

Control Difuso de un Tranvía Híbrido Propulsado por Pila de Combustible, Batería y Supercondensador

Pablo García^a, Luis M. Fernández^a, Juan P. Torreglosa^b, Francisco Jurado^{b,*}

^a Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Cádiz, EPS de Algeciras, Avda. Ramón Puyol, s/n, 11202, Algeciras (Cádiz), España

^b Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Jaén, EPS de Linares, C/ Alfonso X El Sabio, 28, 23700, Linares (Jaén), España

Resumen

El presente artículo se centra en la descripción de un nuevo sistema de gestión de energía para un nuevo tranvía, en la ciudad de Zaragoza (España), propulsado mediante pila de combustible de hidrógeno, como fuente principal de energía, y batería de ión-litio y supercondensador, como fuentes secundarias y de almacenamiento de energía. En la nueva configuración para este tranvía, la batería apoya a la pila de combustible durante los arranques y absorbe la potencia disponible durante las desaceleraciones y frenadas. Por su parte, el supercondensador, al ser el elemento de respuesta dinámica más rápida, actúa principalmente durante los picos de potencia, en los que ni la pila ni la batería son capaces de trabajar. El nuevo sistema de control y de gestión de la energía está basado en lógica difusa, siendo éste el encargado de generar la potencia de referencia en la pila y la variación de la potencia a intercambiar por parte de la batería. En el caso del supercondensador, un control en cascada formado por dos lazos de control ha sido utilizado para poder mantener constante la tensión del bus de continua. Las simulaciones, realizadas todas ellas bajo la plataforma MATLAB-Simulink® y utilizando el ciclo de trabajo real del actual tranvía, muestran como el nuevo sistema de control y gestión de la energía es perfectamente válido para su aplicación en este sistema híbrido. Copyright © 2012 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Vehículos híbridos, sistema de gestión de energía, almacenamiento de energía, lógica difusa, convertidores.

1. Introducción

Hoy en día, son múltiples los vehículos alternativos y combustibles propuestos como posibles soluciones a la amenaza del cambio climático, la polución del aire urbano y la alta dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte. Un ejemplo claro de la importancia de este sector en el problema global del cambio climático y la dependencia de los combustibles fósiles es Estados Unidos, donde el sector del transporte produjo un 28 % de todas las emisiones de gases de efecto invernadero del país, un 34 % de las emisiones totales de dióxido de carbono y un 68 % del consumo de combustibles fósiles (Davis *et al.*, 2007). Estos datos ponen manifiesto la necesidad de cambiar esta cultura de un transporte basado en petróleo, si se quiere alcanzar la meta de una reducción del 80 % de las emisiones de gases efecto invernadero (por debajo de los niveles del año 1990).

Existen varios estudios que analizan el comportamiento de distintos vehículos (híbridos con motor de combustión y eléctrico o completamente eléctricos) durante un período de tiempo

determinado, en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, polución del aire, costes y consumo de combustible (Ruselowski *et al.*, 2001), (Brinkman *et al.*, 2005), (Edwards *et al.*, 2007), (Kromer and Heywood, 2007). De estos estudios se puede concluir que la introducción de los vehículos parcialmente eléctricos y el uso de biocombustibles se posicionan como soluciones para hacer frente a los problemas citados anteriormente. Pero si se quiere conseguir la reducción del 80 % de los gases de efecto invernadero, eliminar las importaciones de combustibles fósiles y reducir la polución, debe producirse una transición hacia vehículos completamente eléctricos impulsados por alguna combinación de pilas de combustible (en inglés, fuel cell, FC) y baterías (Sandy Thomas, 2009). La transición sugerida a este tipo de vehículos sería escalada, iniciándose en vehículos híbridos hasta llegar a los totalmente eléctricos con el tiempo.

Un sector susceptible de iniciar dicha transición es el del transporte público. En este sentido, el tranvía, llamado *Urbos 3*, actualmente en pruebas en la ciudad de Zaragoza (España), funciona como un tranvía con supercondensadores (SC). Los SC proporcionan la energía al tranvía en el trayecto entre las paradas,

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: pablo.garcia@uca.es (Pablo García),
luis.fernandez@uca.es (Luis M. Fernández),
jptorreglosa@ujaen.es (Juan P. Torreglosa),
fjurado@ujaen.es (Francisco Jurado).

siendo cargados mediante la recuperación de la energía de frenado y la conexión a la red eléctrica en las paradas. En este artículo, se presenta una posible configuración y sistema de control para conseguir que dicho tranvía sea propulsado de forma totalmente independiente de las actuales conexiones a red en cada parada. El sistema híbrido propuesto para el tranvía se compone de una pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM-FC, en inglés, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) como fuente principal de energía, y de baterías y SC como dispositivos de almacenamiento de energía durante las desaceleraciones o frenadas, y que apoyan a la pila de combustible (caracterizada por su lenta respuesta dinámica) durante los arranques o aceleraciones. Para la adecuada gestión de energía del sistema híbrido se propone el uso de un sistema de control basado en lógica difusa.

Este artículo se organiza como se explica a continuación. En la sección 2 se exponen las características del tranvía y su ciclo de trabajo. En la sección 3 se describe la configuración propuesta para el sistema híbrido del tranvía y su modelado. En la sección 4 se explica el funcionamiento del sistema de gestión de la energía diseñado. Por último, en las secciones 5 y 6 se describen, respectivamente, las simulaciones realizadas y las conclusiones que se derivan de ellas.

2. Descripción del Tranvía

Urbos 3 es un tranvía cuya primera línea proyectada sigue un eje norte-sur entre Valdespartera y Parque Goya, atravesando el centro de la ciudad de Zaragoza. Consta de 25 paradas (23 con andenes laterales y 2 con andén central), separadas entre sí aproximadamente 500 m. La longitud total de esta línea es de 12,8 km, recorridos a una velocidad comercial de 21 km/h. Actualmente, dos *Urbos 3* simulan el servicio comercial. Las dos unidades que han completado un mayor número de pruebas simulan actualmente un servicio comercial entre las paradas 21 (Olvidados) y 25 (Mago de Oz).

El tranvía se compone de unidades bidireccionales con cinco cuerpos articulados descansando en tres “bogies”. Dos de estas unidades son motoras y la otra es un tráiler. Puede desarrollar 70 km/h (12 km/h de promedio) con una capacidad máxima de 275 plazas.

El modelo *Urbos 3* (CAF, 2011a), desarrollado por la empresa española Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF), utiliza el sistema con acumulador de carga rápido (sistema ACR), que acumula en unos SC la energía suficiente como para llegar de una parada a la siguiente (CAF, 2011b). La energía de los SC se carga a través de la recuperación de la energía de frenado y la conexión a la red eléctrica en las paradas.

La curva típica de Potencia-Velocidad, grabada durante la ruta entre las paradas 21 y 25, se muestra en la figura 1. Esta curva puede ser considerada el punto de partida para el diseño del sistema híbrido del tranvía. La potencia de la pila de combustible debe ser ligeramente mayor que los requisitos medios de potencia y evitar, junto a la potencia regenerativa, sobrepasar la máxima potencia que pueden absorber los dispositivos de almacenamiento. Por otro lado, estos requisitos dependen de los roles específicos que juegan las fuentes de energía en la estrategia de control planteada para el sistema híbrido. Teniendo en cuenta estas dos premisas, y después de considerar varios escenarios de simulación, se ha optado por una pila de combustible PEM de 150kW, una batería de ión-litio de 100Ah y un banco de SC con una capacidad total de 12.5 F.

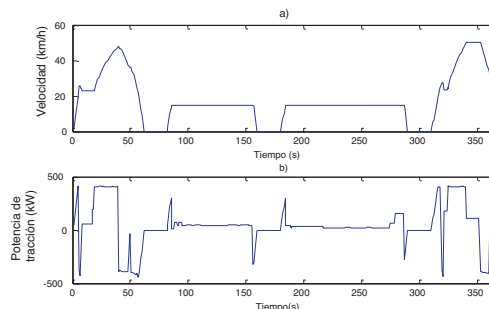


Figura 1: a) Velocidad del tranvía y b) potencia de tracción demandada por el tranvía durante un trayecto completo de ida y vuelta.

3. Sistema Híbrido Propuesto para el Tranvía

La figura 2 muestra la configuración propuesta para el sistema híbrido del tranvía. Este sistema híbrido está formado por los siguientes elementos: 1) pila de combustible; 2) batería; 3) SC; 4) convertidores de potencia CC/CC; 5) módulo de servicios auxiliares; 6) sistema de tracción formado por cuatro motores de CA; 7) resistencia de frenado; y 8) sistema de gestión de energía.

La pila de combustible es la fuente principal de energía del tranvía, siendo capaz de generar potencia de forma continua. La pila está conectada a un convertidor elevador de tensión CC/CC, el cual adapta la tensión de salida de la pila a la tensión de estándar del bus de continua.

Por otra parte, una batería recargable de litio y un SC son utilizados como sistemas de almacenamiento y apoyo de energía.

La batería se utiliza para proporcionar un suplemento de potencia durante las aceleraciones y para almacenar energía durante las desaceleraciones y frenadas.

Por su parte, el SC, debido a su rápida respuesta dinámica (Bauman and Kazerani, 2008), es utilizado para mantener constante la tensión del bus de continua y para generar o almacenar los picos de potencia que ni la pila ni la batería pueden gestionar.

La potencia demandada por el tranvía procede del sistema de tracción del vehículo y del sistema de servicios auxiliares. Finalmente, el sistema de gestión de energía es el encargado de determinar y controlar la potencia a intercambiar por cada fuente de energía (pila de combustible, batería y SC).

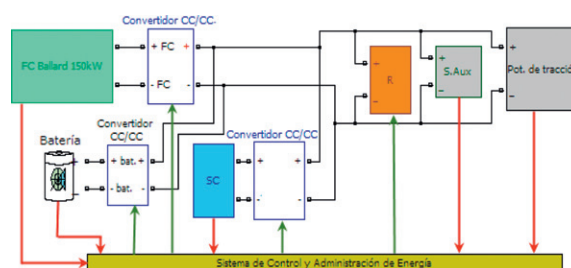


Figura 2: Configuración propuesta para el nuevo sistema híbrido de tranvía

3.1. Pila de combustible PEM

Debido a factores tales como su alta densidad de potencia, potencia específica, baja temperatura de funcionamiento, eficiencia y relativa facilidad ante cambios en la potencia demandada (Hoogers, 2003), (Emadi *et al.*, 2009), la pila de

combustible con membrana de intercambio de protones (PEM) es la mejor opción entre los distintos tipos de pila de combustible para su aplicación en el sector del transporte. Por esta razón, en este trabajo se ha elegido una pila de combustible comercial del fabricante Ballard (Ballard, 2011), con una potencia nominal de 150 kW a 621V.

El modelo de pila de combustible utilizado corresponde a un modelo reducido obtenido a partir del modelo completo descrito en (Pukrushpan *et al.*, 2002). Las aptitudes de este modelo reducido así como su mejora en tiempo de computación aparecen demostradas en (García *et al.*, 2010a). Además este mismo modelo también ha sido utilizado para la evaluación de otras estrategias de control en (García *et al.*, 2010b) y en (Fernández *et al.*, 2010). En este modelo, la tensión de salida generada por la pila, V_{cells} , es obtenida a partir de la suma de la tensión de Nernst y de las caídas de tensión por activación, óhmicas y concentración, siendo todas ellas función de la densidad de corriente de la pila (García *et al.*, 2010a), (García *et al.*, 2010b). La presión parcial de hidrógeno en el ánodo y del oxígeno en cátodo son calculadas mediante la ley de conservación de masas y la ley de gases ideales. Además, una válvula situada aguas arribas del ánodo controla el caudal de entrada de hidrógeno, con el objetivo de minimizar las presiones entre el ánodo y el cátodo (Pukrushpan *et al.*, 2002), (Padullés *et al.*, 2000). En la figura 3 se muestra la curva estática de polarización del modelo comercial de pila de combustible utilizada y la obtenida a partir del modelo reducido de pila de combustible implementado en este trabajo.

Otros componentes que forman parte del modelo son el compresor, el humidificador y el intercambiador de calor. El compresor es el responsable de controlar el oxígeno entrante al cátodo. Éste se modela mediante un modelo reducido y controlado de forma que se mantenga constante la relación entre el oxígeno entrante y consumido en el cátodo (λ_{O_2}) (Pukrushpan *et al.*, 2002) igual a 2.5, en el caso de la pila comercial utilizada en este estudio. Además, el humidificador y el intercambiador de calor son considerados ideales, ya que la pila trabaja a su temperatura óptima de funcionamiento (80 °C) con una humedad relativa constante (Pukrushpan *et al.*, 2002).

Finalmente, la eficiencia global del sistema de pila de combustible (conjunto formado por la propia pila y por el compresor) se puede expresar mediante la siguiente expresión (Corbo *et al.*, 2005):

$$\eta_{FCS} = \frac{\int_{cycle} P_{FC,N} dt}{\int_{cycle} P_{H_2} dt} \quad (1)$$

donde $P_{FC,N}$ es la potencia neta de salida del sistema de pila de combustible (potencia generada por la pila menos la potencia absorbida por el compresor, $P_{FC,T}$) y P_{H_2} es la potencia teórica asociada al caudal consumido por la pila.

$$P_{H_2} = \frac{P_{FC,T}}{\eta_{term}\eta_{util}\eta_{FC}} \quad (2)$$

siendo η_{term} la eficiencia termodinámica de la pila (0.98 a 298K), η_{util} el factor de utilización de la pila definido como la relación entre el caudal de hidrógeno consumido por la pila y el entrante al ánodo, mientras que η_{FC} es la eficiencia interna de la pila (relación entre la tensión de salida y la tensión estándar reversible de la misma).

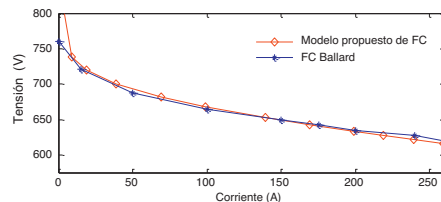


Figura 3: Curva estática de polarización de la pila de combustible Ballard de 150kW y del modelo reducido de la pila de combustible utilizada en este artículo.

3.2. Batería

En el sistema de tranvía híbrido descrito en este artículo se han elegido baterías de ión-litio, cuyos parámetros característicos se obtuvieron a partir de los datos reales de un módulo comercial, ThunderSky LFP90AHA de 90 Ah de capacidad (Winston Battery Limited, 2011). Esta batería ha sido diseñada específicamente para su uso en aplicaciones de transporte y actualmente está siendo usada en coches y autobuses urbanos eléctricos, entre otros vehículos.

Esta batería ha sido modelada a partir del modelo de batería incluido en SimPowerSystems (The MathWorks, 2011), donde se han utilizado los parámetros reales de dicha batería comercial.

En la figura 4 se muestra la comparación de la curva característica de descarga para una demanda constante de 90 A del modelo utilizado en este trabajo y los datos obtenidos de la curva real de la batería. Se aprecia claramente que el modelo ajusta fielmente los datos reales salvo en el tramo final. Dicho tramo equivale a la batería casi descargada por completo, situación que se va a evitar mediante el control propuesto y, por tanto, no es necesario que el modelo tenga que reproducir durante las simulaciones. Por tanto, se considera que el modelo es perfectamente válido para los propósitos de este artículo.

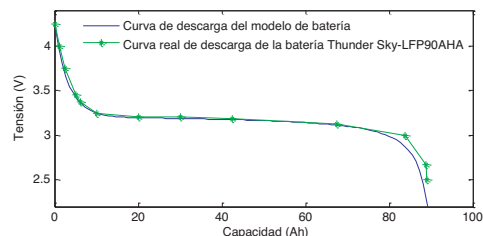


Figura 4: Comparación de la curva de descarga real y del modelo a 90 A.

En este trabajo, se han considerado 340 módulos en serie, de manera que la batería resultante presenta una capacidad de 90 Ah y una tensión nominal de 1360V. A continuación se describen las ecuaciones del modelo de esta batería.

La tensión de la batería puede ser expresada como:

$$U_{bat} = E_{bat} - R_i \cdot I_{bat} \quad (3)$$

donde U_{bat} es la tensión en la batería, E_{bat} es la tensión a circuito abierto, I_{bat} es la intensidad de la batería, y R_i es la resistencia interna de la batería, que se asume constante durante los procesos de carga y descarga, y tampoco varía con la magnitud de la intensidad.

La tensión a circuito abierto de la batería durante la carga y descarga depende de la intensidad de la batería, su capacidad, y el fenómeno de histéresis durante los procesos de carga y descarga.

Puede ser calculada como sigue:

$$E_{batdisc} = E_o - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + f_{hyst_disc}(i) \quad (4)$$

$$E_{batchar} = E_o - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + f_{hyst_char}(i) \quad (5)$$

donde E_o es la tensión constante, K es la constante de polarización o la resistencia de polarización, i^* mide la dinámica de la intensidad en baja frecuencia, i es la intensidad de la batería, it es la capacidad extraída, Q es la capacidad máxima de la batería, y $f_{hyst_char}(i)$ y $f_{hyst_disc}(i)$ son funciones de la intensidad de la batería, las cuales representan los fenómenos de histéresis de ésta durante la carga y descarga.

3.3. Supercondensador

Un análisis de los requisitos de potencia en vehículos híbridos y de la literatura relacionada (Ehsani et al., 2005) muestra que los perfiles de potencia que se esperan aplicar a los SC están compuestos de frecuentes pulsos de carga y descarga. Estos pulsos de carga y descarga se caracterizan por altos niveles de intensidad, hasta los 600 A, y una duración entre decenas de milisegundos a decenas de segundos.

Respecto a su modelado, se pueden diferenciar tres enfoques de modelado: modelo matemático (Weidner and Srinivasan, 1999) (Sikha et al., 2005), modelo de circuito eléctrico (Nelms et al., 2000) (Lisheng Shi and Crow, 2008), y modelos de circuitos no eléctricos, como por ejemplo el modelado mediante redes neuronales (Marie-Francoise et al., 2006). Cada enfoque tiene sus propias ventajas e inconvenientes. El modelado matemático incluye complicados cálculos y requiere demasiados parámetros que deben ser identificados experimentalmente. Además, el modelo matemático no suele tener un significado físico explícito y no puede conectarse a un circuito de manera inmediata. Los modelos de circuitos no eléctricos tienen similares inconvenientes. En este artículo se va a utilizar un modelo eléctrico de SC, concretamente el modelo clásico formado por una resistencia R (la cual modela las pérdidas óhmicas del SC), llamada habitualmente resistencia serie equivalente (ESR, del inglés “Equivalent Series Resistor”), y un condensador C , el cual simula la capacidad del SC durante los procesos de carga y descarga. Comparando resultados de simulación de este modelo y experimentales (Zubieta and Boner, 2000), puede comprobarse que el modelo clásico tiene múltiples ventajas. La primera ventaja es la simplicidad del modelo. Además es fácil incorporarlo a un circuito, el proceso de simulación es computacionalmente sencillo y sus dos parámetros (R y C) son fácilmente identificables en catálogos comerciales.

Como se ha comentado anteriormente, los SC se utilizan en vehículos híbridos para suministrar los picos de potencia en combinación con otras fuentes de energía. En este caso para lograr ese objetivo se ha elegido como SC el módulo de Maxwell BMOD0063-P125de 125 V y una capacidad de 63 F (Maxwell Technologies, 2011). Este módulo está diseñado específicamente para aplicaciones de transporte pesado como autobuses, trenes eléctricos, tranvías, grúas, entre otros. En la figura 5 se muestra la comparación entre los datos reales de descarga de dicho módulo y los del modelo seleccionado para diferentes cargas. Se puede observar como el modelo se adapta suficientemente bien a las curvas de descarga (mejor en el caso de bajas demandas) pero no

refleja el comportamiento no lineal al final de cada curva. La estrategia de control se ha diseñado para que en ningún caso los SC lleguen a la descarga total por lo que, debido a que ese tramo nunca se va a utilizar, se considera el modelo válido.

En total, se han considerado 9 módulos de SC organizados en tres ramas en paralelo de tres SC en serie en cada una.

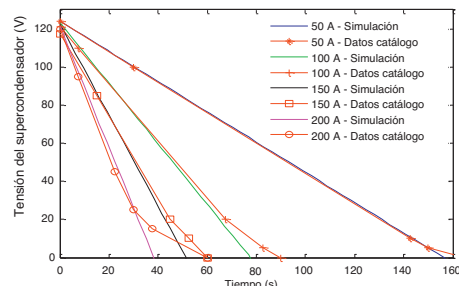


Figura 5: Curvas de descarga del modelo frente a datos reales obtenidos de catálogo.

3.4. Convertidores CC-CC

Las tensiones de las distintas fuentes de energía del sistema híbrido varían con la carga demandada por la carga. En el caso de las baterías y los SC, su tensión va a depender del estado de carga que tengan. Por eso, se necesita un sistema de electrónica de potencia para procesar la potencia de salida (a tensiones variables) de las fuentes de energía, proporcionando potencia a la carga a una tensión constante en el bus de continua. Específicamente, el sistema de electrónica de potencia utilizado consta de un convertidor CC/CC por cada fuente de energía, basados en conmutación por ancho de pulso (Kazmierczuk, 2008) (PWM, del inglés “Pulse Width Modulation”), y que realiza la interconexión con el bus de continua, desde el cual se alimentan los equipos auxiliares y al conjunto inversor que alimenta al sistema de tracción del tranvía.

La pila de combustible está conectada al bus de continua a través de un convertidor elevador unidireccional CC/CC, por lo que la energía sólo puede fluir desde la pila a la carga. En el caso de batería y SC, se utiliza un convertidor elevador bidireccional CC/CC para su conexión al bus de continua. Esta configuración permite la transmisión de energía en ambas direcciones, desde batería y SC a la carga, y viceversa.

El sistema de gestión de energía descrito posteriormente se basa en actuar sobre el ciclo de trabajo de los convertidores para gestionar la demanda de energía.

El convertidor de los SC es controlado para regular la tensión del bus de continua (regulación de tensión del bus de continua) y tratar de mantenerla en su tensión nominal. El convertidor de las baterías es controlado para mantener a los SC en un determinado estado de carga (regulación de tensión de los SC). Por último, el convertidor de la pila es controlado para mantener un determinado estado de carga en las baterías (regulación de tensión de las baterías).

3.5. Sistema de tracción y servicios auxiliares

Según se ha comentado previamente, la demanda de potencia por parte del tranvía proviene de los servicios auxiliares (57.47kW) y del sistema de tracción del mismo (Fig. 2).

Debido a que el objetivo de este artículo reside en el sistema

de gestión de la energía del tranvía híbrido, ambas cargas son modeladas como fuentes de corriente conectadas al bus de continua, cuya corriente es función de la potencia consumida y de la tensión del bus de continua.

3.6. Resistencia de frenado

La actual configuración del tranvía presenta una resistencia de frenado para poder disipar el exceso de energía durante un frenado o fuerte desaceleración.

En la configuración propuesta para el tranvía híbrido, esta resistencia de frenado se ha mantenido, pero actuando menos ocasiones. De esta forma, según se apreciará más adelante ésta sólo actuará cuando ni la batería ni el SC pueden absorber la potencia disponible durante un frenado o desaceleración.

4. Sistema de Gestión de Energía Propuesto

El sistema de gestión de energía (SGE) propuesto en el presente trabajo está formado por: 1) un control basado en lógica difusa para el caso de los convertidores de la pila y de la batería; y 2) un lazo de control en cascada para el caso del convertidor del SC. En conjunto, este nuevo SGE permite generar en todo momento la potencia demandada por el tranvía, controlando el estado de carga (en inglés, “state-of-charge”, SOC) de la batería y del SC. La tabla 1 presenta el valor de los principales parámetros de control que se han considerado.

Las estrategias de control mediante lógica difusa han sido aplicadas en numerosos campos, desde el control de señales, procesado de las mismas, comunicaciones, fabricación de circuitos integrados, hasta incluso en el sector de la medicina, etc. Sin embargo, la aplicación más significativa se ha centrado en la resolución de problemas de control.

Tabla 1. Principales parámetros del SGE propuesto

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|---------------------|---------|-----------------|--------|
| $P_{FC,max}$ | 145 kW | τ_{bat} | 0.3 s |
| $P_{FC,min}$ | 12.5 kW | $I_{sc,des}$ | 400 A |
| $\Delta P_{fc,max}$ | 60 kW/s | $I_{sc,car}$ | -400 A |
| $I_{bat,max}$ | 460 A | τ_{sc} | 0 s |
| $I_{bat,min}$ | -500 A | $SOC_{bat,ref}$ | 65 % |
| $I_{bat,des}$ | 460 A | $SOC_{sc,ref}$ | 75 % |
| $I_{bat,car}$ | 500 A | $V_{bus,ref}$ | 750 V |

Respecto a los vehículos híbridos, numerosas técnicas de gestión y control de energía han sido estudiadas y desarrolladas por varios autores, como por ejemplo (Gao et al., 2008) y (Li and Liu, 2009). De entre todas ellas, el control basado en lógica difusa es el que mejor se ha posicionado para su aplicación en los vehículos híbridos, debido a su independencia de un planteamiento completo matemático. Así, este tipo de control es utilizado por (Erdinc et al., 2008) y (Erdinc et al., 2009) para una configuración de sistema híbrido compuesto por pila de combustible, batería y SC. En estos artículos, al igual como se ha considerado en el presente trabajo, la eficiencia total del sistema es el principal objetivo del control.

4.1. Control basado en lógica difusa

El control difuso implementado en este trabajo presenta tres entradas y dos salidas. Las entradas son el estado de carga de la

batería y del SC y la potencia total demandada por el sistema. Las salidas del control son la potencia de referencia neta a generar por el sistema de pila de combustible y la variación de potencia a generar por parte de la batería. Con este control se pretende generar la potencia demandada por el tranvía, manteniendo el estado de carga de la batería y del SC próximo a sus valores de referencia (65% y 75%, respectivamente) y haciendo que la pila trabaje dentro de su rango de funcionamiento permitido.

En la tabla 2 se muestra un resumen de las reglas lógicas que se han utilizado para cada uno de los cinco casos en los cuales se puede encontrar la potencia demandada por parte del tranvía. Estos casos serían: N, potencia demandada negativa (negative); NS, potencia negativa pequeña (negative small); PS, potencia positiva pequeña (positive small); P, potencia positiva (positive) y PB, potencia positiva grande (positive big). De esta forma, dependiendo del caso en el que se encuentre la potencia demandada y el estado de carga de la batería y del SC, se ha definido una potencia de referencia en la pila y una variación de potencia en la batería.

Tabla 2. Reglas del control difuso

| N | SOC uc | | | | | |
|---------|--------|-------|-----|-------|-----|-------|
| | S | | M | | B | |
| | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat |
| SOC_bat | S | M | NS | S | NS | NB |
| | M | S | NS | S | NS | NS |
| | B | S | NS | S | NS | NS |

| NS | SOC uc | | | | | |
|---------|--------|-------|-----|-------|-----|-------|
| | S | | M | | B | |
| | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat |
| SOC_bat | S | M | NS | S | NS | NS |
| | M | S | M | S | NS | NS |
| | B | S | M | S | M | NS |

| PS | SOC uc | | | | | |
|---------|--------|-------|-----|-------|-----|-------|
| | S | | M | | B | |
| | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat |
| SOC_bat | S | B | M | M | NS | M |
| | M | M | M | M | M | M |
| | B | S | PS | S | PS | M |

| P | SOC uc | | | | | |
|---------|--------|-------|-----|-------|-----|-------|
| | S | | M | | B | |
| | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat |
| SOC_bat | S | B | M | M | M | M |
| | M | M | PS | M | M | M |
| | B | M | PS | S | PS | PS |

| PB | SOC uc | | | | | |
|---------|--------|-------|-----|-------|-----|-------|
| | S | | M | | B | |
| | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat | Pfc | ΔPbat |
| SOC_bat | S | B | PS | M | PS | M |
| | M | B | PS | M | PS | M |
| | B | M | PS | S | PB | PS |

En la figura 6 se muestran las funciones de pertenencia de cada variable de entrada y salida del sistema. Para la potencia demandada por el tranvía se ha optado por las cinco funciones de pertenencia comentadas, que abarcan el rango completo de la potencia solicitada. En el caso del SOC de la batería y del SC se han considerado tres funciones de pertenencia: S, pequeño (small); M, mediano (medium); y B, grande (big). Respecto a la potencia de referencia de la pila de combustible, se ha considerado una clasificación similar dividida en tres funciones de pertenencia: S, pequeño (small); M mediana (medium); y B, grande (big). Por último, en el caso de la variación de la potencia de la batería, NB correspondería a una variación negativa grande (negative big), NS a una variación negativa pequeña (negative small), M es una variación pequeña en torno a cero (medium), PS es una variación positiva pequeña (positive small) y PB corresponde a una variación positiva grande (positive big).

La definición de las reglas del control difuso depende del conocimiento que tenga el diseñador del sistema a controlar, en este caso, del tranvía híbrido, de su intuición y experiencia,

siendo necesarios sucesivos experimentos para asegurar la fiabilidad y robustez del control.

Respecto a las funciones de pertenencia de la potencia demandada, se ha optado, atendiendo a la figura 1, por elegir una potencia PS que esté en torno a la potencia solicitada por el tranvía a velocidad constante, una potencia P que corresponda a la potencia solicitada durante una leve aceleración y una potencia PB relacionada con la potencia máxima solicitada. Un razonamiento similar se ha aplicado para las funciones de pertenencia N y NS.

En las funciones de pertenencia del SOC de la batería y del SC, se observa como a la batería se le permite una variación de su SOC superior que la del SC, al ser los SC dispositivos de alta respuesta transitoria, pero con menor energía específica que las baterías, por lo que, grandes picos de potencia generada o absorbida afectan enormemente a su SOC.

Respecto a la potencia de referencia de la pila, se ha optado por una función de pertenencia con forma trapezoidal para una potencia de generación mediana (M), con objeto de maximizar su rendimiento haciendo trabajar a la pila de combustible en la zona lineal de su curva de polarización, donde el rendimiento es mayor.

En las funciones de pertenencia de la variación de potencia en la batería, se ha considerado una variación de potencia positiva grande (PB) a partir de 145 kW (potencia máxima de la pila de combustible), ya que cuando la potencia demandada por el tranvía sea superior a estos 145 kW, será la batería la que deba entrar en funcionamiento. Por el contrario, la variación de la potencia de la batería será completamente negativa grande (NB) a partir de un valor de 150 kW, con lo que se consigue que el SC absorba únicamente la potencia que la batería no sea capaz de almacenar debido a su limitación dinámica.

Atendiendo a la tabla 2 y a las funciones de pertenencia de las variables, se aprecia como durante una fuerte aceleración o fuerte demanda de potencia (PB), se solicita a la pila generar su máxima potencia, exceptuando los casos donde la batería se encuentra con un SOC alto. En estos casos, con objeto de ahorrar combustible, la pila trabajará en un rango de potencia de máxima eficiencia, mientras que la batería entregará la mayor parte de la energía solicitada. Por el contrario, la variación de la potencia en la batería será negativa grande (NB) cuando ésta se encuentre con un SOC bajo, el SC con un SOC alto, y el tranvía esté efectuando una desaceleración o frenada. Por otra parte, en caso de que potencia demanda sea pequeña (PS), por ejemplo, cuando el tranvía está parado o cuando mantiene una velocidad constante baja, primará la pila como fuente principal de energía. En estos casos, si es necesario, la batería podrá ser cargada aumentando la potencia, o podrá ser descarga haciendo que la pila genere su mínima potencia de mantenimiento. Se puede observar como la función de pertenencia PS de la potencia demandada tiene un rango de potencia similar al de la función de pertenencia N de la potencia de la pila. De esta forma, se asegura que la pila sea capaz de generar la potencia demandada dentro de sus límites.

La figura 7 muestra el esquema de control aplicado al SGE del tranvía. En la figura 7a se observa que la potencia de referencia en la pila generada por el control difuso es limitada en pendiente, atendiendo a las características de la pila utilizada en este trabajo ($AP_{fc,max}$). Por último, dividiendo esta potencia por la tensión actual en bornes de la pila se obtiene la intensidad neta de referencia a generar por ésta. Un controlador PI es el encargado de variar el ciclo de trabajo del convertidor elevador de la pila, consiguiendo así que la pila genere la intensidad solicitada.

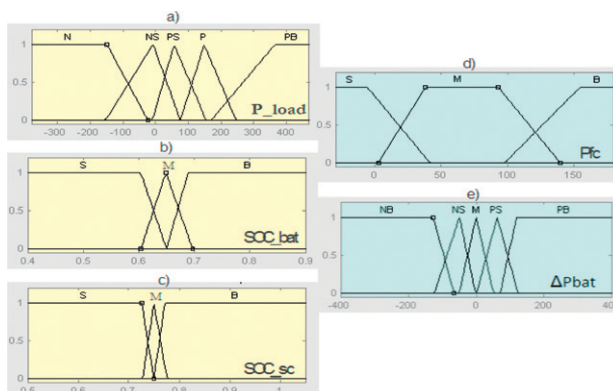


Figura 6: Funciones de pertenencia de las variables del control difuso: a) Potencia demandada, b) SOC de la batería, c) SOC del SC, d) potencia de referencia para la pila, y e) variación de potencia en la batería.

Por otra parte, la potencia a intercambiar por parte de la batería, P_{bat_ref} es calculada a partir de la variación de ésta (ΔP_{bat} salida de control difuso) y mediante la siguiente ecuación:

$$P_{bat_ref} = P_{dem.} - P_{fc_ref} + \Delta P_{bat} \quad (6)$$

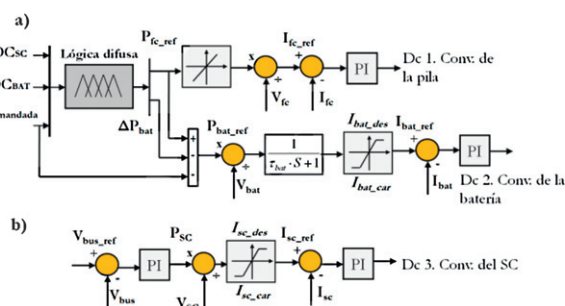


Figura 7: Sistema de gestión de energía aplicado al tranvía: a) Control basado en lógica difusa en el caso del convertidor de la pila y de la batería, y b) esquema de control para el convertidor del SC.

Esta potencia de referencia es dividida por la tensión actual en bornes de la batería, calculando así la intensidad de referencia de la batería. Esta intensidad de referencia es limitada, atendiendo a los valores máximos de carga y descarga de la batería, y se le aplica un retraso asociado a un sistema de primer orden que modela su respuesta dinámica. La diferencia entre la intensidad de referencia en la batería, una vez aplicadas las distintas limitaciones, y la actual intensidad intercambiada por ella constituye la entrada a un nuevo controlador PI que genera el ciclo de trabajo del convertidor.

Con la configuración adoptada, se asegura que el SC actúe únicamente para generar los picos de potencia que ni la batería ni la pila sean capaces de generar.

4.2. Control en cascada del convertidor bidireccional del SC

El objetivo del control utilizado para el convertidor del SC reside en intentar mantener constante la tensión del bus de continua, manteniendo la intensidad intercambiada por el SC dentro de unos niveles óptimos de funcionamiento.

En la figura 7b se muestra el esquema de control utilizado en este trabajo. En dicha figura se observa que el lazo de control externo genera la referencia de potencia a ser generada por el SC.

Esta potencia de referencia es transformada en corriente dividiéndola por la tensión actual del SC, la cual, antes de ser comparada con la que realmente está generando SC es limitada en nivel, atendiendo a las limitaciones físicas del SC considerado en este trabajo. Finalmente, un controlador PI genera el ciclo de trabajo del convertidor bidireccional, permitiendo así que el SC intercambie con el sistema la potencia de referencia creada por el lazo de control externo.

Se observa que a diferencia de la pila de combustible y la batería, al SC no se le ha aplicado ningún tipo de limitación dinámica, debido a su rápida respuesta dinámica.

5. Simulaciones

La nueva configuración del sistema de propulsión del tranvía, así como el sistema de gestión y control de energía, han sido implementados en la plataforma de MATLAB-Simulink® y testeados para el ciclo de trabajo real del tranvía de Zaragoza. Tanto la velocidad como la potencia de tracción demandadas por el actual tranvía son representadas en la figura 1.

Se comprueba como el trayecto de ida y vuelta dispone de un total de tres paradas y cuatro trayectos, alcanzando una velocidad máxima de 50 km/h en el primero y en el último tramo. Respecto a la potencia solicitada, ésta alcanza un valor máximo de 420kW, disponiendo durante los frenados de poco menos de 440kW para ser absorbidos por la batería y/o por el SC. Además, a esta potencia de tracción habrá que sumarle la potencia demandada por los servicios auxiliares (57.47 kW), con lo que la potencia a generar por el nuevo sistema híbrido será cercana a 500kW, existiendo una demanda de potencia constante incluso cuando el tranvía se encuentre parado en una estación.

Las siguientes figuras muestran los resultados de simulación obtenidos considerando un tiempo de muestreo de 40 μ s, y un estado de carga inicial del 65% en la batería y del 75% en el SC.

En la figura 8 se presenta la potencia neta de salida generada por el sistema de pila de combustible y la potencia intercambiada por la batería. Se observa como en gran parte del trayecto la pila se mantiene generando una potencia constante dentro de la zona de funcionamiento donde su rendimiento es mayor. Este rango correspondería a la parte lineal de la curva de polarización de la pila (Fig. 3). Los cambios en la potencia generada en la pila suceden principalmente cuando se produce una fuerte aceleración, la demanda de potencia aumenta considerablemente o cuando el tranvía frena o desacelera bruscamente. En este último caso, la pila pasa a generar su potencia mínima, mientras que la batería será la encargada de almacenar toda la potencia disponible en el bus de continua. El buen dimensionamiento de las fuentes de energía del sistema híbrido así como la correcta elección de la regla en el control es esencial para este correcto funcionamiento.

Por su parte, la potencia intercambiada por el SC es representada en la figura 9a. Se observa como al ser éste de respuesta dinámica más rápida, es el encargado de generar o absorber la potencia que ni la pila ni la batería han podido generar. Esto último justifica que el SC esté continuamente variando la potencia que está intercambiando con el bus de continua. Respecto a la resistencia de frenado, ésta no es necesario que actúe, ya que en todo momento, el conjunto formado por la batería y por el SC son capaces de absorber la potencia disponible durante las desaceleraciones y frenadas. La fig. 9b muestra la potencia total generada por el conjunto de fuentes de energía del tranvía.

Por otra parte, el buen comportamiento de la lógica difusa, así

como del doble lazo de control utilizado para el convertidor del SC, queda reflejado en la figura 10. Se observa en la figura 10a como la tensión del bus de continua se mantiene constante a un valor de 750V, y en la Fig. 10b como el estado de carga de la batería y del SC se mantienen en todo momento en torno a sus valores de referencia (65% y 75%).

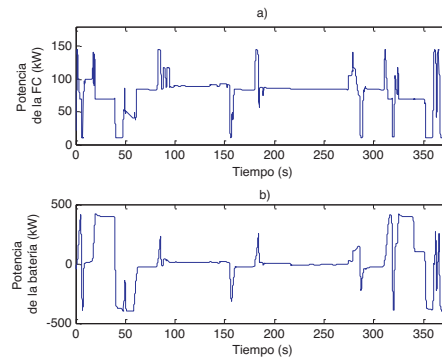


Figura 8: a) Potencia generada por la pila de combustible, y b) potencia intercambiada por la batería.

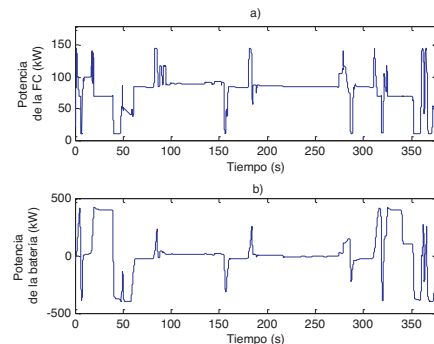


Figura 9: a) Potencia intercambiada por el SC y b) potencia total generada por el conjunto de fuentes de energía (pila de combustible, batería y SC).

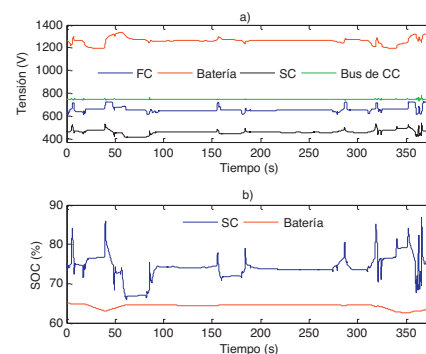


Figura 10: a) Tensiones en la pila de combustible, batería, SC y bus de continua, y b) Estado de carga de la batería y del SC.

Por último, destacar que el rendimiento medio obtenido en este nuevo sistema híbrido es de un 65%. Este valor es bastante superior al que se obtiene en los actuales trenes o tranvías propulsados por motores de combustión. Además, este valor es superior al obtenido en los sistemas híbridos propulsados por pila de combustible y batería estudiados en (Fernández *et al.*, 2010), donde se consiguen rendimientos medios del 40-45%. Por otra parte, también se consiguen mejores resultados en el consumo de hidrógeno por energía total generada por el vehículo híbrido,

siendo de 0.048 kg/kWh, un 20% menor que los resultados conseguidos con la configuración y los controles mostrados en (Fernández *et al.*, 2010).

6. Conclusiones

El presente artículo describe un nuevo sistema de gestión y control de energía para el nuevo tranvía híbrido de Zaragoza, basado en una pila de combustible PEM como fuente principal de generación de energía, y en una batería de ión-litio y en un SC como sistemas de almacenamiento y apoyo de energía. A su vez, cada fuente de energía dispone de un convertidor CC/CC que permite la conexión de cada fuente al bus de continua.

El nuevo sistema de gestión y control de la energía está basado en un sistema de control de lógica difusa para el caso de los convertidores de la pila de combustible y batería, y por un control en cascada formado por dos lazos de control para el convertidor del SC. En conjunto, ambos controles permiten generar la potencia solicitada por el tranvía en todo momento, manteniendo los principales parámetros de cada fuente dentro de sus rangos óptimos de funcionamiento. Además, este nuevo sistema de gestión de energía es capaz de mantener constante la tensión del bus de continua a pesar de las variaciones en la potencia solicitada por el tranvía.

El nuevo sistema híbrido ha sido evaluado utilizando el ciclo real de trabajo del tranvía de Zaragoza. Los resultados muestran que tanto la configuración como el control propuestos son perfectamente válidos para el tranvía.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Hynergreen Technologies S.A. y por el Programa Cenit del CDTI del Ministerio de Ciencia e Innovación de España, bajo el proyecto de investigación Ecotrans. Un consorcio nacional de empresas, liderado por CAF y al que pertenece Hynergreen Technologies, está trabajando en este proyecto para el desarrollo de tecnologías ecológicas para el transporte urbano.

Referencias

- Ballard fuel cell power. (2011). [En línea] http://www.ballard.com/files/pdf/Spec_Sheets/FCvelocity-HD6_SPC5101744-0G.pdf.
- Bauman J. and Kazerani M. (2008). A Comparative Study of Fuel-Cell-Battery, Fuel-Cell-Ultracapacitor, and Fuel-Cell-Battery-Ultracapacitor Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57, pp. 760-769.
- Brinkman N., Wang M., Weber T. and Darlington T. (2005). Well-to-wheels analysis of advanced fuel/vehicle systemsda North American study of energy use, greenhouse gas emissions, and criteria pollutant emissions. General Motors and the Argonne National Laboratory.
- CAF - Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles. (2011a). Urbos 3 [En línea]. http://www.caf.es/ingles/productos/urbos3_descripcion.php?urbos_prod=c
- CAF - Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles. (2011b). ACR System. [En línea] http://www.caf.es/ingles/id/sistema_acr.php
- Corbo P., Corcione F. E., Migliardini F. and Veneri O. (2005). Experimental study of a fuel cell power train for road transport application. *Journal of Power Sources*, 145, pp. 610-619.
- Davis S.C., Diegel S.W. and Boundy R.G. (2007). Transportation energy data book: Edition 27. U.S. Department of Energy.
- Edwards R., Larivé J.-F., Mahieu V. and Rouveiroles P. (2007). Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. ConcaWE/EUCAR/European Commission.
- Ehsani M., Gao Y., Gay S.E. and Emadi A. (2005). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design* (Power Electronics and Applications Series). CRC Press.
- Emadi A., Lee Y. J. and Rajashekara K. (2009). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55, pp. 2237-2245.
- Erdinc O., Vural B. and Uzunoglu M. A Wavelet-Fuzzy Logic Based Energy Management Strategy for a Fuel Cell/Battery/Ultra-capacitor Hybrid Vehicular Power System. *Journal of Power System*, 194, pp. 369-380.
- Erdinc O., Vural B., Uzunoglu M. and Ates Y. (2009). Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a wavelet-fuzzy logic based load sharing and control algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, pp. 5223-5233.
- Fernandez L. M., Garcia P., Garcia C. A., Torreglosa J. P. and Jurado F. (2010). Comparison of control schemes for a fuel cell hybrid tramway integrating two dc/dc converters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, pp. 5731-5744.
- Gao D., Jin Z. and Lu Q. (2008). Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus. *J. Power Sources*, 185, pp. 311-317.
- Garcia P., Fernandez L. M., Garcia C. A. and Jurado F. (2010). Energy management system of fuel cell-battery hybrid tramway. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, pp. 4013-4023.
- Garcia P., Fernandez L. M., Garcia C. A. and Jurado F. (2010). Comparative study of PEM fuel cell models for integration in propulsion systems of urban public transport. *Fuel cells*, 10, pp. 1024-1039.
- Hoogers G. (2003). *Fuel cell technology handbook*. CRC. Boca Ratón.
- Kazimierzczuk M. K. (2008). *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. Wiley and Sons.
- Kromer M.A. and Heywood J.B. (2007). *Electric powertrains: opportunities and challenges in the U.S. light-duty vehicle fleet*. Sloan Automotive Laboratory Report, Massachusetts Institute of Technology.
- Li C.-Y. and G.-P. Liu (2009). Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles. *J. Power Sources*, 192, pp. 525-533.
- Lisheng Shi and Crow M. L. (2008). Comparison of ultra capacitor electric circuit models. *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st*, pp. 1-6.
- Marie-Francoise J.-N., Gualous H. and Berthon A. (2006). Supercapacitor thermal and electrical behavior modeling using ANN. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 153, pp. 255-261.
- Maxwell Technologies. (2011). [En línea] <http://www.maxwell.com/>.
- Nelms R.L. and Spyker R.M. (2000). Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 36, pp. 829-836.
- Padulles J., Ault G. W. and McDonald J. R. (2000). An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation. *Journal of Power Sources*, 86, pp. 495-500.
- Pukrushpan J. T., Stefanopoulou A. G. and Peng H. (2002). *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis, and Feedback Design*. Springer Verlag. Londres.
- Ruselowski G., Wallace J.P., Choudhury R., Wang M., Weber T. and Finizza A. (2001). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems. North American analysis. General Motors, the Argonne National Laboratory, BP, Exxon Mobil, and Shell.
- Sandy Thomas C.E. (2009). Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, pp. 9279-9296.
- Sikha G., White R.E. and Popov B.N. (2005). A Mathematical Model for a Lithium-Ion Battery/Electrochemical Capacitor Hybrid System. *Journal of the Electrochemical Society*, 152, pp. 1682-1693.
- The MathWorks, Inc. SimPowerSystems (2011). [En línea]. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/index.html?access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/&http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html>.
- Weidner V. and Srinivasan J.W. (1999). Mathematical modeling of electrochemical capacitors. *Journal of the Electrochemical Society*, 146, pp. 1650-1658.
- Winston Battery Limited. (2011). [En línea] <http://www.thunder-sky.com/>.
- Zubieta L. and Boner R. (2000). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 36, pp. 199-205.