



INSTITUT DE ROBÒTICA I INFORMÀTICA INDUSTRIAL
CSIC-UPC
Barcelona

Control Predictivo Funcional aplicado a Pilas de Combustible

Diego Feroldi

Tutor: Jordi Riera i Colomer

Resumen

Uno de los más importantes problemas de control en pilas de combustible es garantizar el suficiente suministro de oxígeno en el cátodo. Cuando la corriente demandada a la pila aumenta rápidamente, el nivel de oxígeno presente en el cátodo baja drásticamente como resultado de la reacción electroquímica. Esto podría provocar daños a la membrana y disminución de la potencia generada. Es necesario implementar un tipo de control que permita una rápida recuperación del nivel de oxígeno. Los controladores de tipo predictivo tienen la ventaja de poder lograr tiempos de respuesta reducidos debido al modelo interno del proceso, el cual predice futuras desviaciones de las variables controladas para un determinado conjunto de valores de las variables controladas durante el horizonte de predicción. En el presente trabajo se implementa un controlador predictivo funcional (PFC) para evitar el mencionado problema.

1. Introducción

Las pilas de combustible de tipo PEM constituyen un eficiente dispositivo que permite transformar energía química almacenada en el hidrógeno en energía eléctrica. Para lograr este objetivo de manera eficiente debe ser tenido en cuenta el sistema de generación global, el cual incluye diferentes subsistemas. Uno de los más importantes problemas de control en pilas de combustible es garantizar el suficiente suministro de oxígeno en el cátodo ante cambios abruptos en la corriente demandada por la carga. Esto es difícil de lograr ya que el oxígeno reacciona instantáneamente con la corriente mientras que el suministro de aire está limitado por la dinámica de los conductos de alimentación de gases y las restricciones operativas del compresor. Varias publicaciones abordan este problema [Grujicic, 2004a], [Grujicic, 2004b], [Vahidi, 2004], [Pukrushpan, 2002]. Cuando la corriente demandada a la pila aumenta rápidamente, el nivel de oxígeno presente en el cátodo baja drásticamente como resultado de la rapidez de la reacción electroquímica. Esto puede provocar daños a la membrana y disminución de la potencia generada. Este fenómeno se conoce en la literatura como “oxygen

starvation". Asumiendo que la concentración de oxígeno se mantiene constante en todo el cátodo, se define el exceso de oxígeno en el cátodo [Vahidi, 2004]:

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,rcr}} \quad (1.1)$$

donde $W_{O_2,in}$ es el flujo de oxígeno que entra en el cátodo y $W_{O_2,rcr}$ es el flujo de oxígeno que reacciona en el cátodo. La velocidad de reacción del oxígeno depende de la corriente demandada por la pila, I_{fc} :

$$W_{O_2,rcr} = M_{O_2} \frac{nI_{fc}}{4F} \quad (1.2)$$

donde M_{O_2} es la masa molar del oxígeno, n es el número de celdas de la pila de combustible y F es el número de Faraday ($F=96485$ Coulombs). Por lo tanto, cuando la corriente demandada a la pila se incrementa, λ_{O_2} decrece. Para mantener el nivel de oxígeno en exceso debe suministrarse más aire a la pila de combustible. El flujo de oxígeno en la pila, $W_{O_2,in}$, es función del flujo de aire de salida de los conductos de alimentación, W_{sm} :

$$W_{O_2,in} = y_{O_2} \frac{1}{1 + \Omega_{atm}} W_{sm} \quad (1.3)$$

donde $y_{O_2} = 0.21 \frac{M_{O_2}}{M_a^{atm}}$ es la cantidad de masa de oxígeno en el aire seco y Ω_{atm} es el coeficiente de humedad en la atmósfera. Las siguientes ecuaciones relacionan la presión de alimentación, p_{sm} , y masa de alimentación, m_{sm} , con el flujo de aire del compresor, W_{cp} , y temperatura del compresor, T_{cp} :

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = K_{sm} (W_{cp} T_{cp} - W_{sm} T_{sm}) \quad (1.4)$$

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = W_{cp} - W_{sm} \quad (1.5)$$

donde K_{sm} está determinado por coeficientes específicos de calentamiento del aire y el volumen de los conductos. La temperatura de los conductos de alimentación, T_{sm} , esta

definida por la ley de los gases ideales. El flujo de aire del compresor, W_{cp} , y su temperatura, T_{cp} , dependen de la velocidad rotacional del compresor, ω_{cp} :

$$J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{1}{\omega_{cp}} (P_{cm} - P_{cp}) \quad (1.6)$$

donde J_{cp} es la inercia del compresor y P_{cp} es la potencia absorbida por el compresor. La potencia suministrada al compresor, P_{cm} , es función del voltaje del motor del compresor, V_{cm} . Como conclusión, el voltaje del compresor controla el flujo de oxígeno en el cátodo.

2. Control Predictivo Funcional

El método se sustenta en 4 principios básicos: Modelo Interno, Trayectoria de Referencia, Estructuración de la Variable Manipulada y Autocompensación [Richalet, 1993], [Richalet, 1995], los cuales se describen a continuación:

- Modelo interno: Es el modelo que el algoritmo de control utiliza para predecir la salida de la planta en un tiempo futuro.
- Trayectoria de Referencia: Es la evolución futura deseada sobre la planta.
- Auto-Compensación: Debido a la existencia de errores planta – modelo, se proponen diferentes formas de corrección.
- Estructuración de la variable manipulada: Es la construcción de dicha variable mediante la superposición de funciones conocidas (escalón, rampa, representación polinomial, etc).

Para que el PFC funcione, se debe identificar el comportamiento del sistema frente a las entradas y a las perturbaciones. El modelo interno dinámico construido se utilizará como una representación del comportamiento real del sistema. En general se trata que el modelo sea lo más simple posible, de manera de poder simplificar el desarrollo.

La trayectoria de referencia apunta a cómo se desea que la variable controlada alcance el valor de consigna. Una manera simple de plantear la trayectoria es pensar que el error actual consigna-variable controlada decaerá exponencialmente. Este proceder brinda la

ventaja de dar una trayectoria de referencia de tipo exponencial que es caracterizable con un solo parámetro (la constante de tiempo) una vez inicializada.

Debido a que todo modelo es inexacto, es necesario algún tipo de mejora en la predicción, dado que siempre se encontrarán errores de identificación. Mediante la medición del error actual y de sus valores anteriores, se puede estimar la magnitud del error en el instante futuro ($n + H$). Algunas posibilidades consisten en hacerlo con una predicción plana (error constante), lineal o polinomial.

En la Figura 1 se observa la salida predicha por el modelo interno (\hat{Y}_p) y la salida del modelo interno (Y_M) para el caso más simple, que es un sistema representado con un modelo de primer orden con retardo para un solo punto de coincidencia dentro del horizonte de predicción. La base del método consiste en que mediante la predicción de la salida del proceso y la evolución del modelo es posible encontrar el valor de la variable manipulada.

El núcleo del método consiste en cómo calcular la respuesta forzada del sistema para el vector de valores futuros de la variable controlada. La solución es estructurar la variable manipulada como la sumatoria de funciones base (U_{B0} escalón, U_{B1} rampa,...), y calcular las respuestas forzadas ante las mismas (Y_{B0} , Y_{B1} , ...).

De esta manera se obtiene una matriz constante que permite calcular la respuesta forzada durante todo el control. El controlador sólo debe limitarse a encontrar los valores de las magnitudes de la variable manipulada.

Una de las ventajas principales del PFC frente a los métodos de control no predictivos es cuando se ponen restricciones ya sea a las variable manipuladas o a las variables controladas. En el presente trabajo la variable manipulada es restringida a un entorno alrededor del punto operativo. Además se limita la derivada máxima admisible en dicha variable.

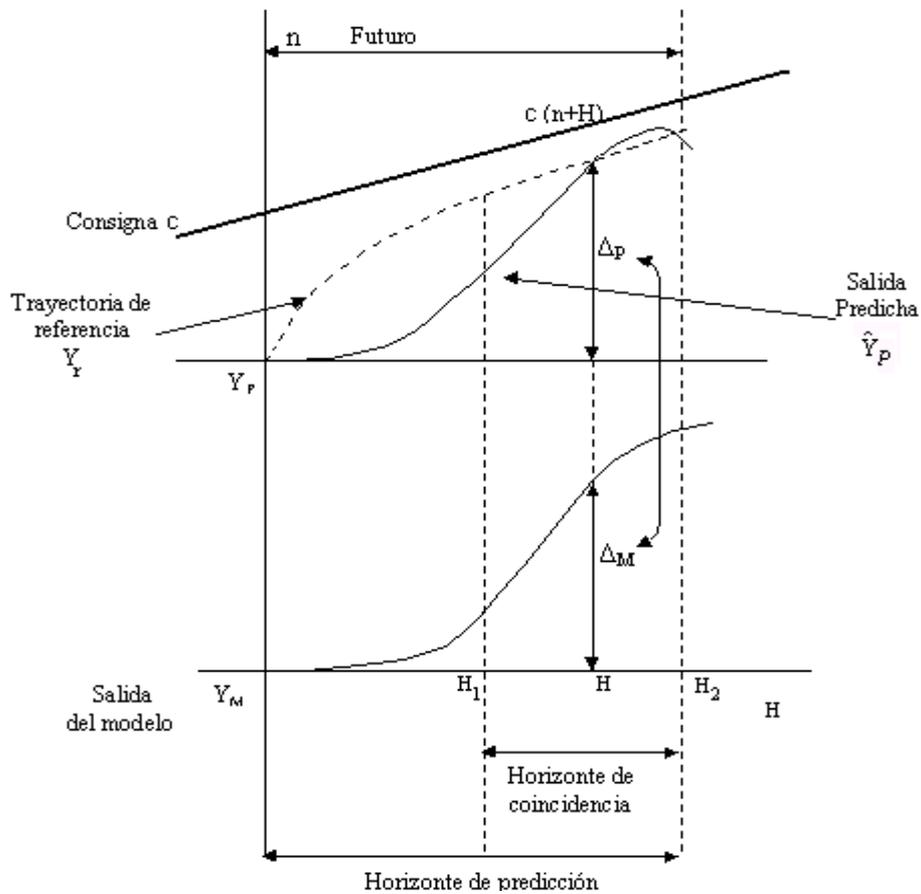


Figura 1

De esta manera se obtiene una matriz constante que permite calcular la respuesta forzada durante todo el control. El controlador sólo debe limitarse a encontrar los valores de las magnitudes de la variable manipulada.

Una de las ventajas principales del PFC frente a los métodos de control no predictivos es cuando se ponen restricciones ya sea a las variable manipuladas o a las variables controladas. En el presente trabajo la variable manipulada es restringida a un entorno alrededor del punto operativo. Además se limita la derivada máxima admisible en dicha variable.

Volviendo al caso de tener un sólo punto de coincidencia, se puede mostrar como debe calcularse la variable manipulada a partir de la igualación de la variación de la salida predicha y la salida modelada. Si consideramos que la planta esta representada por un modelo de primer orden:

$$y_M(s) = \frac{K_M}{1 + \tau_M s} u(s) \quad (2.1)$$

En tiempo discreto resulta:

$$y_M(k) = \alpha y_M(k-1) + K_M(1-\alpha)u(k-1) \quad (2.2)$$

donde $\alpha = e^{-\left(\frac{T_s}{\tau_M}\right)}$ y T_s es el período de muestreo. Si la variable manipulada se estructura como sumatoria de funciones bases escalón, entonces:

$$y_L(k+H) = \alpha^H y_M(k) \quad (2.3)$$

$$y_F(k+H) = K_M(1-\alpha^H)u(k) \quad (2.4)$$

donde y_L e y_F son la respuesta libre y forzada del sistema. En el punto de coincidencia H se cumple:

$$C(n+H) - y_R(k+H) = \lambda^H (C(k) - y_P(k)) \quad (2.5)$$

donde $\lambda^H = e^{-\frac{3T_s H}{T_{RBF}}}$ y T_{RBF} es el tiempo de respuesta a lazo cerrado esperado. Entonces si la consigna se mantiene constante durante el horizonte H:

$$y_R(k+H) = C(k) - \lambda^H (C(k) - y_P(k)) \quad (2.6)$$

La salida predicha del proceso está determinada por la respuesta del modelo más un término de corrección dado por la diferencia entre la salida del modelo y la salida del proceso.

$$\hat{y}_P(k+H) = y_M(k+H) + (y_P(k) - y_M(k)) \quad (2.7)$$

En el punto de coincidencia H:

$$y_R(k+H) = \hat{y}_P(k+H) \quad (2.8)$$

Usando las ecuaciones (1.9), (1.10), (1.12) y (1.13) se tiene:

$$C(k)(1-\lambda^H) - y_P(k)(1-\lambda^H) + y_M(k)(1-\alpha^H) = K_M(1-\alpha^H)u(k) \quad (2.9)$$

Resolviendo para $u(k)$, la ley de control resulta:

$$u(k) = \frac{(C(k) - y_P(k))(1-\lambda^H)}{K_M(1-\alpha^H)} + \frac{y_M(k)}{K_M} \quad (2.10)$$

3. Modelo interno del controlador

Como se mencionó anteriormente el controlador predictivo funcional necesita de un modelo de la planta a controlar. A pesar de que no es exacto representar a la pila de combustible como un sistema de primer orden, el comportamiento de la misma puede ser estimado aproximadamente como tal para un punto de operación determinado. La estimación no será totalmente correcta en cada instante, sin embargo, la robustez del método permitirá mantener un buen control del sistema.

El modelo interno se obtuvo linealizando el modelo dinámico no lineal establecido por Pukrushpan et al. [Pukrushpan, 2002], en el punto de operación asociado con potencia neta $P_{net} = 39.825kW$, nivel de oxígeno en exceso $\lambda_{O_2} = 2.33$, corriente de pila $I_{fc} = 190A$ y voltaje de compresor $v_{CM} = 187.5V$. Para linealizar el modelo se utilizó el llamado método de Cohen-Coon obteniéndose el siguiente modelo:

$$\Delta Z = G_{zu} \Delta U + G_{zw} \Delta W \quad (3.1)$$

donde $u = v_{CM}$ es la variable manipulada, $w = I_{fc}$ es la variable perturbación, $z = \lambda_{O_2}$ es la variable controlada y:

$$G_{zu} = \frac{0.0155}{1+0.0537s} e^{-0.0144s}, \quad G_{zw} = \frac{0.0114}{1+0.008s} \quad (3.2)$$

4. Resultados

Los resultados de la implementación del controlador PFC se muestran en las siguientes figuras. Se ensayó el controlador para distintas cantidades de puntos de coincidencia y para perturbaciones de distinto valor. Para poder realizar una comparación de su funcionamiento en el tiempo, se calculó un índice que mide la integral del error absoluto (IAE). Es deseable mantener un valor óptimo de, λ_{O_2} . Este óptimo es el valor que maximiza la potencia neta producida por el sistema para cada corriente de pila, I_{st} . La variación del valor óptimo de λ_{O_2} con I_{st} puede ser obtenida usando una aproximación polinomial de segundo orden (Grujicic, et al., 2004).

En primer lugar se implementó el controlador para un punto de coincidencia y perturbaciones de $\pm 10\%$ alrededor del punto de operación. En este caso resulta $IAE=4.4322e-1$ (fig.2):

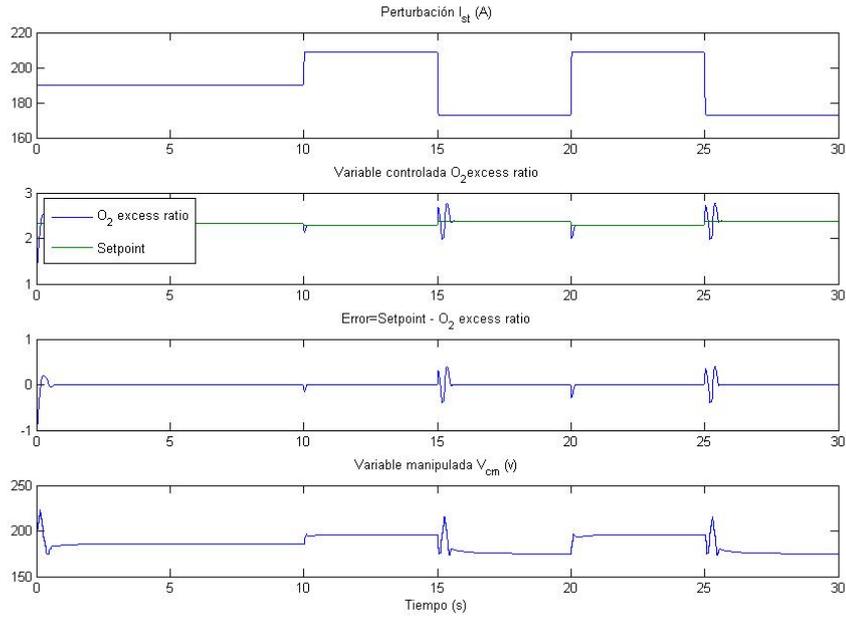


Figura 2

Para el caso con un punto de coincidencia y perturbaciones de $\pm 20\%$, resulta $IAE=6.6401e-1$ (fig. 3):

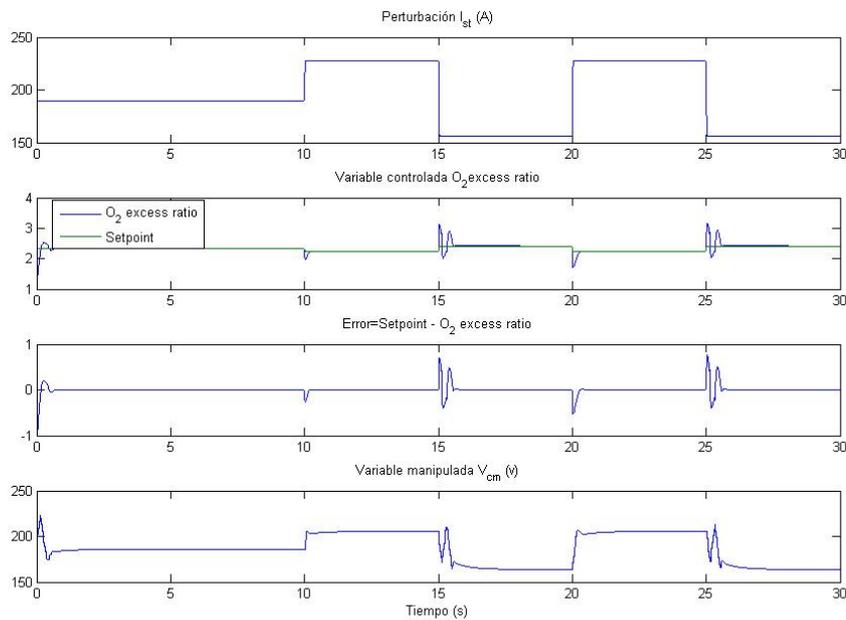


Figura 3

Para el caso con un punto de coincidencia y perturbaciones de $\pm 40\%$, resulta $IAE=1.1452$ (fig. 4):

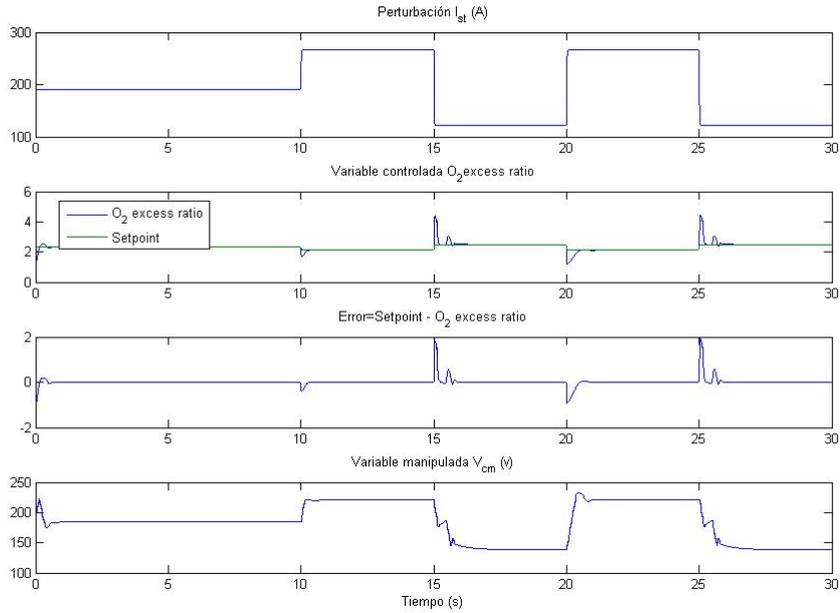


Figura 4

Implementando el controlador con dos puntos de coincidencia y perturbaciones de $\pm 20\%$, $IAE=9.2373e-1$ (fig. 5):

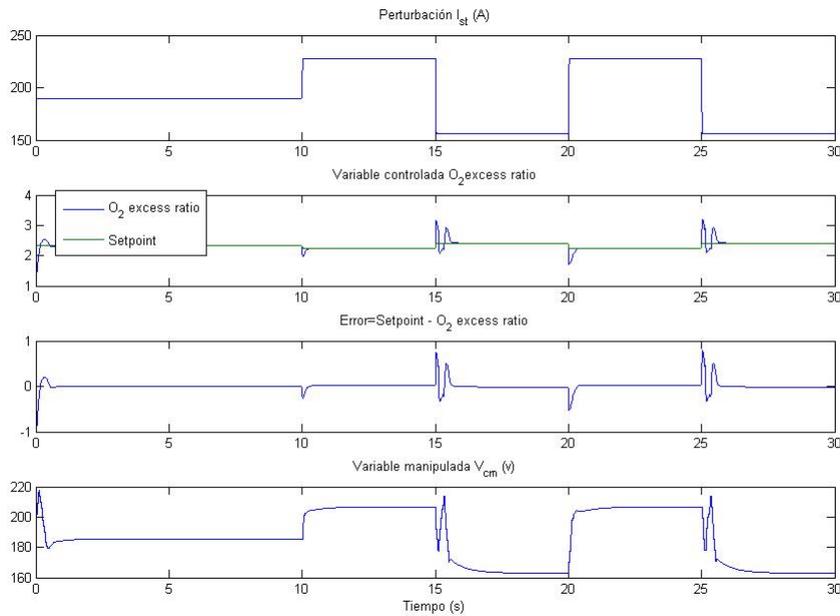


Figura 5

Implementando el controlador con tres puntos de coincidencia y perturbaciones de $\pm 20\%$, $IAE=9.2373e-1$ (fig. 6):

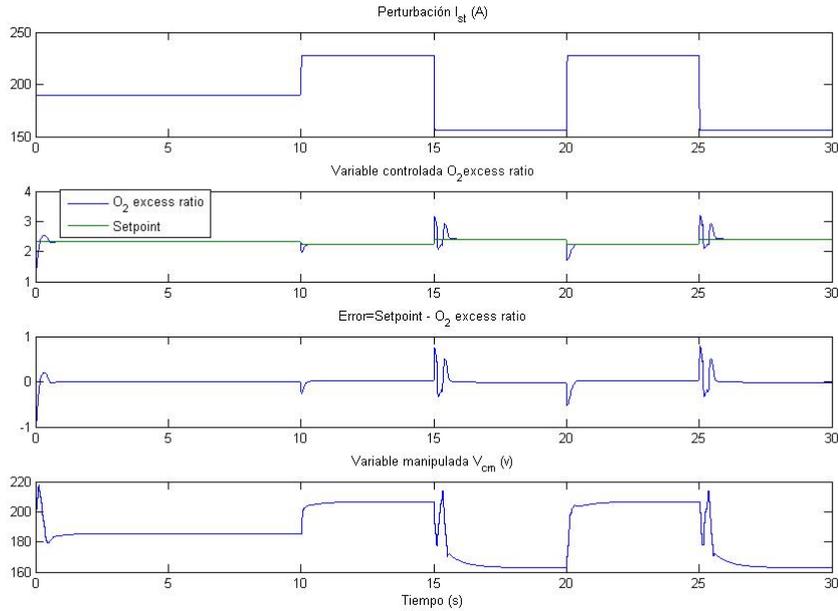


Figura 6

Implementando el controlador con diez puntos de coincidencia y perturbaciones de $\pm 20\%$, $IAE=9.2373e-1$ (fig. 7):

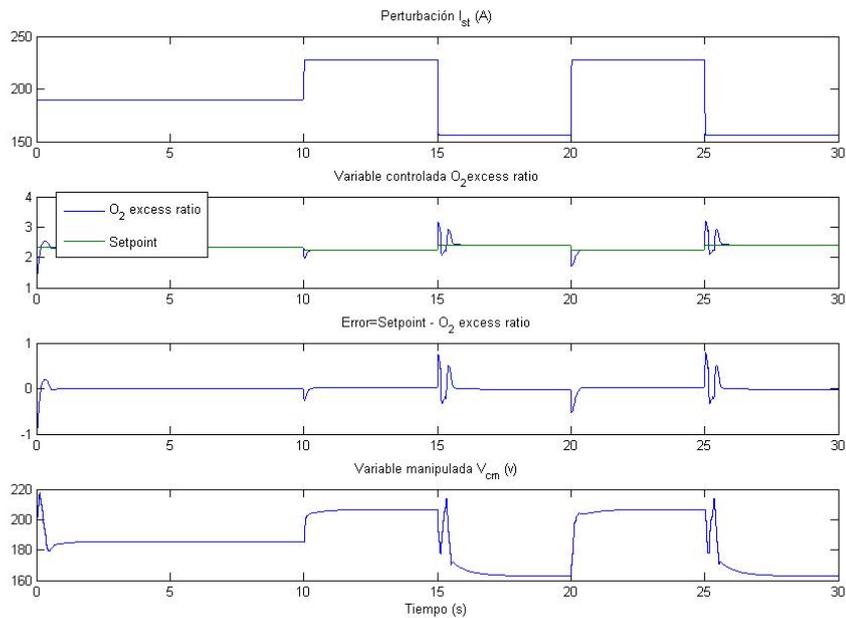


Figura 7

5. Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos en las simulaciones, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. A pesar de que el modelo obtenido es muy simple y no se ajusta exactamente al comportamiento del sistema, se logró un buen control del exceso de oxígeno.

Esto indica un buen nivel de robustez del método. Se observa que la variable controlada no tiene grandes desviaciones y rápidamente retorna a su valor de estado estacionario.

2. La variable controlada (v_{CM}) queda acotada dentro de los valores indicados, que en este ensayo fue fijado en $\pm 100V$ alrededor del punto operativo ($v_{CM} = 187.5V$). La derivada máxima de la misma fue fijada en $250V/s$. El hecho de poder restringir los valores adoptados por la variable manipulada hace particularmente útil al método, ya que permite adecuar el control a las limitaciones físicas de los elementos constitutivos del sistema.
3. Si bien sería de esperar que aumentado el número de puntos de coincidencia disminuyese el índice de funcionamiento, en realidad los resultados son contrarios. Se nota que con un solo punto de coincidencia se obtiene un menor IAE que con dos o más puntos de coincidencia.
4. Obteniendo un modelo más elaborado que se ajuste mejor al comportamiento de la planta se podrían mejorar los resultados, especialmente para mayores excursiones de la variable perturbación. Esto podría conducir a futuros trabajos de investigación.

6. Referencias

[Larminie, 2003] Larminie, J. & Dicks, A.; Fuel Cell Systems Explained 2nd Edition, Wiley & Son, 2003.

[fchandbook, 2002] EG&G Technical Services; Fuel Cell Handbook, 6th edition, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy & National Energy Technology Laboratory, 2002

[Grujicic, 2004a] M. Grujicic, K. Chittajallu, E. Law, J. Pukrushpan, Model-based control strategies in the dynamic interaction of air supply and fuel cell, *Proceedings of the Inst. Mech. Engrs. Vol. 218 Part A: Journal of Power and Energy, 2004*

[Grujicic, 2004b] M. Grujicic, K. Chittajallu, J. Pukrushpan, Control of the transient behaviour of polymer electrolyte membrane fuel cell systems, *Proceedings of the Inst. Mech. Engrs. Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering, 2004*

[Pukrushpan, 2002] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, H. Peng, "Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System", *Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, 2002*

[Pukrushpan, 2004] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, H. Peng, Control of Fuel Cell Breathing, *IEEE Control Systems Magazine*, April 2004

[Richalet, 1995] J. Richelet, J.L. Estival, Ph. Fiani, “Industrial applications of Predictive Functional Control to metallurgical Industries”, *Control Applications, 1995., Proceedings of the 4th IEEE ...*, 1995

[Richalet, 1993] J. Richalet, “Industrials applications of model based predictive control”, *Automatica (Journal of IFAC)*, Volume 29, Issue 5, 1251 – 1274, 1993

[Vahidi, 2004] A. Vahidi, “Model Predictive Control for Prevention Starvation in a Hybrid Fuel Cell System”, *American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004*