot y + K_1 \cdot z_1^2 + v \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = K_3 \cdot z_1 - K_4 \cdot f_p(x_1) \cdot x_2 - f_d(x_2) \quad (6)$$

$$y = K_5 \cdot x_1 \cdot f_a(x_1, x_2, z_1) \quad (7)$$

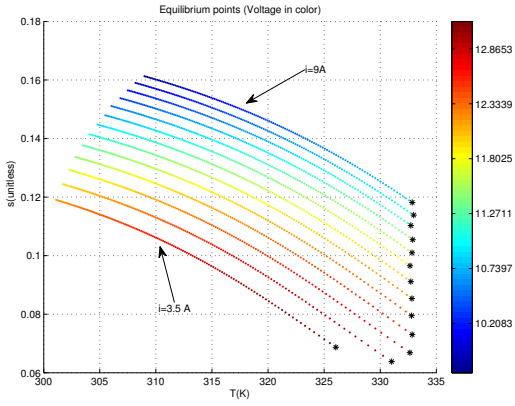


Figura 2: Puntos de equilibrio para diferentes valores de la corriente de carga.

Los puntos de equilibrio (puntos en los que el sistema podrá operar normalmente) pueden obtenerse igualando a cero  $\dot{x}_1$  y  $\dot{x}_2$  en las ecuaciones (5) y (6). Dado que el sistema es de segundo orden y existen dos entradas exógenas ( $z_1, v$ ) para caracterizar los puntos es necesario fijar el valor de la dos entradas, alternativamente es posible fijar alguna de las variables de estado y obtener  $z_1$  o  $v$  como solución.

De este análisis se puede obtener los puntos de operación una vez fijada la corriente de carga. La no linealidad de las ecuaciones hace que no sea posible realizar este análisis analíticamente. La Figura 2 muestra los puntos de equilibrio localizados para diferentes valores de la corriente de carga.

Durante este análisis se han ajustado curvas que permiten relacionar las diferentes variables. Así se puede obtener la humedad en función de la temperatura y la corriente:

$$x_2^* = \alpha_{00} + \alpha_{10}x_1^* + \alpha_{01}z_1^* + \alpha_{11}x_1^*z_1^* + \alpha_{02}z_1^{*2}$$

donde  $\alpha_{00} = 0,714$ ,  $\alpha_{10} = -0,002108$ ,  $\alpha_{01} = 0,00411$ ,  $\alpha_{11} = 4,063e - 05$  y  $\alpha_{02} = -0,0006086$ .

Adicionalmente es posible obtener el valor de la acción de control ( $v$ ) necesaria para una temperatura y un corriente :

$$v^* = \beta_{00} + \beta_{10}x_1^* + \beta_{01}z_1^* + \beta_{11}x_1^*z_1^* + \beta_{02}z_1^{*2} \quad (8)$$

donde  $\beta_{00} = 0,0326$ ,  $\beta_{10} = -9,593e - 05$ ,  $\beta_{01} = -0,06164$ ,  $\beta_{11} = 0,0001137$ ,  $\beta_{02} = 0,0009065$ . Esta relación puede ser utilizada a modo de *feedforward* en el sistema de control.

Normalmente los rangos de las diferentes variables son, la temperatura exterior,  $z_2$ , suele estar en el intervalo  $[278, 308]$ K, la corriente de carga,  $z_1$ , puede moverse en el intervalo  $[0, 8]$ A, la velocidad del aire,  $u$ , toma sus valores en el rango  $[0, 1]$ m/s,

la saturación, de agua líquida,  $x_2$  está definida en el intervalo  $[0, 01, 0, 8]$  y finalmente la temperatura de la pila suele estar en el intervalo  $[z_2, 333]$ K.

## 5. COMPORTAMIENTO DINAMICO

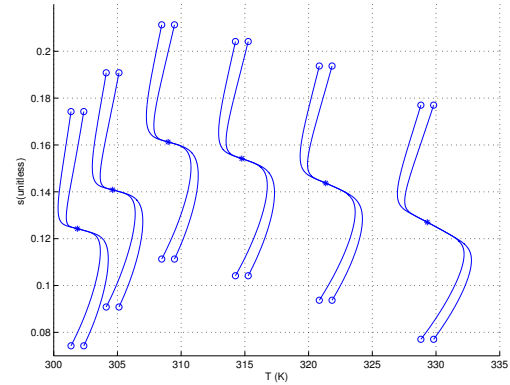


Figura 3: Plano de fases para diferentes puntos de operación.

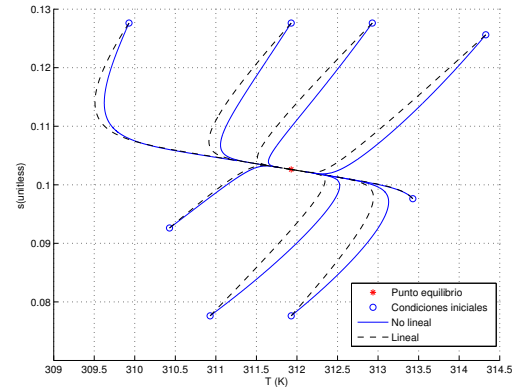


Figura 4: Comparación del plano de fase lineal respecto al no lineal.

Las ecuaciones (5)-(6) que describen el funcionamiento del sistema son muy complejas, cosa que dificulta notablemente en análisis analítico. Por dicho motivo se ha planteado un análisis numérico de su comportamiento. Aunque su complejidad es importante su orden es bajo cosa que permite representar gráficamente su plano de fase. A modo ejemplo la Figura 3 muestra la evolución del sistema alrededor de varios puntos de equilibrio para  $v$  y  $z_1$  constante. Como se puede observar su comportamiento es estable en todos ellos y bastante parecido. Las trayectorias del sistemas recuerdan a las que presentaría un sistema lineal con dos polos reales en semiplano izquierdo[7].

La figura 4 muestra sobre el plano de fase la evolución del sistema (5)-(6) y la de un sistema lineal obtenido vía linealización alrededor de un punto de equilibrio [7] del sistema (5)-(6) para diferentes condiciones iniciales manteniendo  $v$  y  $z_1$  constantes. Como se puede observar las trayectorias son bastante parecidas, ello hace indicar que pese a su complejidad el sistema puede ser fácilmente aproximado por un sistema lineal.

## 6. DISEÑO DE UN CONTROLADOR

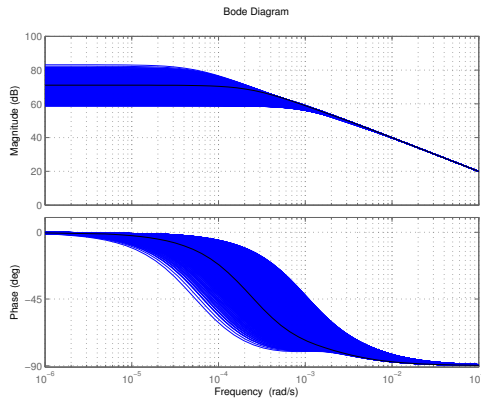


Figura 5: Diagrama de Bode de los diferentes modelos lineales obtenidos alrededor de los puntos de equilibrio.

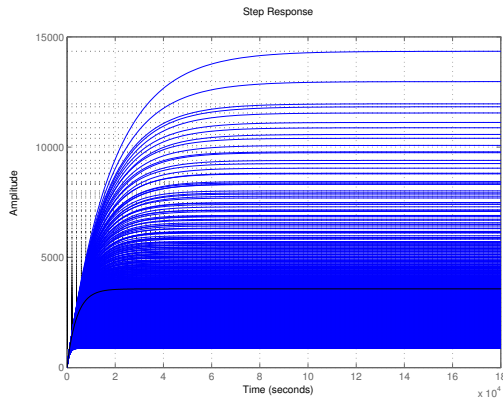


Figura 6: Respuesta al escalón de los diferentes modelos lineales obtenidos alrededor de los puntos de equilibrio.

En la sección anterior se ha visto que el sistema (5)-(6) puede ser descrito por un sistema lineal y que el comportamiento dinámico es bastante similar en todos los puntos de equilibrio caracterizados. Por dicho motivo parece razonable pensar que un único controlador lineal puede regular ade-

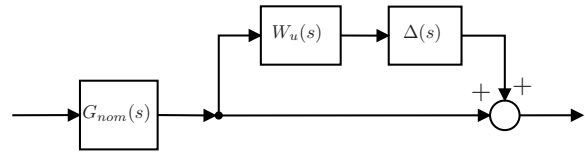


Figura 7: Esquema de bloques del modelado mediante incertidumbre multiplicativa.

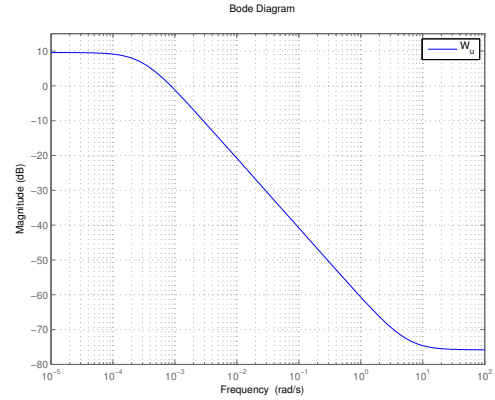


Figura 8: Magnitud de la incertidumbre ( $W_u(s)$ ).

cuadamente el comportamiento del sistema. Por dicho motivo se analiza la respuesta temporal y frecuencial de los diferentes modelos lineales obtenidos en los puntos de equilibrio mostrados en la Figura 2. La Figura 6 muestra la respuesta temporal de los diferentes modelos, puede observarse que pese a ser sistemas de segundo orden presentan una respuesta al escalón muy similar a las los sistemas de primer orden, aunque la forma es parecida existe una variación importante en la ganancia de continua de los diferentes sistemas. La Figura 5 muestra la respuesta frecuencia de los diferentes modelos, nuevamente se visualiza la variación de la ganancia y se visualiza también los cambios en la fase y las frecuencias de corte. Con el objetivo de modelar esta variabilidad se plantea un sistema lineal con incertidumbre multiplicativa (Figura 7). Como modelo nominal se ha elegido el sistema:

$$G_{nom}(s) = \frac{s + 0,001567}{(s + 0,001794)(s + 0,0002448)}$$

y como función de pesado ha sido suficiente elegir una función de primer orden (Figura 8) :

$$W_u(s) = \frac{0,00016194(s + 5,631)}{s + 0,0003025}$$

Una vez disponemos de este modelo parece natural utilizar unas especificaciones de prestaciones basadas en el moldeado de la función de sensibilidad y un posterior ajuste mediante  $H_\infty$  o  $\mu$ -síntesis [8].

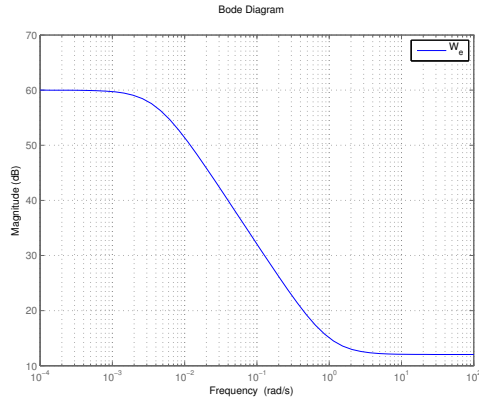


Figura 9: Respuesta frecuencial de la función de pesado de la función de sensibilidad ( $W_e(s)$ ).

Como especificaciones de las prestaciones se usa la función de pesado

$$W_e(s) = \frac{0,01(s + 100)}{s + 0,1}$$

cuya magnitud se muestra en la Figura 9. Esta función garantiza un error de seguimiento inferior al 10% dentro de la banda pasante deseada.

Observando la Figura 8 y la Figura 9 se puede observar que tanto la función de prestaciones y la de incertidumbre presentan alta ganancia en baja frecuencia. Ello es contradictorio desde el punto de vista de la formulación del problema de control, por ello una resolución directa con este planteamiento ya sea vía  $H_\infty$  o  $\mu$ -síntesis[8] difícilmente generaría resultados satisfactorios.

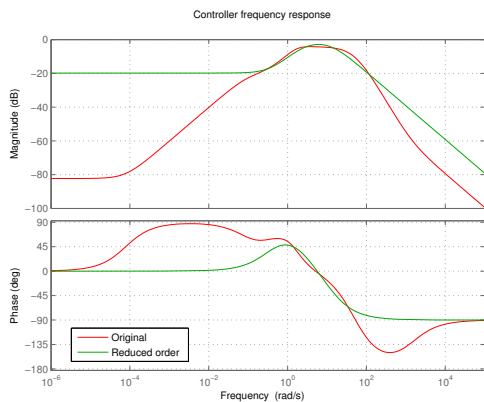


Figura 10: Respuesta frecuencial de los controladores obtenidos (sin incluir el integrador).

Pese a que la incertidumbre en ganancia es elevada en baja ganancia, ésta difícilmente será causa de inestabilidad pues la fase en dichas frecuencias es próxima a cero. Este tipo de razonamiento no pue-

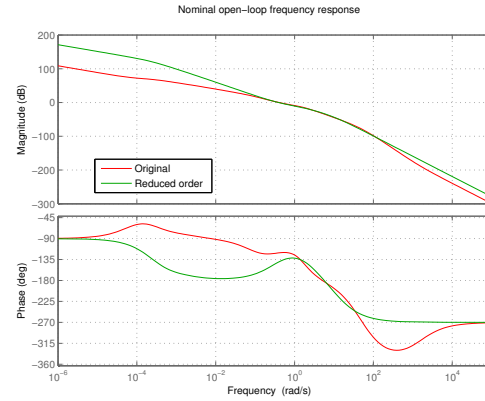


Figura 11: Respuesta frecuencial del sistema nominal de lazo abierto.

de ser aplicado con un modelo con incertidumbre no estructurada. Por dicho motivo el modelo de no incertidumbre no estructura descrito en la Figura 8 se substituye por un modelo de incertidumbre estructurada[8] de la forma:

$$W'_u(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

con  $k \in [1,3,16]$  y  $\tau \in [0,000455, 0,00105]$ . Los parámetros de la incertidumbre se han obtenido de la observación de la Figura 5. Con este tipo de incertidumbre es susceptible de ser tenida en cuenta en un proceso de  $\mu$ -síntesis.

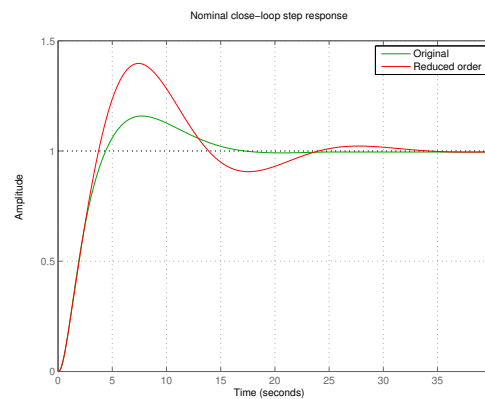


Figura 12: Respuesta al escalón del sistema de lazo cerrado nominal.

De forma previa y con el objetivo de garantizar error estacionario nulo en el seguimiento de escalones se ha añadido un integrador en serie a la planta. Posteriormente este integrador pasará a formar parte del controlador obtenido.

Para obtener el controlador se ha utilizado MATLAB y la *Robust Control Toolbox*[9]. El proceso de  $\mu$ -síntesis ha generado un controlador de

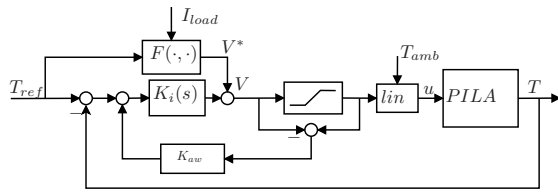


Figura 13: Esquema completo del sistema de control.

orden 10. Dicho controlador se ha considerado de orden demasiado elevado, por dicho se ha realizado una reducción de orden del controlador basada en la observación de sus valores singulares de Hankel [8]. Un controlador de segundo orden se ha considerado una buena aproximación del controlador inicial. Mediante el comando `robuststab` de la *Robust Control Toolbox*[9] se ha podido comprobar que ambos controladores generan un controlador robustamente estable.

La Figura 10 muestra la respuesta frecuencial del controlador original y el de orden reducido. Como se puede observar el de orden reducido presenta una estructura mucho más simple. El orden reducido presenta más ganancia en baja frecuencia, cosa que en principio es deseable y también en alta frecuencia, en principio poco deseable. Pero pese a ello la ganancia es pequeña y por tanto no amplificará el ruido de medida. La Figura 11 muestra la respuesta frecuencial del sistema de lazo abierto nominal, las componentes de ganancia son bastante similares mientras que las de fase difieren un poco más en las frecuencias centrales, pese a ello la fase mantiene en intervalos razonables en ambos casos. Finalmente la Figura 12 muestra la respuesta al escalón de los dos sistema de lazo cerrado nominales, ambos sistemas presentan un tiempo de establecimiento similar pero como se puede observar el sistema con el controlador de orden reducido presenta un sobrepico mayor. Pese a ello en este trabajo se utilizará el controlador de orden reducido.

## 7. VALIDACIÓN

El controlador propuesto está compuesto por la linealización parcial descrita por la ecuación (4), el controlador lineal,  $K(s)$ , obtenido en la sección anterior, un elemento de feedforward,  $F(\cdot, \cdot)$ , consistente en la ecuación (8) encargada de fijar los valores de estacionario ideales y una realimentación antiwindup encargada de gestionar la saturación de la acción de control.

A efectos de implementación, el controlador se ha discretizado con un período de muestreo de 0,01s.

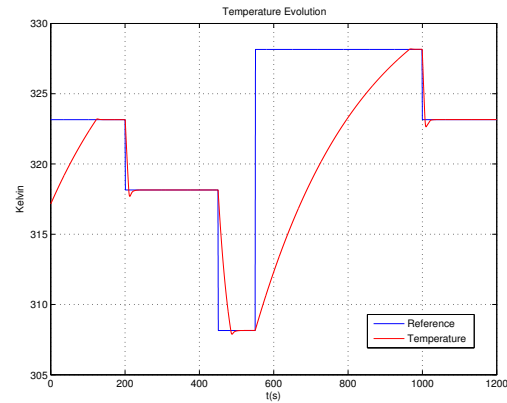


Figura 14: Respuesta temporal del sistema de lazo cerrado.

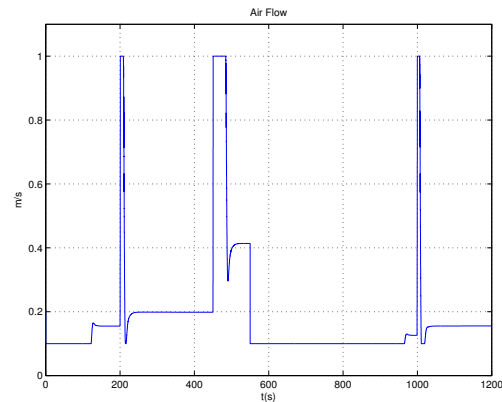


Figura 15: Acción de control del sistema de lazo cerrado.

La Figura 14 muestra la evolución del sistema de lazo cerrado compuesto por el sistema no lineal utilizado como punto de partida. En las simulaciones se ha asumido una corriente constante de 4A y una temperatura ambiente de 298K y está sujeta a todas las restricciones del sistema real. Como se puede ver el sistema de control sigue perfectamente la referencias de temperatura con un ligero sobrepico en algunos casos. De forma similar la Figura 15 muestra la acción de control aplicada, puede observar está satura en algunos instantes, después del cambio de consigna, pero enseguida se recupera. Por todo ello puede considerarse que el controlador es satisfactorio.

## 8. CONCLUSIONES

En este trabajo ha presentado el diseño de un sistema de control de temperatura para una pila tipo PEM de cátodo abierto. El diseño desarrolla una metodología que puede ser utilizado en otro tipo

de pilas y dispositivos similares, éste tiene en cuenta la naturaleza no lineal del sistema a la vez que genera un controlador de estructura sencilla y con rendimiento satisfactorio.

En la actualidad se está trabajando para validar experimentalmente el comportamiento del sistema de control. Paralelamente se está trabajando en la mejora del modelo del sistema con el objetivo de utilizarlo para obtener los puntos de trabajo óptimos para una potencia deseada.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos MICINN DPI2011-25649 y PUMA-MIND FP7 303419.

### Referencias

- [1] Stephan Strahl, Attila Husar, and Maria Serra. Development and experimental validation of a dynamic thermal and water distribution model of an open cathode proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 196(9):4251 – 4263, 2011.
- [2] Stephan Strahl, Attila Husar, and Alejandro A. Franco. Electrode structure effects on the performance of open-cathode proton exchange membrane fuel cells: A multiscale modeling approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(18):9752 – 9767, 2014.
- [3] Paul W. Majsztzik, M. Barclay Satterfield, Andrew B. Bocarsly, and Jay B. Benziger. Water sorption, desorption and transport in nafion membranes. *Journal of Membrane Science*, 301(1–2):93 – 106, 2007.
- [4] Qianpu Wang, Michael Eikerling, Datong Song, and Zhongsheng Liu. Structure and performance of different types of agglomerates in cathode catalyst layers of pem fuel cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 573(1):61 – 69, 2004.
- [5] S. Strahl, A. Husar, P. Puleston, and J. Riera. Performance improvement by temperature control of an open-cathode pem fuel cell system. *Fuel Cells*, pages 1–3, 2014.
- [6] Ugur Pasaogullari and CY Wang. Liquid water transport in gas diffusion layer of polymer electrolyte fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 151(3):A399–A406, 2004.
- [7] H. K. Khalil. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 3. edition edition, 2002.
- [8] Ricardo S. Sánchez-Peña and Mario Sznaiier. *Robust Systems Theory and Applications*. Adaptive and Learning Systems for Signal Processing, Communications and Control Series. Wiley-Interscience, August 1998.
- [9] Gary Balas, Richard Chiang, Andy Packard, and Michael Safonov. *Robust Control Toolbox. User's Guide. R2012a*. Mathworks, 2012.