

EVALUACIÓN DE DISTINTAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PREDICTIVO CON RESTRICCIONES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE

Alicia Arce, Alejandro J. del Real y Carlos Bordons

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Superior de Ingenieros. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla

bordons@esi.us.es

Resumen

En este trabajo se presentan algunos resultados de la aplicación de técnicas de control avanzado a pilas de combustible. El trabajo analiza distintas estrategias de control para desarrollar distintos objetivos de control. Un estudio preliminar de los requerimientos para pilas de combustible tipo PEM conduce a tres criterios distintos de control: seguimiento de un voltaje de salida deseado, prevención del fenómeno denominado 'Starvation' y obtención de la máxima eficiencia. Estos objetivos son desarrollados mediante el diseño de distintos algoritmos de control basados en Control Predictivo Generalizado (GPC) extendido con la consideración de las perturbaciones medibles. Estos algoritmos tienen en cuenta dos restricciones: límite físico del voltaje del compresor (acción de control) y límite operacional de la variable exceso de oxígeno para prevenir la aparición de 'Starvation'.

Palabras clave: Control Predictivo, Pilas de combustible, Restricciones, Perturbaciones medibles.

1. INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible se han desarrollado considerablemente en los últimos años. Aunque fueron inventadas hace más de cien años, han recibido mucha atención en la última década como buenas candidatas a la producción de electricidad sin contaminación tanto en aplicaciones estacionarias como móviles. Existen en la actualidad varios temas abiertos en campos como los materiales, la distribución o el mantenimiento, siendo el Control Automático uno de los más importantes. Existen muchos tipos de pilas de combustible [5], centrándose este trabajo en la pila tipo PEM (Polymeric Electrolyte Membrane), las cuales trabajan a bajas temperaturas y muestran un rápida respuesta dinámica, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en automóviles. Está claro que la buena actuación de estos dispositivos está íntimamente relacionada con el control que se desarrolle sobre ellos, luego el estudio de distintas

estrategias de control está justificado. Este estudio puede conducir a la mejora de las estrategias de control en este campo. Los sistemas de potencia basados en pilas de combustibles están compuestos por otros equipos para suministrar electricidad a cargas o a red. Tales dispositivos auxiliares como convertidores de potencia de CC/CC o de CC/CA, baterías o supercondensadores forman parte del sistema y en el caso en el que la pila de combustible no esté alimentada directamente de hidrógeno, se debe incorporar también un reformador. Por tanto existen muchos lazos de control dentro del sistema total dependiendo de los equipos que deben ser controlados.

El más bajo nivel de control se encarga de controlar el funcionamiento de la pila de combustible lo cual consiste básicamente en el control de la alimentación de aire y de hidrógeno, la presión y la temperatura. El siguiente nivel de control se encarga de regular el sistema completo, integrando los dispositivos de acondicionamiento de potencia, el almacenamiento de hidrógeno y el reformador (si fuera necesario).

En la literatura se plantean distintas estrategias de control que van desde controles Feedforward [6], LQR ([6] y [9]), Redes Neuronales ([8] y [7]) hasta Control Predictivo (referencia6).

Este trabajo se centra en el control de bajo nivel de la pila de combustible, donde se pueden encontrar tres objetivos diferentes de control: máxima eficiencia, control del voltaje y prevención de la 'Starvation'. En todos los casos el control regula la alimentación de aire y de hidrógeno, actuando sobre la tensión del compresor y la válvula de alimentación de hidrógeno. Hay otras variables como la temperatura de la célula, la presión de los reactivos o la humedad de éstos que pueden ser incluidos en las estrategias de control para mejorar la actuación.

Se debe destacar el papel crucial de la alimentación del aire como podemos ver en [5]. Además una vez que se haya elegido un objetivo de control es importante diseñar un buen algoritmo de control que mantenga el oxígeno de alimentación entorno a su valor deseado. En este

estudio se plantean para este propósito algoritmos basados en Control Predictivo basado en Modelo (MPC) con restricciones.

En el trabajo se analizan los posibles objetivos de control y se plantea como solución un control basado en MPC. El control se simula con un modelo no lineal de una pila de combustible, mostrando los buenos resultados que se pueden obtener, mejorando trabajos publicados anteriormente.

El artículo se divide en varias secciones: en la sección II se describe el modelo de la pila de combustible a controlar mientras que la sección III se analizan las posibles estrategias de control. Una vez se ha encontrado la mejor solución, en la sección IV se muestra el diseño del Control Predictivo con restricciones. El comportamiento de este control es simulado con un modelo no lineal y los resultados son mostrados en la sección V. Finalmente las conclusiones son comentadas en la sección VI.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El modelo de la pila de combustible tipo PEM que se plantea en este trabajo se basa en un modelo propuesto por Prukushpan, Stefanopoulou y Peng [6]. Este modelo es ampliamente aceptado actualmente en la comunidad de control debido a que representa de manera óptima el comportamiento de una pila de combustible actual con propósitos de control. Este modelo es de parámetros concentrados y describe bastante bien la dinámica del sistema. Considera la temperatura de operación de la pila de combustible y la humedad de los reactivos controladas, luego estas variables pueden considerarse constantes. El suministro de hidrógeno se controla mediante una válvula de entrada de manera que la presión de hidrógeno sigue la presión de oxígeno en el cátodo. Esto se consigue por medio de un control proporcional evitando que se produzca una alta diferencia de presión a la entrada la cual puede estropear la pila.

La acción de control principal por tanto es la presión de oxígeno (o aire), la cual es regulada actuando sobre el voltaje del compresor, como se muestra en la figura 1. La actuación se puede diseñar bajo distintos objetivos de control.

Las principales características de la pila de combustible usadas en este trabajo [6] son:

- Número de células=381
- Material de la membrana=Nafión 117
- Área activa=280cm²

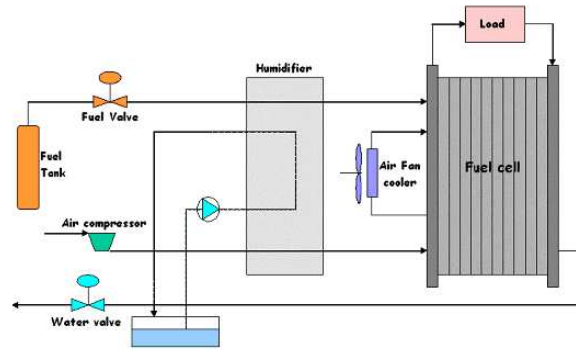


Figura 1: Esquema de los actuadores de la pila de combustible y de los equipos auxiliares.

- Voltaje nominal de la pila =245V
- Intensidad nominal de la pila =191A
- Máxima potencia =75kW

3. CRITERIOS DE CONTROL

Antes de elegir un método adecuado de control se tienen que tener en cuenta algunos factores característicos de la pila de combustible. Dos fenómenos pueden producirse en la pila de combustible deteriorándola o incluso destruyéndola. El primero de ellos está relacionado con la temperatura y la humedad, lo cual se supone que está perfectamente controlado y no se tiene en cuenta en este trabajo. El segundo es la denominada 'Starvation' que es el peor fenómeno que puede darse en la pila de combustible; una vez que aparece es incontrolable a menos que se apague inmediatamente el dispositivo pero de todas maneras las células han podido ser dañadas irreparablemente. Este fenómeno está relacionado con la cantidad de oxígeno que hay dentro de la pila de combustible y se desencadena cuando este variable baja de un cierto nivel.

El coeficiente de exceso de oxígeno es un indicativo de la posibilidad de aparición de la 'Starvation' y se define como:

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

Siendo $W_{O_2,in}$ la cantidad de oxígeno que entra en el cátodo y $W_{O_2,react}$ la cantidad de oxígeno que realmente reacciona. Esta variable debe ser regulada y mantenida por encima de un umbral para asegurar un régimen de operación segura.

Se pueden tener en cuenta tres objetivos de control a la hora de controlar las pilas:

1. Máxima eficiencia

2. Prevención de la 'Starvation'
3. Seguimiento de un voltaje de salida deseado

Estos criterios se deben cumplir independientemente de la demanda de carga, es decir, la corriente que debe suministrar la pila de combustible en cada momento, considerándose como una perturbación. Por lo tanto las entradas de proceso son el voltaje del compresor (manipulable) y la corriente demandada (perturbación). Las principales salidas del proceso son el exceso de oxígeno y la tensión de la pila. La elección de la variable de salida a controlar depende del criterio de control que se establezca. Destacar que la potencia neta está relacionada con el exceso de oxígeno, y existe por tanto un valor del ratio de oxígeno para suministrar la potencia neta máxima en cada momento.

Para analizar las ventajas y desventajas de estos tres objetivos de control se ha realizado un estudio de la actuación de cada una de las situaciones. Este estudio se lleva a cabo mediante simulaciones de un modelo obtenido previamente, obteniéndose un conjunto de curvas que describen la evolución de la potencia neta suministrada por la pila de combustible y la potencia del compresor en distintas situaciones. En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de la pila de combustible en régimen permanente para cada una de estas situaciones.

La siguiente figuras muestran la potencia neta (la potencia neta suministrada por la pila menos la potencia del compresor) frente al exceso de oxígeno cuando la intensidad demandada varía (I_{st}). Los picos de cada una de las curvas proporcionan el punto de operación óptimo (en régimen permanente) para cada situación (definida por la corriente demandada).

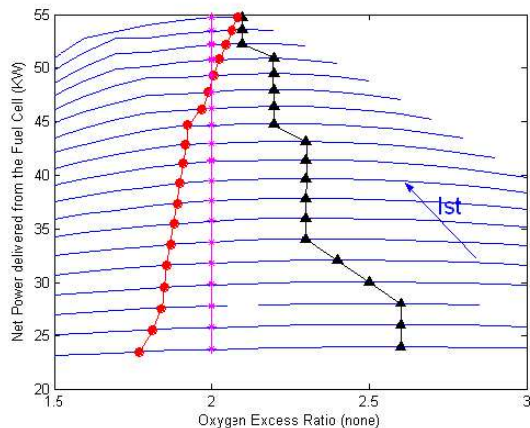


Figura 2: Curvas en régimen permanente de la potencia neta frente al exceso de oxígeno. Curvas de la evolución de los diferentes criterios de control

Se muestran tres diferentes trayectorias en la gráfica: mediante triángulos se representa el régimen de operación tomando el objetivo de control 1 (máxima eficiencia). Se puede ver que el exceso de oxígeno siempre se mantiene por encima del valor 1 (límite crítico) e incluso por encima del valor 2 (valor usual), eliminando el peligro a que se desencadene la 'Starvation'.

Las trayectorias con asteriscos se refieren al objetivo 2 (prevención de la 'Starvation'). Este control es propuesto en [6]. El valor es mantenido en el valor 2 luego si el control actúa correctamente el riesgo a la 'Starvation' es eliminado.

La última trayectoria (círculos) muestra el caso del control del voltaje suministrado por la pila de combustible manteniéndolo sobre un valor constante para todo un rango de evolución de demanda de corriente. Este criterio de control tiene riesgos de que el ratio de exceso de oxígeno sea muy pequeño para bajas demandas de corriente, elevándose este riesgo en los transitorios. Además el rango de voltaje que puede ser efectivamente seguido es muy pequeño debido a las limitaciones del compresor.

Se ha realizado complementariamente un estudio de la potencia neta frente al caudal del aire en lugar del ratio de oxígeno en la pila obteniéndose información útil. El caudal de aire es medible mientras que el ratio de oxígeno tiene que ser calculado. En la figura 3 se muestra esta relación.

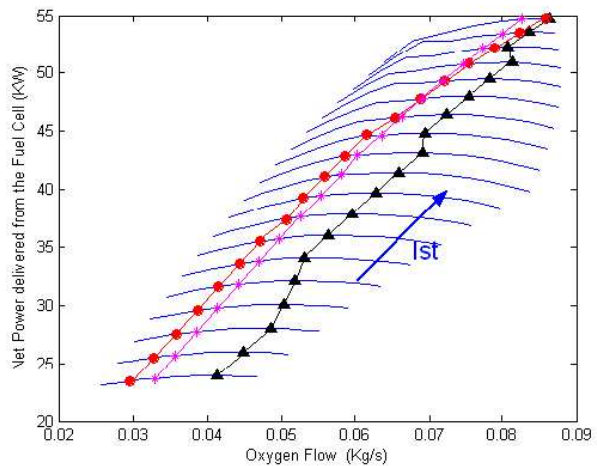


Figura 3: Curvas en régimen permanente de la potencia neta frente al caudal de aire. Curvas de la evolución de los diferentes criterios de control.

4. CONTROL PREDICTIVO CON RESTRICCIONES

En esta sección se describe el diseño de los controladores predictivos para cada uno de los criterios de control señalados anteriormente. MPC

puede ser considerado como uno de los más populares técnicas avanzadas de control en la industria [3], debido a su habilidad para regular procesos con múltiples criterios (económico, seguridad, ambiental o calidad) y puntos de operación que cambian. Otro importante rasgo de MPC es la capacidad para trabajar con restricciones. En la práctica todos los procesos están sujetos a restricciones: los actuadores tienen un rango limitado de acción por razones de seguridad o límites físicos tanto como rango en los sensores, debido a los límites en las variables del proceso. Todas los puntos de operación de las plantas están determinadas por satisfacer metas económicas y bajo ciertas restricciones. Los sistemas de control normalmente operan cerca de los límites y las restricciones se pueden probablemente violar. El control Predictivo se anticipa a las violaciones de las restricciones y las corrige de forma apropiada. En este caso particular se tienen en cuenta dos restricciones: el voltaje del compresor (restricción de entrada debido a límites físicos) y exceso de oxígeno (restricción de salida para evitar la 'Starvation'), pero sólo la primera de ellas se puede implementar realmente. Esto es debido a que la dinámica eléctrica es mucho más rápida que la de los fluidos. Esto conduce a una imposibilidad de prevenir la drástica reducción del exceso de oxígeno cuando se realiza un escalón en la demanda de la corriente. Esta restricción sólo puede ser satisfecha incluyendo al sistema dispositivos auxiliares como baterías o supercondensadores. De todas formas como se mencionó en secciones previas, los transitorios del exceso de oxígeno es mejorado mediante las técnicas de control diseñadas.

El controlador que se diseña es del tipo GPC (Generalized Predictive Control) [2], el cual ha sido extendido con la consideración de perturbaciones medible cuando se computa la acción de control, como se muestra en [3]. Esto es muy útil en este caso puesto que la corriente demandada se considera una perturbación medible.

Como se ha establecido anteriormente la variable manipulable es el voltaje del compresor y la variable controlable el exceso de oxígeno (criterio 1 y 2) o el voltaje de la pila de combustible (criterio 3).

Puesto que el GPC es un controlador lineal, es necesario obtener un modelo lineal de la planta. Esto ha sido realizado identificando un modelo lineal usando información del modelo no lineal dado en [1]. Más tarde el modelo lineal es discretizado usando un tiempo de muestreo de 10 ms. El comportamiento del modelo discretizado es muy similar al modelo no lineal cuando se producen cambios en la demanda de la carga, como vemos

en la figura 4

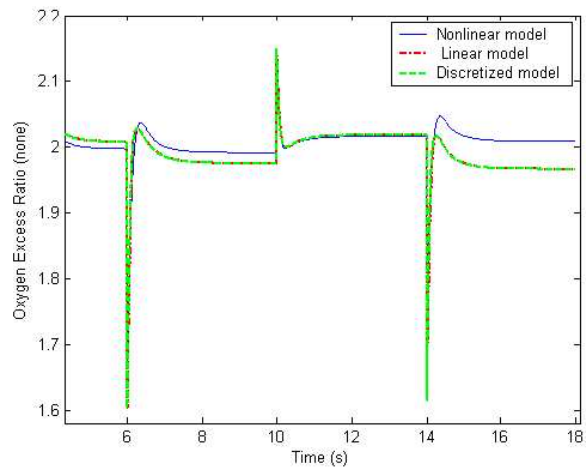


Figura 4: Comparación entre el modelo lineal continuo y el discreto de la pila de combustible.

La ecuación del modelo que se realiza para calcular la salida del sistema viene dada por la ecuación 2.

$$y(t) = G(z^{-1}) \cdot V_{cp}(t - d) + H(z^{-1}) \cdot I_{st}(t) \quad (2)$$

Donde y es el exceso de oxígeno, G es la función de transferencia entre el exceso de oxígeno y el voltaje del compresor y H es la función de transferencia entre el exceso de oxígeno y la corriente de la pila. V_{cp} es el voltaje del compresor (entrada manipulable) y I_{st} es la corriente (perturbación medible).

Las siguientes figuras muestran los esquemas de control que se usan para alcanzar cada uno de los tres posibles objetivos. El primero de ellos (figure 5) muestra el caso correspondiente a la prevención de 'Starvation': la salida controlable (exceso de oxígeno) se mantiene en torno a un valor igual a 2. Este es el caso presentado en [6] pero en este trabajo los autores abordan el problema planteando un controlador LQR. El siguiente caso (máxima eficiencia) es similar al primer caso, pero ahora existe un nuevo bloque perteneciente a un Generador de Referencia el cual usando el análisis anterior, calcula las referencias para cada exceso de oxígeno en cada tiempo de muestreo dependiendo de la corriente demandada. La última estructura de control es diferente a las otras ya que la variable realimentada es el voltaje de la célula.

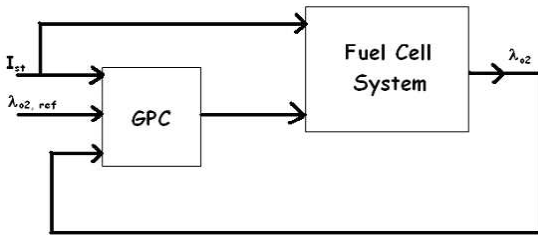


Figura 5: Esquema de control GPC para la prevención de la 'Starvation'

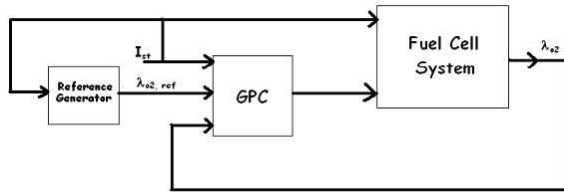


Figura 6: Esquema de control para la máxima eficiencia

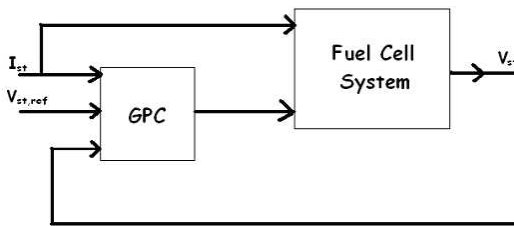


Figura 7: Esquema de control para el control de voltaje

El GPC está basado con una minimización on-line de la función de coste dado por:

$$J = \sum_{j=N_1}^{j=N_2} [y(t+d|t) - w(t+d|t)]^2 + \sum_{j=1}^{j=N_u} \lambda(j) \cdot [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (3)$$

$$V_{min} \leq V_{cp} \leq V_{max} \quad (4)$$

$$\lambda_{O_2,min} \leq \lambda_{O_2} \leq \lambda_{O_2,max} \quad (5)$$

Esta minimización está sujeta a restricciones 4 y 5 (voltaje del compresor y el exceso de oxígeno). La función objetivo puede ser reescrito en forma vectorial:

$$J = (G \cdot u + H \cdot v + f - w)^T \cdot (G \cdot u + H \cdot v + f - w) + \lambda \cdot u^T \cdot u \quad (6)$$

Donde u es el voltaje del compresor, v es la perturbación medible que corresponde a la corriente

de la pila, w es la referencia, λ es el peso de compensación del control y f es la respuesta libre.

La sintonización de los parámetros del GPC tiene un importante papel en la actuación en bucle cerrado. Los principales parámetros son los horizontes de control y predicción y el peso de compensación del control. Este último valor repercute claramente al tiempo de subida y a la sobreoscilación de la variable controlada. La figura 8 presenta algunas simulaciones con el objetivo de controlar la 'Starvation' cuando este factor es modificado y la corriente demandada varía en forma de escalón, siendo el horizonte de control y predicción igual a 4. La figura 9 muestra la variable de entrada calculada mediante el control.

Después de varias simulaciones e intentando encontrar un compromiso entre velocidad de respuesta y sobreoscilación, el valor del peso fue establecido en 0.002. Obsérvese que para valores más pequeños, aunque puede producir valores más rápidos de respuesta, puede reducir el exceso de oxígeno en los transitorios a valores muy cercanos de la zona crítica.

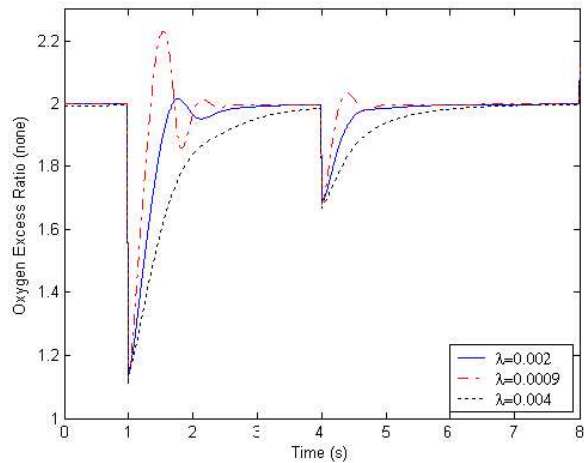


Figura 8: Control del exceso de oxígeno mediante un GPC sintonizado con diferentes pesos de control en simulación dinámica variando la corriente.

5. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En este apartado se presentan algunas simulaciones realizadas sobre el modelo no lineal de la pila de combustible mostrando el comportamiento en bucle cerrado cuando los tres criterios de control son implementados. Los valores de las tres variables más importantes se muestran para cada uno de los objetivos: el voltaje de la pila, la potencia neta y el exceso de oxígeno. En todos los casos se ha empleado el mismo algoritmo de control: GPC con restricciones y efecto Feedforward.

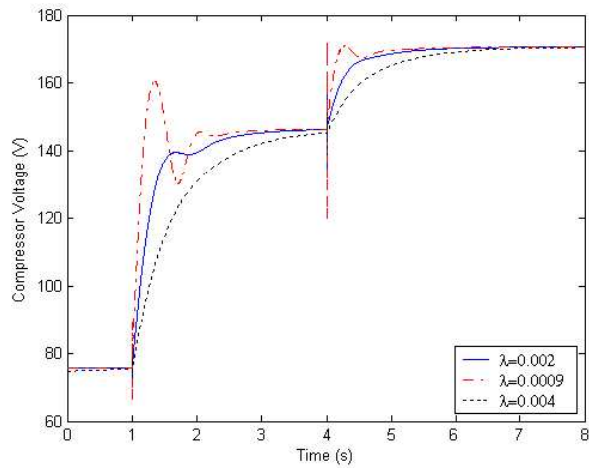


Figura 9: Voltaje del compresor generado por el GPC sintonizado con diferentes pesos en simulación dinámica para variaciones de corriente.

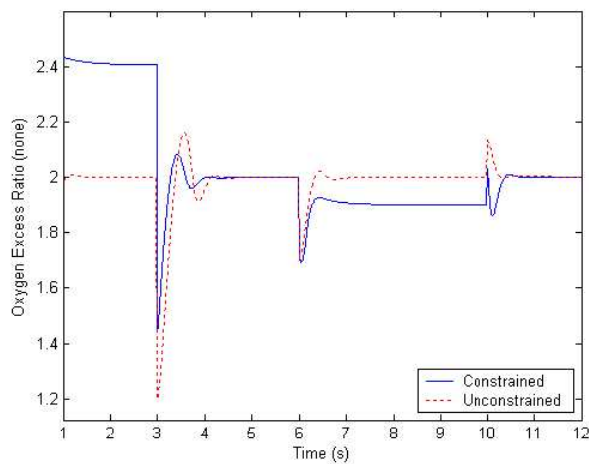


Figura 10: Control del exceso de oxígeno mediante un GPC con y sin restricciones.

La figura 12 compara la potencia suministrada por la pila obtenida en la simulación de los distintos controles correspondientes a cada uno de los distintos objetivos de control. El criterio 1 como es esperado suministra la máxima potencia aunque sólo ligeramente por encima del criterio 2. Observando la evolución del exceso de oxígeno en la figura 13 se confirma lo que se había deducido en los estudios en régimen permanente: El primer objetivo es seguro en términos de 'Starvation' como lo es el segundo objetivo mientras que el control del voltaje opera en región peligrosa, especialmente con corrientes bajas.

En la figura 14 se puede ver la evolución del voltaje de la pila de combustible. El voltaje más alto y por ende el potencial mayor corresponde al criterio 1.

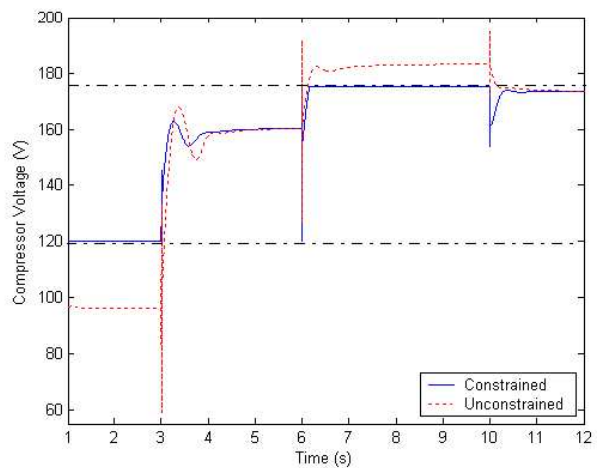


Figura 11: El voltaje del compresor generado por un GPC con y sin restricciones

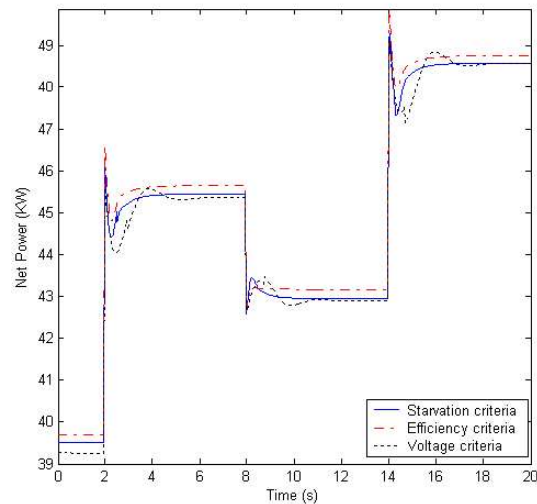


Figura 12: Evolución de la potencia neta para los distintos criterios de control en simulación dinámica variando la corriente.

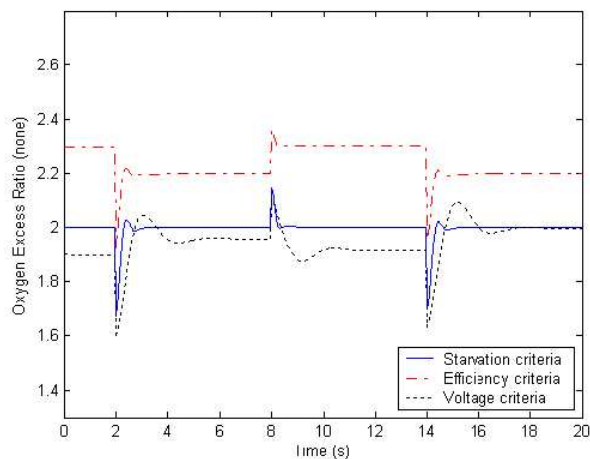


Figura 13: Evolución del exceso de oxígeno para los distintos criterios de control en simulación dinámica variando la corriente.

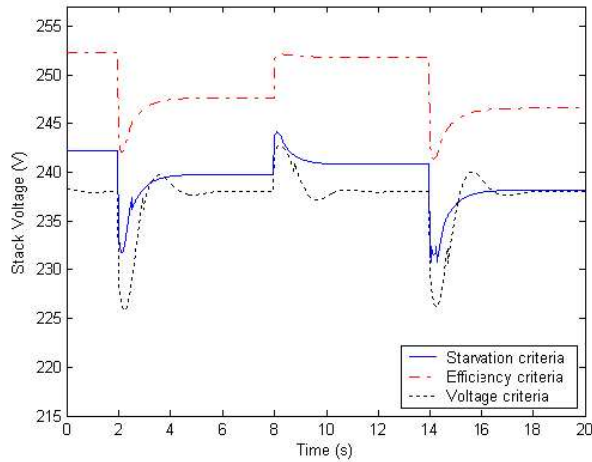


Figura 14: Evolución del voltaje de la pila para los distintos criterios de control en simulación dinámica variando la corriente.

El esfuerzo de control representado por el voltaje del compresor se presenta en la figura 15. El control de máxima eficiencia produce valores más altos para el voltaje del compresor y esto debe ser cuidadosamente analizado, puesto que puede deteriorar el equipo eléctrico o reducir la vida útil del compresor.

En todas las situaciones estudiadas la capacidad de seguimiento del controlador GPC diseñado es muy buena, proveyendo un error nulo en régimen permanente. Esto permite implementar un generador de trayectorias en el caso del control de máxima eficiencia.

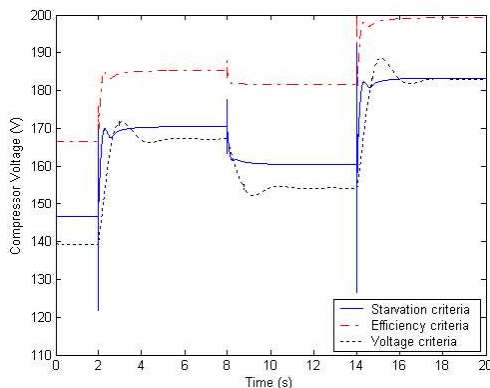


Figura 15: El voltaje del compresor generado por los distintos criterios de control en simulación dinámica variando la corriente.

Un punto en común para las tres situaciones es la respuesta transitoria cuando se varía la corriente en forma de escalón. En este transitorio se reduce drásticamente el valor de las salidas debido a que la dinámica de la corriente es más rápida que la de los reactivos y se puede desencadenar la 'Starvation'. El efecto Feedforward que se ha incluido al

GPC teniendo en cuenta la intensidad como una perturbación medible.

Si eliminamos la componente correspondiente al efecto feedforward implementado en el control la respuesta transitoria se ve empeorada, en particular la acción de control (voltaje del compresor) toma valores no alcanzables físicamente (figuras 16 y 17).

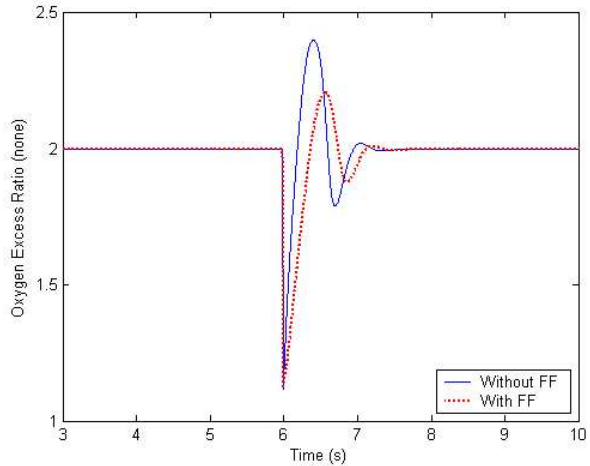


Figura 16: Exceso de oxígeno controlado por GPC con y sin efecto Feedforward.

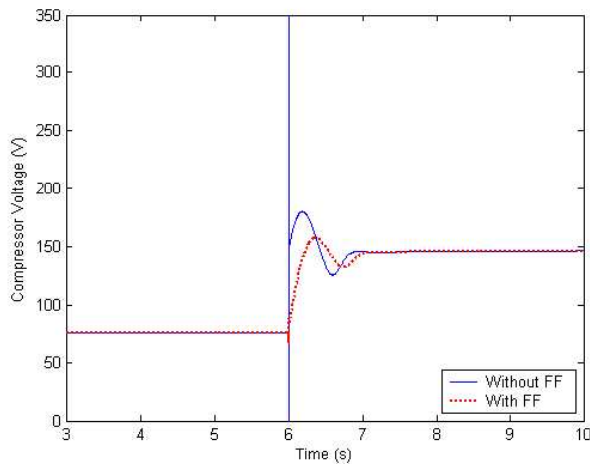


Figura 17: Voltaje del compresor generado por un GPC con y sin efecto Feedforward.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un análisis de las distintas estrategias de control para pilas de combustible tipo PEM. Se han estudiado varias posibilidades de control dependiendo de distintos objetivos. En concreto, se han analizado tres de estos objetivos o criterios de control: maximización de la potencia neta, prevención de la 'Starvation' y control del voltaje de salida de la pila. Se han diseñado controles predictivos para cada uno de

estos casos, teniendo en cuenta la existencia de perturbaciones medibles (corriente demandada) y restricciones. Cada uno de estos objetivos tiene sus ventajas y desventajas. Ha sido elegido un Control Predictivo con restricciones como buen candidato a controlar la pila de combustible para cada uno de los objetivos.

El estudio ha sido desarrollado para pilas funcionando aisladas. Los transitorios pueden ser fácilmente mejorados añadiendo al sistema dispositivos de almacenamiento de potencia como baterías o supercondensadores.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia en el marco del proyecto DPI2004-07444-C04-01 y por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

Referencias

- [1] A. Vahidi, A.G Stefanopoulou and H. Peng, "Model Predictive Control for Starvation Prevention in a Hybrid Fuel Cell System", in *IEEE proceedings of 2004 American Control Conference, 2004*
- [2] D.W. Clarke, C. Mohtabi and P.S. Tuffs. "Generalized Predictive Control. The basic algorithm", in *Automatica, 23(2):149-160, 1987*
- [3] E.F. Camacho and C. Bordons, "Model Predictive Control", series *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, 3^o printing, 2002, Springer*
- [4] J. Golber and D.R. Lewin. "Model-Based control of Fuel Cells Regulatory Control". *Journal of Power Sources 135 (2004) 135-151.*
- [5] J. T. Prukushpan, A. G. Stefanopoulou and H. Peng, "Control of Fuel Cell Breathing", *IEEE Control Systems Magazine, 2004*
- [6] J. T. Prukushpan, A. G. Stefanopoulou and H. Peng, "Control of fuel cell Power Systems: Principles, Modeling and Analysis and Feedback Design", series *Advances in Industrial Control, 2004, Springer*
- [7] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alam, "Neural networks-based control of active and reactive power of a stand-alone PEM fuel cell plant", *Journal of Power Sources 135 (2004) 88-94.*
- [8] P.E.M. Almeida and M. Godoy Simões, "Neural optimal control of PEM fuel cells with parametric CMAC networks", *IEEE Transactions on Industry Applications*
- [9] P. Rodatz, G. Paganelli and L. Guzzella, "Optimization air supply control of a PEM Fuel Cell system", *IEEE Proceeding of American Control Conference, 2003*