

MODELADO DE UN COCHE HÍBRIDO BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

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

Este artículo presenta el modelo de un coche propulsado por un sistema de potencia híbrido basado en pila de combustible PEM (Polymeric Electrolyte Membrane). El modelo de cada uno de los componentes es cuasi-estático y está orientado para el control de más alto nivel cuyo objetivo es la gestión de potencia entre los distintos elementos. El modelo se realiza después de una fase previa de dimensionado y diseño del sistema en el cual se han seleccionado cada uno de los elementos para que el coche resultante tenga las prestaciones mínimas requeridas a un turismo de circulación.

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 tienen 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.

Este artículo 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 presentamos hay varios lazos de control y lo dividimos en dos niveles, un primer nivel en el que tenemos 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 controlados 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 compleja 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.

El objeto del modelo que se ha realizado es por un lado, obtener un simulador para poder emular el comportamiento del control de gestión de potencia que es muy crítico en este caso de sistema puesto que no un fallo en este controlador puede provocar graves accidentes con por supuesto consecuencias lamentables. Por otro lado, el propio modelo será utilizado para poder comprobar y validar el correcto funcionamiento del Hardware que implementará el crítico control antes del ensamblaje y las últimas pruebas sobre el sistema real.

En la primera sección presentamos las características de cada uno de los componentes del sistema real después de la fase previa de diseño y dimensionado. Es muy importante conocer las características de cada uno de los componentes para poder así obtener los parámetros de cada uno de los modelos. En la segunda parte del artículo presentamos las ecuaciones del modelo de cada uno de los componentes.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA REAL

El coche que va ser desarrollado es un Santana Vitara proporcionado por la empresa Santana Mo-

tors 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 siguiente imagen mostramos las fotos del coche que va a ser desarrollado en este proyecto. La apariencia física se mantendrá intacta.



Figura 1: Foto del coche en estudio

Para comenzar es importante presentar las características 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. En el modelado que presentaremos en posteriores secciones utilizaremos muchos de los parámetros mostrados en la tabla para particularizar los modelos para el coche en estudio.

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 siguiente figura (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, mayor y más 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 cerca del maletero ya que es la parte que menos sufre en caso de accidente.

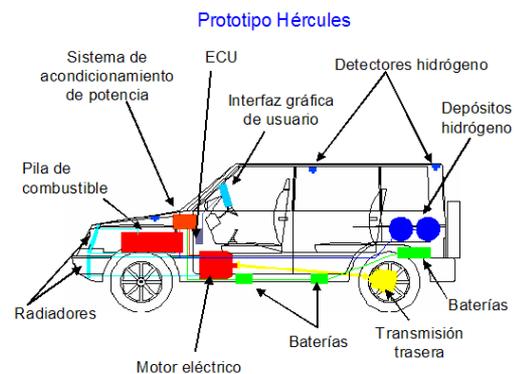


Figura 2: Esquema de los componentes del coche híbrido

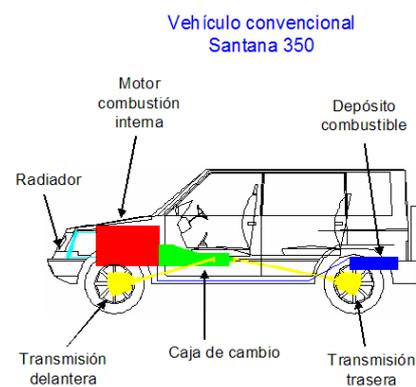


Figura 3: Esquema de los componentes del coche de propulsión inicial

3. MODELADO DEL SISTEMA

Como hemos comentado en secciones anteriores se va a proceder a realizar un 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.

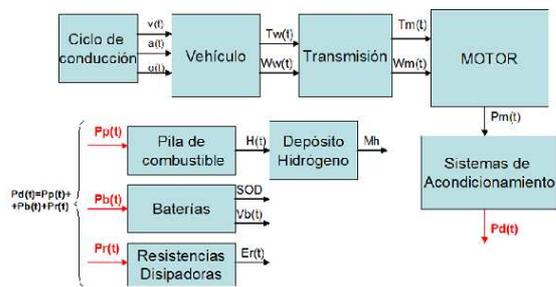


Figura 4: Esquema del modelo del sistema del coche

En la figura 4 podemos ver el diagrama de bloques del modelo del vehículo. Por una parte vemos el modelo del motor, junto con la transmisión y el chasis, y por la otra vemos la pila de combustible, el depósito de hidrógeno, las baterías y las resistencias de frenado. En los bloques podemos ver las entradas y salidas de cada uno de ellos, es bueno insistir que la orientación del modelo no es entrar en detalle en las variables internas de cada componente sino en mostrar una herramienta útil para poder simular controladores de más alto nivel que puedan gestionar las potencias entre los diferentes componentes. Vemos que el modelo de la primera parte que vamos a denominar como vehículo proporciona según un ciclo de conducción, la potencia necesaria para alimentar el motor y se alcanzan las velocidades requeridas para seguir el ciclo de conducción. Por otro lado, los demás componentes generadores y absorbedores de energía pueden dividirse en la pila, las baterías y las resistencias, las cuales dependiendo de la gestión de potencia van a reaccionar de una manera u otra, suministrando unos valores de las variables de interés que será además necesarias para poder diseñar el control supervisor.

3.1. CICLO DE CONDUCCIÓN

El bloque que denominamos, en la figura 4, ciclo de conducción, proporciona como podemos ver 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 lo consideramos plano, lo que el ángulo de inclinación va a ser igual a 0. También sería interesante estudiar un ciclo de conducción con una inclinación constante igual a la máxima que se requiere para los

turismos convencionales y comparar los resultados. En este último caso la potencia va a ser mucho mayor debido a que la fuerza de tracción sobre las ruedas tiene que poder compensar la inclinación y por ello la fuerza de 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.

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

Podemos diferenciar claramente dos tipos de ciclo de conducción que van a depender de si conducimos dentro de la ciudad o en autopista, la forma de las curvas van a ser totalmente diferente. En la siguiente gráfica mostramos un ciclo de conducción en ciudad.

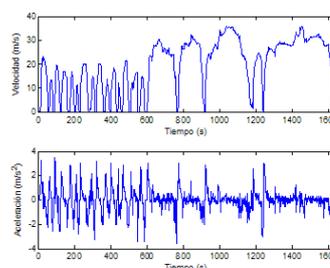


Figura 5: Ciclo de conducción en ciudad

Todos los ciclos de conducción que hemos utilizado para realizar las diversas simulaciones presentadas, han sido obtenidos del programa ADVISOR que es un toolbox para Matlab, creado para simular diferentes tipos de coches eléctricos. En la gráfica superior representamos la velocidad en (m/s), donde podemos observar que la primera parte tiene más paradas que en la segunda que puede que haya entrado en una vía rápida dentro de la ciudad. En la gráfica inferior mostramos las variaciones de la aceleración. Las aceleraciones son mucho más variables en la primera parte donde el coche para y arranca con más frecuencia. En la figura 6 representamos un ciclo de conducción por autopista junto con la aceleración que se obtiene dependiendo del tiempo. Observar como difiere la forma de las curvas lo que se traducirá a un comportamiento totalmente diferente de la sistema. Por lo que para optimizar el funcionamiento del sistema tanto en ciudad como en autopista habrá que estudiar la gestión de potencia para los dos tipos de ciclo de conducción.

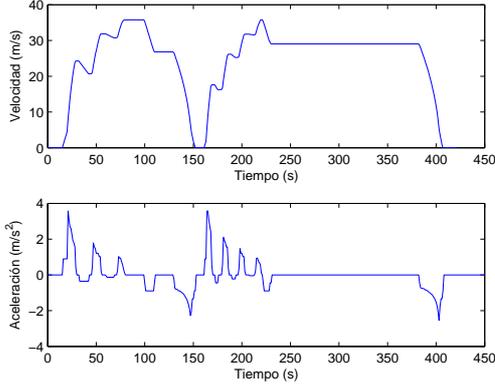


Figura 6: Ciclo de conducción en autopista

3.2. VEHÍCULO

Este bloque que podemos ver en la figura 4 se ha denominado vehículo y en él se calcula el par y la velocidad angular para que el vehículo con sus determinadas características de peso y demás pueda alcanzar el ciclo de conducción determinado. Por ello las entradas a este bloque son la velocidad lineal del vehículo dependiendo del tiempo, la aceleración dependiendo del tiempo para ese ciclo de conducción y por último la inclinación del terreno para el determinado ciclo de conducción [4]. Como hemos comentado anteriormente lo consideramos 0. En este bloque se calcula un balance de fuerzas en la rueda, que mostramos en las siguientes ecuaciones.

$$F_t(t) = m_v \cdot a_v(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \quad (2)$$

donde F_t es la fuerza de tracción en la rueda, m_v es la masa del vehículo, a_v es la aceleración lineal del vehículo, F_a es la fuerza de rozamiento aerodinámico, F_r es la fuerza de rozamiento y F_g es la fuerza de gravedad.

$$F_a(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v^2 \quad (3)$$

$$F_r = c_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha), v > 0 \quad (4)$$

$$F_g(\alpha) = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

donde c_d es el coeficiente aerodinámico que va a variar por muchos factores pero que en este caso vamos a considerarlo constante, A_f es el área frontal del vehículo, ρ_a es la densidad del aire atmosférico, c_r el coeficiente de rozamiento que al igual que el aerodinámico va a variar por muchos factores pero que en este estudio lo vamos a considerar constante, g es la aceleración de la

gravedad y por último α es la inclinación del terreno.

De estas ecuaciones obtenemos el par de tracción aplicado sobre la rueda y la velocidad angular.

$$T_w(t) = F_t(t) \cdot r_w \quad (6)$$

$$w_w(t) = \frac{v(t)}{r_w} \quad (7)$$

donde T_w es el par de tracción sobre las ruedas, r_w es el radio de la rueda y w_w la velocidad angular.

Estudiando el sistema real podemos extraer los parámetros del sistema para particularizar el modelo.

Cuadro 1: Parámetros del modelo del bloque vehículo

Parámetro	Valores
Masa del vehículo	1850kg
Coefficiente de rozamiento	0,011
Coefficiente aerodinámico	0,34
Radio de la rueda	0,35m
Área frontal	1,9765m ²

En la siguiente gráfica 7 presentamos los resultados de las simulaciones del bloque para el ciclo de conducción en ciudad.

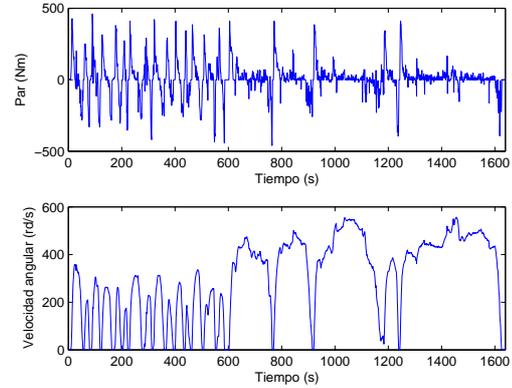


Figura 7: Par y velocidad angular de las ruedas para un ciclo de conducción en ciudad

En la figura 7 vemos la influencia que tiene sobre el par de tracción en las ruedas, la aceleración lineal del vehículo. En la gráfica inferior se muestran las velocidades angulares de las ruedas que están fuertemente influenciadas por el ciclo de conducción ya que conservan la misma forma pero escaladas.

3.3. TRANSMISIÓN

En el caso en estudio se ha eliminado la caja de cambio y a transmisión es directa. Las ecuaciones en este bloque relacionan el par y a velocidad angular de las ruedas con el par y la velocidad angular del motor, para ello hay un coeficiente denominado la constante de transmisión. Para los casos en los que se conserva la caja de cambios este coeficiente va a variar dependiendo de la marcha en la circule pero en el caso desarrolla sólo hay un coeficiente. De las especificaciones del motor, vemos que para una velocidad lineal del vehículo de unos 150km/h la velocidad de angular del motor es 6000rpm, de aquí deducimos este coeficiente fundamental para el modelo de la transmisión.

$$w_e = \frac{\gamma \cdot v(t)}{r_w} \quad (8)$$

donde w_e es la velocidad angular del motor y γ es el coeficiente de transmisión. De esta ecuación resulta que el coeficiente es igual a 5,427.

Las ecuaciones de la transmisión son las siguientes:

$$T_e(t) = \frac{T_w(t)}{\gamma} \quad (9)$$

$$w_e(t) = w_w(t) \cdot \gamma \quad (10)$$

donde T_e es el par en el motor y W_e es la velocidad angular en el motor. El par y la velocidad angular del motor tiene la misma forma que el par y la velocidad angular de las ruedas pero escalas por el coeficiente de transmisión como vemos en las ecuaciones, luego la relaciones entre el par y la aceleración y la velocidad angular y el ciclo de conducción se siguen manteniendo.

3.4. MOTOR

El bloque del motor calcula la potencia necesaria para seguir el ciclo de conducción suministrado para dicho motor funcionando en los dos modos en tracción y en generador en el caso del frenado regenerativo.

La potencia del motor viene determinada por el par y la velocidad angular de la siguiente manera, [4]:

$$P_e = T_e(t) \cdot w_e(t) \quad (11)$$

la potencia calculada es la potencia sin tener en cuenta las pérdidas por generación y estas pérdidas vienen dadas por las ecuaciones, (para el caso del motor en tracción)

- para $W_e > 2000\text{rpm}$

$$P_{perdidas} = 0,016 \cdot T_e^2 + 0,0082 \cdot w_e^{1,5} \quad (12)$$

- para $W_e \leq 2000\text{rpm}$

$$P_{perdidas} = 4,05 \cdot 10^{-9} \cdot T_e^2 \cdot w_e^2 + 0,0082 \cdot w_e^{1,5} \quad (13)$$

Luego la potencia demandada total por el motor viene determinada para el caso de tracción,

$$P_m = P_e + P_{perdidas} \quad (14)$$

En el caso generador, consideramos un rendimiento más pequeño y constante igual a 0.8

$$P_m = P_e \cdot \mu \quad (15)$$

En las siguientes gráficas 8 y 9 mostramos la potencia demandada por el motor para seguir los distintos ciclos de conducción estudiados. Podemos observar que el caso de la ciudad la demandad de potencia por el motor es más fluctuante que en caso de la circulación en autopista. La influencia de la aceleración es claramente predominante en las formas de las potencias demandadas.

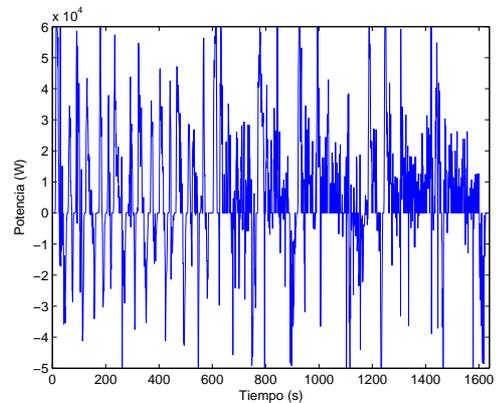


Figura 8: Potencia del motor para un ciclo de conducción en ciudad

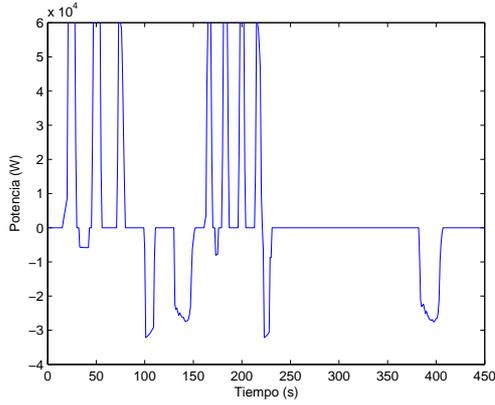


Figura 9: Potencia del motor para un ciclo de conducción en autopista

3.5. SISTEMAS DE ACONDICIONAMIENTO

Sabemos que el sistema de acondicionamiento van a tener unas pérdidas de potencia debido a que los elementos de los circuitos no son ideales y tienen unas pérdidas debidas al calentamiento, etc... el modelo de estos sistemas de acondicionamiento va a considerarse como un simple rendimiento que se considera ser 0.95.

$$P_{bus,DC} = \frac{P_m}{\mu_c} \quad (16)$$

La potencia demandada directamente a los sistemas de suministro de potencia va a superior a la que demanda el motor pero con la misma forma que éste, simplemente que estará escalado.

3.6. PILA DE COMBUSTIBLE

La pila de combustible se va a modelar de forma quasi-estáticamente, no considerando las dinámicas internas de la pila, [3]. Por ello la pila se va a caracterizar por una curva de polarización que dará el fabricante que relaciona la intensidad demandada a la pila y la tensión. Por otro lado la salida significativa de la pila de combustible para el control supervisor es la cantidad de hidrógeno consumido ya que se intentará minimizar con diferentes estrategias. Se supone que la pila contiene un controlador embebido que la controla perfectamente y que hace que funcione óptimamente en cada punto de operación.

La entrada a este modelo será la potencia demandada a la pila y la salida será el consumo de hidrógeno.

las ecuaciones que modelan estas relaciones son las siguientes:

$$i_{st}(t) = \frac{P_{pila}(t)}{v_{st}(t) - 1} \quad (17)$$

$$h(t) = m_{H_2} \cdot n \cdot \frac{i_{st}(t)}{2 \cdot F} \quad (18)$$

$$v_{st}(t) = f(i_{st}) \quad (19)$$

donde i_{st} es la intensidad demandada a la pila, v_{st} es el voltaje suministrado por la pila, m_{H_2} es la masa molar del hidrógeno en kg, n es el número de células, F es la constante de Faraday y la función f es la curva de polarización que se presenta en la figura 10.

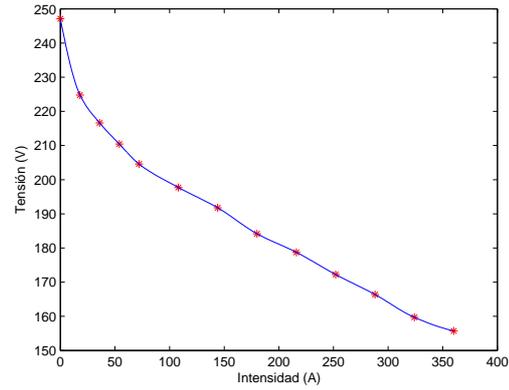


Figura 10: Curva de polarización de la pila de combustible

También es interesante mostrar la curva que representa el caudal de hidrógeno consumido $h(t)$ en relación con la potencia demandada a la pila.

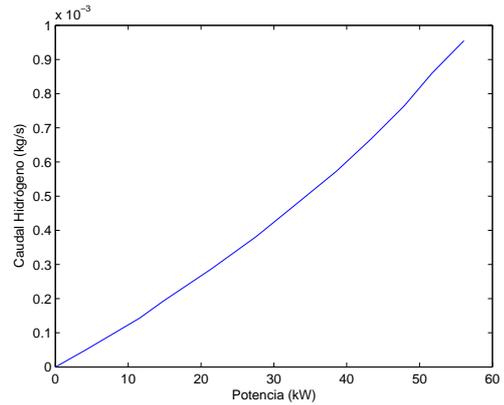


Figura 11: Caudal de consumo de hidrógeno de la pila de combustible

3.7. DEPÓSITO DE HIDRÓGENO

El depósito de hidrógeno es necesario de ser modelado puesto que va a ser una restricción física del

sistema, no va a poder consumir más hidrógeno que el que haya en el tanque, luego es importante cuantificar la cantidad de hidrógeno que se consume y la que queda en el tanque. El valor máximo de hidrógeno que se puede almacenar es 2.4 luego la ecuación que modela el depósito es la siguiente:

$$m(t) = m_0 - \int_0^t h(s)ds \quad (20)$$

donde $m(t)$ es la cantidad de hidrógeno que queda en el depósito en kg en el instante t y m_0 es la cantidad de hidrógeno que hay al inicio de la conducción en el tanque expresado en kg.

3.8. BATERÍAS

Las baterías han sido modeladas según las siguientes ecuaciones que son particulares para el caso de que las baterías son de ion-litio [?]. Teniendo en cuenta que la entrada al modelo es la potencia demandada a la pila y que las salidas son el estado de descarga (SOD) y el voltaje de la batería.

$$i(t) = \frac{P_{bateria}}{v(t-1)\dot{n}_{bateria}} \quad (21)$$

$$E(i(t), T(t), t) = v(i(t), T(t), t) - R_{int} \cdot i(t) \quad (22)$$

$$v(i(t), T(t), t) = \sum_{k=0}^n c_k \cdot SOD^k(i(t), T(t), t) + \Delta E(T) \quad (23)$$

$$SOD(i(t), T(t), t) = SOD_0 + \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha(i(t)) \cdot \beta(T(t)) \cdot i(t) dt \quad (24)$$

donde $E(i(t), T(t), t)$ es el potencial de equilibrio en voltios, R_{int} es la resistencia interna, $v(i(t), T(t), t)$ es la tensión de la batería, $i(t)$ es la intensidad demandada a la pila que va a ser positiva en el caso en que la pila está descargándose es decir dando potencia al sistema o por el contrario negativa en el caso en el que la batería se está cargando. c_k son los coeficientes del polinomio que ajusta la curva de descarga para una intensidad de descarga constante. $\Delta E(T)$ es un coeficiente que compensa las variaciones del potencial de equilibrio debido a la variación de la temperatura. $\alpha(i(t))$ es el coeficiente que compensa las variaciones de las curvas de descarga respecto de la referencia que se ha tomado cuando varía la intensidad. $\beta(T(t))$ compensa las variaciones en la curva de descarga respecto de la de referencia cuando varía la temperatura. Q_r es la capacidad

en Ah. $SOD(i(t), T(t), t)$ es el estado de descarga de la batería. $n_{bateria}$ es el número de baterías conectadas en serie.

En la siguiente figura mostramos la curva de referencia y el polinomio que ha sido ajustado para poder obtener los coeficientes de las ecuaciones. La curva de descarga la suministra el fabricante junto con todas las especificaciones de las baterías como hemos presentado en la sección anterior.

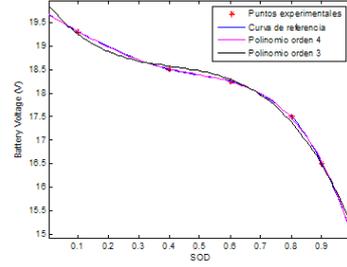


Figura 12: Curva de descarga de referencia para una intensidad de 70A

Las ecuaciones térmicas de la batería también han sido necesariamente implementadas,

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = i(t)^2 \cdot R_1 + \frac{1}{R_2} (v(t) + E(i(t), T(t), t) + i(t) \cdot R_1)^2 - h_c \cdot A \cdot (T(t) - T_a) \quad (25)$$

donde m es la masa de la batería, c_p es el calor específico, R_1 y R_2 son las componentes de la R_{int} , h_c es el coeficiente del calor intercambiado, A es el área de intercambio lateral de la batería y T_a es la temperatura ambiente.

Las constantes α , β y ΔE pueden ser calculadas a partir de las curvas de descarga que suministra el fabricante y que hemos presentado en la sección anterior. Estos coeficientes están tabulados dependiendo de la intensidad en el caso de α y de la temperatura para el resto.

Las ecuaciones que modelan las pérdidas internas de la baterías se han obviado para simplificar el modelo.

Las siguientes figuras muestran algunas gráficas del modelo, las primeras la carga de la batería con la intensidad recomendada de 30A y dura 2.5hrs igual que las especificaciones comentadas, luego podemos validar el estado de carga. El estado de descarga con una intensidad constante a 70A simula la misma curva que el fabricante suministra como vemos en la figuras.

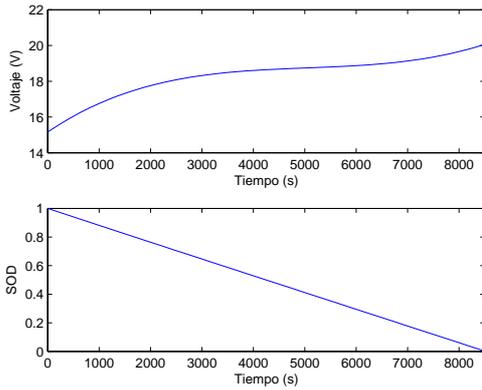


Figura 13: Curva de de carga a intensidad 30A

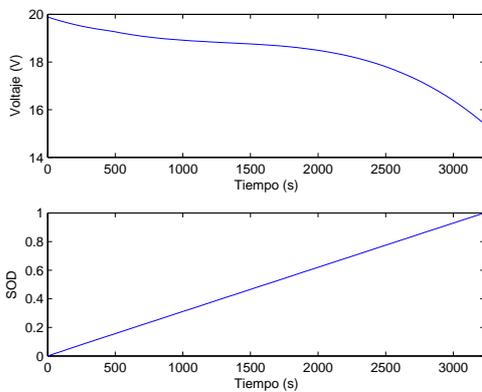


Figura 14: Curva de de descarga a intensidad 70A

3.9. RESISTENCIAS DE FRENADO

Este bloque simplemente toma la potencia que las baterías no han podido almacenar en el frenado regenerativo. En este bloque se calcula cual es la energía que ha sido desperdiciada según la siguiente ecuación.

$$E_{desperdiciada} = \int_0^t P_{resistencia}(s)ds \quad (26)$$

De esta manera podemos cuantificar cual es la eficiencia del sistema total cuando se implemente un controlador que gestione la potencia.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un modelo quasi-estático de cada uno de los componentes del sistema de potencia híbrido de un coche propulsado por pilas de combustible PEM. El modelo se está ampliando para incluir la dinámica de los arranques y paradas de la pila de combustible que

son muy importantes de tener en cuenta en la operación de las pilas de combustible.

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 L. Amstutz, “CAE tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrain”, *IEEE transactions on vehicular technology, vol 48, no 6, November 1999*
- [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*