

CONTROL HEURÍSTICO DE GESTIÓN DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO CON PILA DE COMBUSTIBLE

Alicia Arce

ETSI de Sevilla, aarce@cartuja.us.es

Alejandro J. del Real

ETSI de Sevilla, adelreal@cartuja.us.es

Carlos Bordons

ESTI de Sevilla, bordons@esi.us.es

Resumen

Se presenta brevemente en la primera parte de este artículo el modelo de un automóvil propulsado por un sistema de potencia híbrido integrando una pila de combustible tipo PEM (Polymeric Electrolyte Membrane). Dicho modelo es cuasi-estático y está orientado al control. En un segundo estadio, se propone, en base al modelo presentado, un control heurístico de gestión del sistema de potencia, actuando sobre cada uno de los componentes que configuran dicho sistema. Asimismo, se muestran los resultados obtenidos en simulación.

Palabras clave: pilas de combustible, PEM, automóvil, modelo híbrido, control heurístico.

1. INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible se han desarrollado considerablemente los últimos años aunque han sido inventadas hace más de cien, debido a que se consideran como unas buenas candidatas a la producción de energía limpia. Existen diversos tipos de pilas de combustible pero este estudio se centra en las de tipo PEM (Polymeric Electrolyte Membrane) ya que tiene una rápida puesta en marcha y funcionan a bajas temperaturas, lo que las hace muy óptimas para su empleo tanto en aplicaciones estacionarias como en móviles.

En la primera parte del artículo se estudia un sistema compuesto por pilas de combustible PEM en aplicación móvil, más exactamente dentro del sistema de potencia de un automóvil convencional. Las pilas funcionan en este sistema junto con otros elementos como pueden ser las baterías, el motor eléctrico y el sistema de acondicionamiento. En el sistema que se presenta hay varios lazos de control divididos en dos niveles. En un primer nivel se tienen en cuenta los controles locales de la pila de combustible, de los convertidores e inversores y del resto de componentes [1],[2]. En un nivel superior, estudiamos la gestión de potencia entre cada uno de los componentes que se consideran perfectamente controlados. Para poder diseñar un control del sistema en este nivel es necesario plantear

un modelo cuasi-estático de cada uno de los componentes y así simular y diseñar controladores a este nivel. Como podemos ver [4] existen varios tipos de modelos para simular cada uno de los componentes del sistema. El más complejo de todos es el que entra en la dinámica detallada de cada uno de los componentes, en muchos casos esta dinámica no es relevante en el conjunto total, aunque puede ser muy importante en el diseño de los controladores locales de cada uno de los dispositivos estudiados independientemente. Nuestro caso en estudio considera que cada uno de los componentes está correctamente controlado por unos controladores locales y el objeto del modelo global es simular el comportamiento del sistema de potencia del coche para poder diseñar controladores que regulen las potencias de cada uno de los componentes, por esta razón, la primera posibilidad de modelado sería muy complejo y poco útil. Por ello, desarrollamos un modelo cuasi-estático que represente el comportamiento de las principales variables que actúan de manera significativa en el sistema de potencia.

En la segunda mitad del trabajo, se describe el control heurístico diseñado. Como arriba se indica, se centra en el nivel superior de la gestión de cada uno de los componentes del sistema, suponiendo controlados localmente en un nivel inferior dichos dispositivos. Las simulaciones que se adjuntan muestran la operación del sistema en un ciclo de conducción en ciudad para distintos escenarios de carga inicial de las baterías del vehículo.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO

El coche que va a ser desarrollado es un Santana Vitara proporcionado por la empresa Santana motors del cual sólo se conservará el chasis y algunos complementos puesto que todo el resto el motor y el sistema de potencia junto con la central de control de potencia va a ser sustituido en este proyecto. En la imagen 1 mostramos las fotos del coche que va a ser desarrollado en este proyecto. La apariencia física se mantendrá intacta.

Para comenzar es importante presentar las car-



Figura 1: Foto del coche en estudio

acterísticas del coche en modo convencional y luego comparar con las características que proporcionará el nuevo coche híbrido. Muchas de las características que mostramos a continuación se conservan en el nuevo vehículo, como aquellas características relativas a la estructura física de coche.

Teniendo en cuenta las características presentada por el coche original se ha realizado un diseño de los componentes de manera que se mantuviesen unas condiciones mínimas exigidas para un turismo de circulación urbana. Por ello los datos de diseño ha sido:

- Tiempo de aceleración de 0 a 100km/h: 35s
- Consumo mixto ($lH_2/100km$): 66.7
- Consumo mixto (1 gasolina equivalente/100km): 6.9
- Autonomía urbana: 180km
- Autonomía extraurbana=130km
- Autonomía mixta=150km

Además ha sido necesario realizar un estudio de los pesos que se van a distribuir en el coche para compensar y mantener así la estabilidad que se alcanzaba con el coche original. En la fig 2 mostramos los componentes que van a ser necesarios aportar al vehículo y su localización dentro del vehículo. En la gráfica 3 se presenta la estructura del coche del que partimos para el desarrollo del proyecto. Podemos ver como han variado considerablemente el número de equipos necesarios, siendo en el caso del coche híbrido, más numerosos y voluminosos que en el caso inicial. Como puede observarse se ha intentado mantener la disposición más similar posible a la del vehículo inicial para poder compensar así las masas y mantener la estabilidad en la conducción. Además, en el caso de los depósitos

de hidrógeno, hay que seguir unas normativas estrictas para la colocación en un lugar lo más seguro posible en caso de colisión. Si comparamos las dos figuras vemos que la disposición de los depósitos es la misma que en el caso de la gasolina, detrás y cerca del maletero ya que es la parte que menos sufre en caso de accidente.

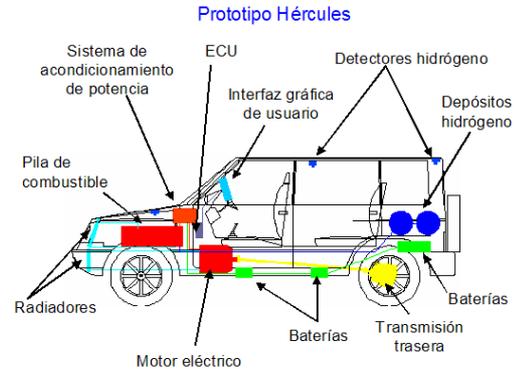


Figura 2: Esquema de los componentes del coche híbrido

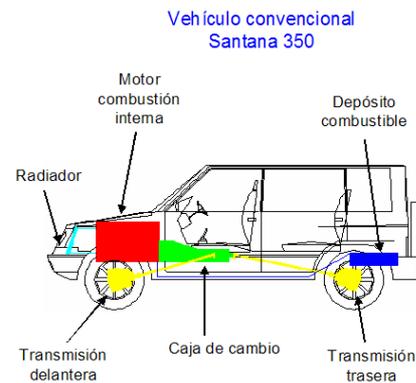


Figura 3: Esquema de los componentes del coche de propulsión inicial

3. MODELO DEL VEHÍCULO

Se expone brevemente en esta sección el modelo cuasi-estático del sistema total para poder simular estrategias de control de la gestión de la potencia durante la conducción (muy crítico) y además para validar el correcto funcionamiento del software y hardware del control que va en el coche.

En la figura 4 se puede ver el diagrama de bloques del modelo del vehículo. Por una parte obsérvese el modelo del motor, junto con la transmisión y el chasis, y por la otra la pila de combustible, el depósito de hidrógeno, las baterías y las resistencias de frenado. En los bloques se muestran las entradas y salidas de cada uno de ellos, aunque se insiste en que la orientación del modelo no es

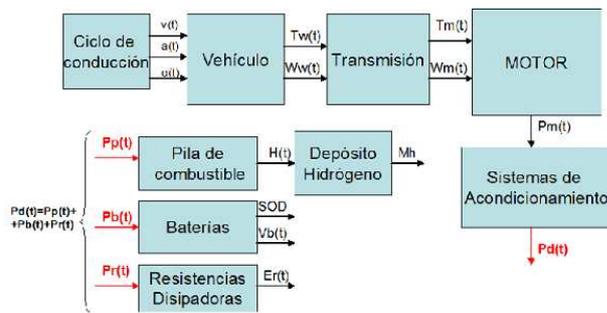


Figura 4: Esquema del modelo del sistema del coche

entrar en detalle en las variables internas de cada componente sino servir como una herramienta útil para poder simular controladores de alto nivel que puedan gestionar las potencias entre los diferentes componentes. El modelo de la primera parte, denominado como vehículo, proporciona según un ciclo de conducción la potencia necesaria para alimentar el motor y para que se alcancen las velocidades requeridas para seguir dicho ciclo. Por otro lado, los demás componentes generadores y absorbedores de energía pueden dividirse en pila, baterías y resistencias, las cuales, dependiendo de la gestión de potencia, van a reaccionar de una manera u otra, suministrando así unos valores de las variables de interés que serán además necesarios para poder diseñar el control supervisor.

El bloque que denominamos como ciclo de conducción proporciona la velocidad, la inclinación del terreno y la aceleración. En general, los ciclos de conducción sólo proporcionan la velocidad del vehículo dependiendo del tiempo. La inclinación del terreno es una variable complicada de indicar si no se conoce previamente el circuito que va a realizar el coche por lo que en general se considera plano, con lo que el ángulo de inclinación va a ser igual a 0. También sería interesante estudiar un ciclo de conducción con una inclinación constante e igual a la máxima que se requiere para los turismos convencionales y comparar los resultados. En este último caso la potencia sería mucho mayor debido a que la fuerza de tracción sobre las ruedas tendría que compensar la inclinación y por ello la fuerza de la gravedad, además de la fuerza de rozamiento y la aerodinámica.

La aceleración del vehículo dependiendo del tiempo se calcula derivando la velocidad suministrada por el ciclo de conducción.

$$a = \frac{dv(t)}{dt} \quad (1)$$

En la gráfica 5 se muestra un ciclo de conducción en ciudad.

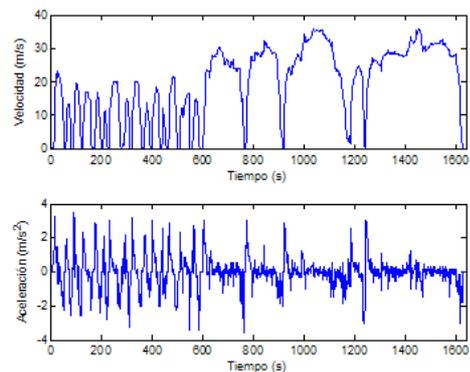


Figura 5: Ciclo de conducción en ciudad

El ciclo de conducción utilizado para realizar las diversas simulaciones presentadas, ha sido obtenidos del programa ADVISOR, que es un toolbox para Matlab, creado para simular diferentes tipos de coches eléctricos. En la gráfica superior se presenta la velocidad en (m/s), donde se observa que la primera parte tiene más paradas que la segunda, donde se entra en una vía rápida dentro de la ciudad. En la gráfica inferior se muestran las variaciones de la aceleración. Las aceleraciones son mucho más variables en la primera parte donde el coche para y arranca con más frecuencia.

4. OBJETIVO Y DISEÑO DEL CONTROLADOR

El objetivo del controlador implementado es gestionar la potencia de las diferentes fuentes de energía (pila, batería y resistencias) de manera que se minimice el consumo de hidrógeno y se satisfaga la demanda de potencia del coche. Para ello se considera que las baterías deben mantenerse en un estado óptimo cerca de la mitad de descarga que hemos situado en el punto $SOD=0.5$, de manera que si están más cargadas pueden actuar abasteciendo al sistema con la energía sobrante, pudiendo actuar también de esta manera cuando la pila no pueda suministrar la potencia necesaria que requiera el motor en ese instante.

Es muy importante analizar las restricciones que vamos a tener en cuenta para diseñar el control. Por un lado las restricciones físicas de la batería, ya que ésta no puede funcionar fuera de un rango $0,1 < SOD < 0,8$, por lo que no pueden descargarse totalmente ni tampoco cargarse del todo puesto que se deterioran rápidamente y la vida útil se ve reducida. Además, la intensidad de las baterías en estado de descarga no puede ser superior a 200A durante 30 sg. También la intensidad de carga de la batería tiene un límite y en las es-

pecificaciones se puede leer que la intensidad de carga recomendada es de 30A. El tanque tiene una máxima masa de hidrógeno igual a 2.4kg. La pila suministra una potencia máxima como se dice en las especificaciones del fabricante de 56kW, no pudiendo absorber energía negativa procedente del freno regenerativo.

Analizando el sistema podemos dividir el funcionamiento en tres diferentes modos, para ello definimos la intensidad denominada por efectos de fricción:

$$a(t) = \frac{-1}{2 \cdot m_v} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v^2(t) - g \cdot c_r \quad (2)$$

- Modo de tracción: Este modo corresponde cuando la aceleración del vehículo es positiva y por tanto la potencia demandada por el motor es positivo.
- Modo de frenado regenerativo: En este caso la aceleración es negativa y menor que la correspondiente a los efectos de fricción que presentábamos en la ecuación 2, por ello la potencia demandada por el motor es negativa.
- Modo punto muerto: La aceleración es negativa pero el valor es mayor que la de la fricción (ec. 2), luego la potencia demandada por el motor es nula.

Analizando las diferentes posibilidades para el control heurístico encontramos 17 estados posibles diferentes, de los cuales 12 corresponden al modo de funcionamiento de tracción, 3 al frenado regenerativo y 2 al punto muerto. Los diferentes estados se adjuntan a continuación, mostrando el esquema de las condiciones que deben cumplir para estar activos (fig. 6) y las salidas dependiendo de dichos estados (fig. 7).

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan algunos resultados del control implementado sobre el ciclo de conducción en ciudad. En la figura 5 se presentó el ciclo de conducción y la aceleración demandada al motor para dicho ciclo. En la gráfica de las potencias, como vemos a otra escala en la figura 8, se han representado la potencia que requiere el ciclo, la potencia que demanda el motor (que no tiene porqué coincidir con aquella) y por último la potencia que se demanda en el bus de continua teniendo en cuenta las pérdidas en el sistema de acondicionamiento de potencia.

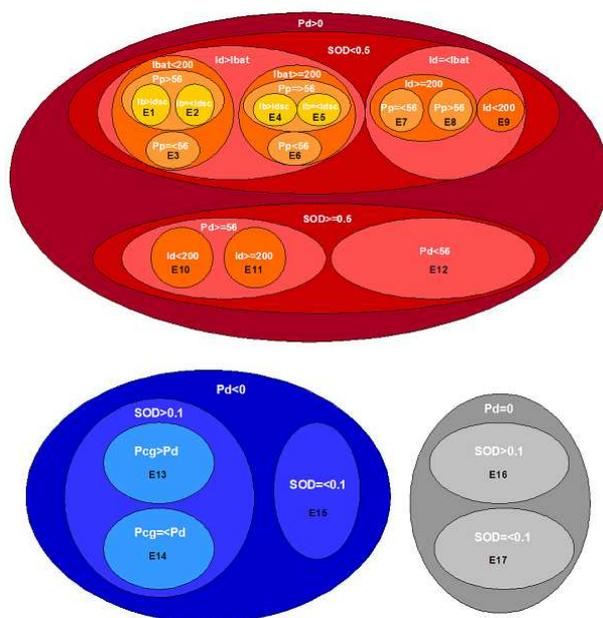


Figura 6: Esquema de las condiciones de los estados

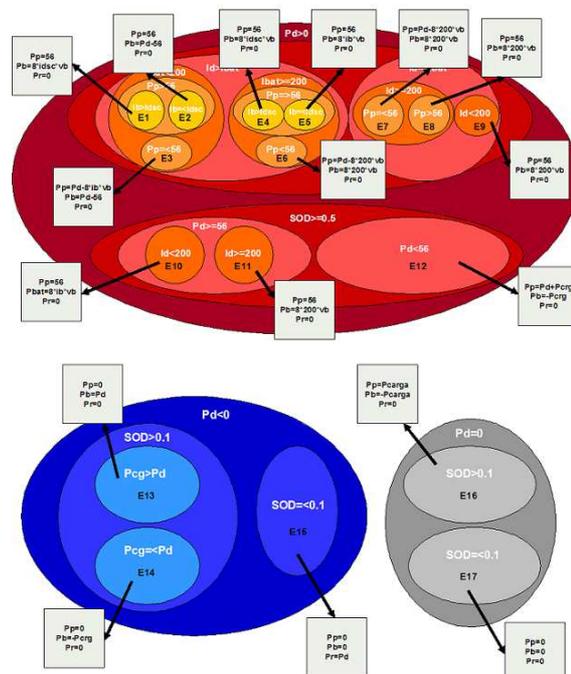


Figura 7: Salidas en función de los estados

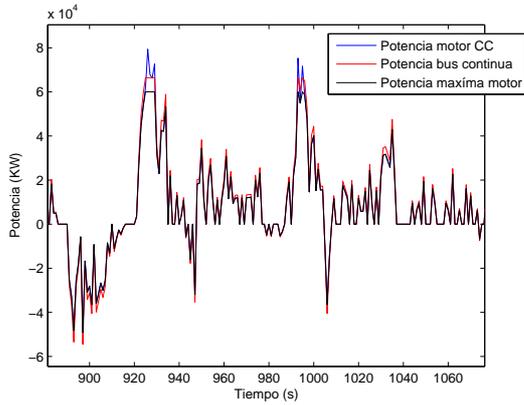


Figura 8: Potencias demandadas en un ciclo de conducción en ciudad

Se han realizados diferentes simulaciones con estados de las baterías distintos ya que eso va a cambiar por completo la actuación del sistema. En primer lugar se hacen unas simulaciones para un estado de descarga de las baterías ligeramente por debajo del punto óptimo considerado 0.5, valor éste basado en [6]. Esta variable va a ser importante para minimizar el consumo de hidrógeno y va a variar dependiendo de las baterías reales, con lo que en trabajos posteriores se realizará un estudio más exhaustivo de este punto óptimo. Así, la figura 9 presenta para este caso la potencia de las baterías, la de la pila de combustible y la de las resistencia de frenado. Observamos que en primer lugar las baterías funcionan suministrando la mayor parte de la potencia demandada por el motor hasta que alcanzan el punto de descarga óptimo, donde la pila de combustible es la encargada de suministrar la mayor parte de la potencia demandada y la batería solo funciona en el caso en el que la pila no pueda suministrar el nivel de potencia requerido. En la figura 10 se muestra la evolución del estado de descarga de la batería.

La gráfica 11 presenta las potencias demandadas a cada uno de los sistemas, partiendo de un estado de descarga casi nulo de 0.1. En este caso, las baterías actúan asumiendo la alimentación del motor durante todo el ciclo puesto que no se alcanza el punto óptimo de descarga. La pila, como puede verse en la misma figura, sólo funciona para cargar las baterías y para los apoyos a las baterías. La figura 12 muestra la evolución del estado de descarga de las baterías durante todo el ciclo.

En la figuras 13 y 14 se presentan los resultados para un estado de descarga inicial de 0.6, con lo que las baterías están más descargadas que el punto considerado como óptimo. Por ello la pila de combustible va a funcionar como fuente de energía primaria hasta que se alcance el punto de descarga

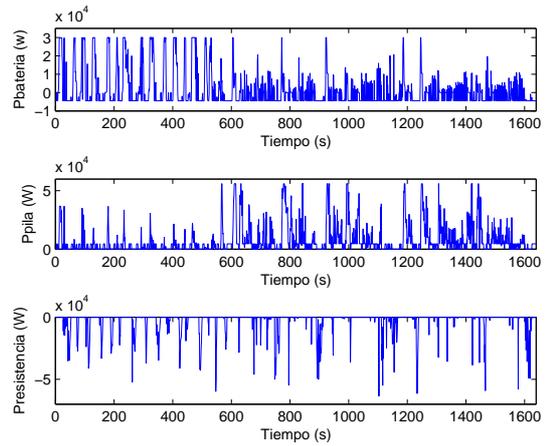


Figura 9: Potencia de la pila, batería y resistencia en el ciclo de conducción en ciudad para SOD inicial de 0.4

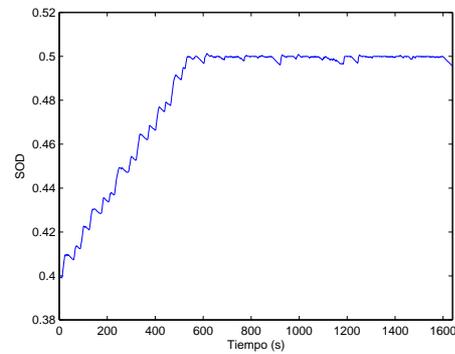


Figura 10: Estado de descarga en el ciclo de conducción en ciudad para SOD inicial de 0.4

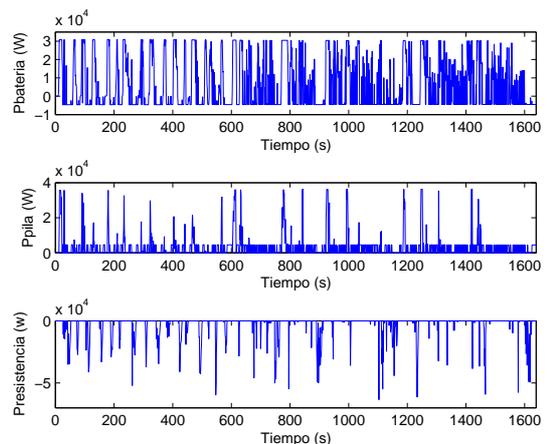


Figura 11: Potencia de la pila, baterías y resistencia de frenado en el ciclo de conducción en ciudad para SOD inicial de 0.1

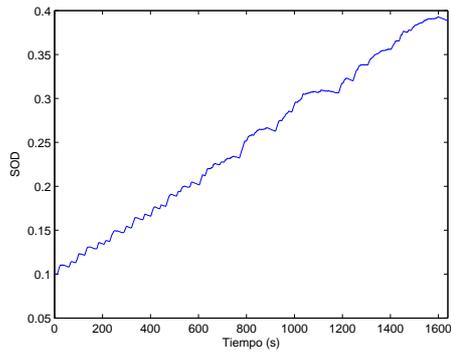


Figura 12: Estado de descarga de la batería en el ciclo de conducción en ciudad para SOD inicial de 0.1

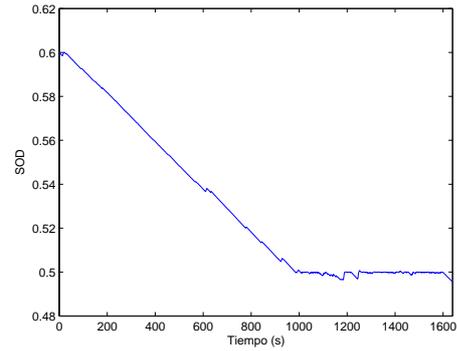


Figura 14: Estado de descarga de la batería en el ciclo de conducción en ciudad para SOD inicial de 0.6

considerado como óptimo.

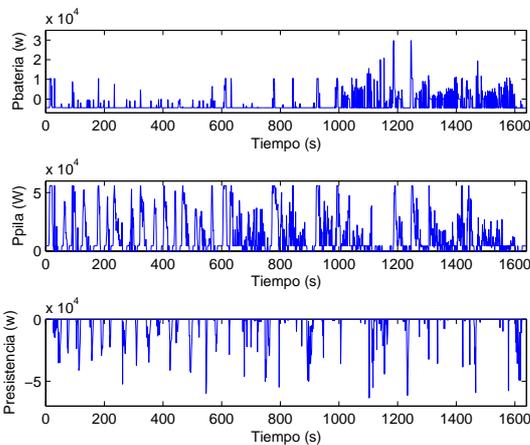


Figura 13: Potencia de la pila, baterías y resistencia de frenado en el ciclo de conducción en ciudad para SOD inicial de 0.6

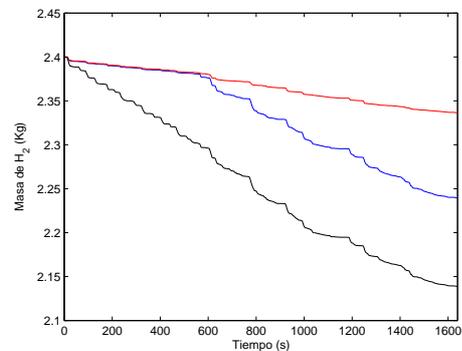


Figura 15: Comparación de consumo de hidrógeno para el ciclo de conducción en ciudad (negro, SOD=0.6; azul, SOD=0.4; rojo, SOD=0.1)

Es interesante comparar el consumo de hidrógeno para los tres casos mostrados, variando el estado de descarga inicial, como se ve en la figura 15. Se destaca que en el caso en el que las baterías comiencen completamente cargadas el consumo de hidrógeno es mucho menor, esto es debido a que hasta que no alcanza el punto óptimo de descarga la pila funciona sólo apoyando la demanda de las baterías.

En la figura 16 presentamos una comparación de los estados del controlador para cada uno de los tres experimentos, donde podemos ver las diferencias en los estados que se alcanzan en cada una de las situaciones de carga de las baterías.

Por último, en la figura 17 se muestran la potencia que demanda el bus de continua y la potencia resultante de los tres sistemas, ambas solapadas e

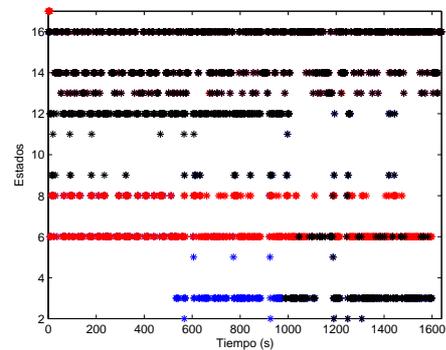


Figura 16: Comparación de los estados alcanzados por el control (negro, SOD=0.6; azul, SOD=0.4; rojo, SOD=0.1)

indistinguibles por ende, resultado de que la demanda del motor está completamente satisfecha para el ciclo de conducción en ciudad presentado. Destáquese también que tras analizar las variables intermedias se encontró que ninguna de ellas, como puede ser la intensidad de las baterías o la potencia máxima de la pila de combustible, violan las restricciones impuestas en el control.

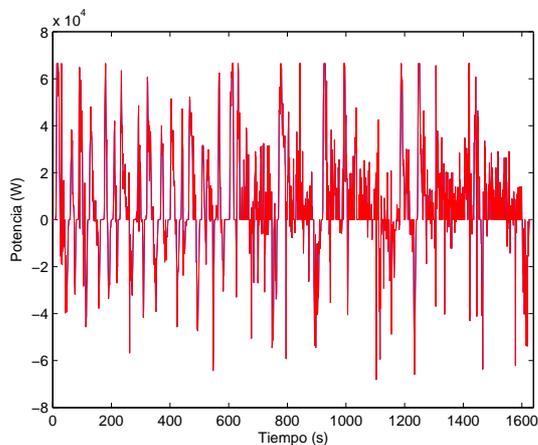


Figura 17: Potencia total que suministran los componentes para un ciclo de conducción en ciudad

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado brevemente el modelo de cada uno de los componentes de un vehículo híbrido con pila de combustible, para después desarrollar un control basado en reglas y de complejidad palpable. Es ésta una primera aproximación para posteriores desarrollos. Así, en futuros trabajos, los modelos presentados se irán agrandando para incluir algunas dinámicas importantes a tener en cuenta como pueden ser los arranques y paradas de la pila de combustible. Una vez obtenidos los resultados del controlador heurístico, se podrían comparar con otros controles más sofisticados, como puede ser un control híbrido que tenga en cuenta los cambios de las dinámicas y algunas restricciones como las puestas en marcha de los dispositivos.

Referencias

- [1] C. Bordons, A. Arce and A. Del Real, “Constrained Predictive Control Strategies for PEM fuel cells”, *IEEE proceedings of 2006 American Control Conference, 2006*
- [2] A. Arce, A. del Real and C. Bordons, “Application of Constrained Predictive Control Strategies to a PEM Fuel Cell Benchmark”,

IEEE proceedings of 2007 European Control Conference, 2007

- [3] A. del Real, A. Arce and C. Bordons, “Development and Experimental validation of a PEM fuel cell Dynamic Model”, *Journal of Power Sources, under press*
- [4] L. Guzzella and Antonio Sciarretta, “Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization”, Springer 2005
- [5] L. Gao, S. Liu and R. Dougal, “Dynamic Lithium-Ion battery Model for System Simulation”, *IEEE transactions on components and packaging technologies, vol 25, no 3, September 2002*
- [6] 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*