

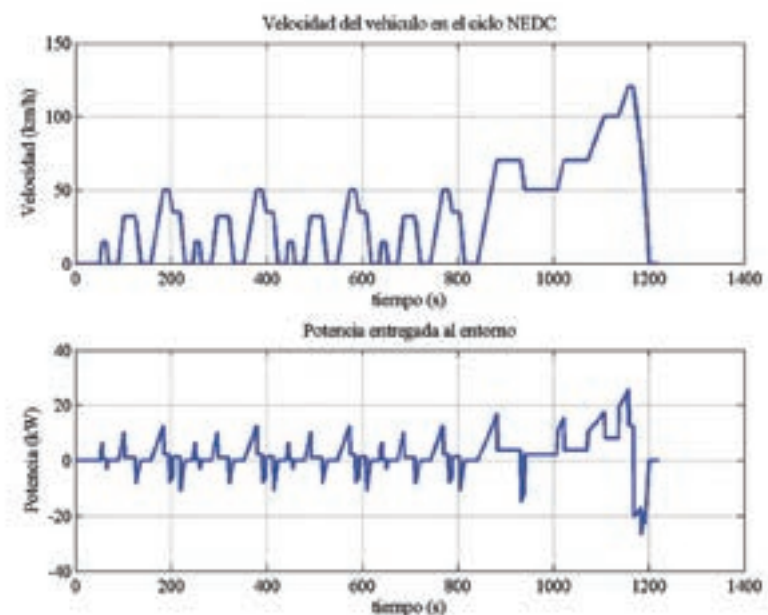
*Combinando una batería como fuente de energía y unos supercondensadores como fuente de potencia*

## Frenado regenerativo en vehículos eléctricos mediante supercondensadores

**Los vehículos híbridos o eléctricos, los vehículos que disponen de un motor eléctrico en su cadena de tracción, pueden ver su eficiencia energética incrementada debido a que este motor eléctrico puede servir para recuperar parte de la energía de frenado, en lugar de disiparla al ambiente en forma de calor como ocurre con los sistemas de freno convencionales. Una vez recuperada y almacenada, se puede usar en la siguiente aceleración. Para ello, no solo es necesario un motor eléctrico, sino también un elemento que almacene esta energía.**

**E**n función del ciclo de conducción, del número de arranques y paros, se estima que se puede llegar a recuperar alrededor del 30 % de la energía cinética disponible en un vehículo. Este valor no puede llegar a ser del 100 % por varios factores. El primer factor lo constituyen las pérdidas en el sistema de transmisión de la energía cinética hasta el elemento almacenador de esta energía. El segundo es la capacidad del sistema de almacenamiento de aceptar esta energía, y el tercero es la baja eficiencia de motor eléctrico operando como generador a bajas vueltas. El frenado eléctrico regenerativo siempre deberá convivir con un sistema de frenado convencional. Aunque el valor del 30 % parezca pequeño, en aplicaciones de tracción eléctrica con arranques y paros frecuentes, como puede ser la conducción por ciudad, ya sea tanto de coches como de metros o tranvías, está justificado implementar sistemas que permitan recuperar esta energía.

La energía que está en juego en la frenada y en la aceleración de un vehículo no es extremadamente elevada, pero como ambos procesos se producen en intervalos pequeños



■ Simulación de la potencia que un vehículo debe entregar al entorno, incluyendo la propia inercia del vehículo, para realizar un ciclo de conducción NEDC. Se puede ver que cuando el vehículo frena, la potencia es negativa.

de tiempo, sí que hay una gran cantidad de potencia a manejar, como se puede ver en la figura superior para un ciclo de conducción estándar NEDC. El dimensionado en potencia del sistema de tracción eléctrica se realiza en base a la potencia que se necesita al acelerar. Como se puede apreciar en la citada figura, para el vehículo en estudio

sería necesario un motor de unos 25 kW solo para acelerar de 100 km/h a 120 km/h, mientras que cuando el coche se mueve a 120 km/h de velocidad constante, la potencia necesaria es solo de unos 12 kW. El sistema de almacenamiento de energía también tiene que ser capaz de manejar estas potencias, aunque su capacidad energética no tiene

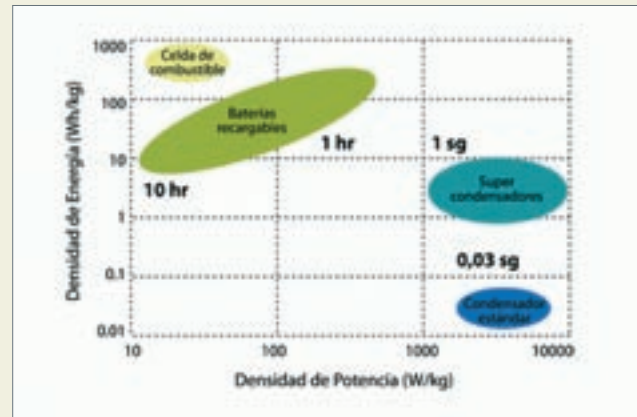
## Supercondensadores

Los supercondensadores (SC), ultracondensadores o condensadores electroquímicos de doble capa (EDLC, *Electric Double Layer Capacitors*) son un tipo de condensadores electroquímicos con capacidades muy por encima de las más altas capacidades de condensadores electrolíticos. Los SC llegan a alcanzar los kilofaradios a tensiones de 2,5-2,7 V.

Su elevada densidad de potencia y su capacidad de almacenamiento de energía los convierte en una opción muy recomendable para aplicaciones de altas potencias donde unas baterías podrían degradarse muy rápidamente o donde las prestaciones requieren altas corrientes en muy poco tiempo. Estos podrían sustituir a las baterías en aplicaciones donde es más crítica la potencia que la energía, por ejemplo, en vehículos automáticos (AGV), en frenado regenerativo de motocicletas, ascensores, trenes o coches eléctricos.

Tal y como se puede ver en la figura adjunta, los supercondensadores tienen una densidad de potencia más elevada que las baterías, pero menor densidad de energía. Además, su constante de tiempo se sitúa en torno a un segundo, permitiendo cargas y descargas mucho más rápidas que con estas.

En comparación con las baterías y los condensadores,



■ Relación entre la densidad de potencia y de energía para diferentes fuentes. (Fuente: <http://koneika.com>).

los supercondensadores ofrecen importantes beneficios. Como se puede ver en la tabla de la página xxx, la vida útil de los supercondensadores es muy superior a la de las baterías, así como lo es su rendimiento, y en comparación con los condensadores normales, los SC permiten almacenar más energía, haciéndolos óptimos para aplicaciones de frenado regenerativo, donde existe un alto ciclaje y el rendimiento es crítico.

2

que ser muy elevada.

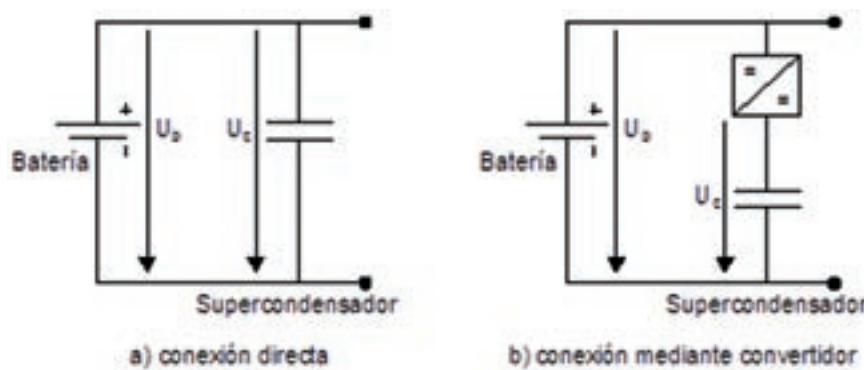
En este sentido, las propias baterías de los vehículos eléctricos, sea cual sea su tecnología, no son los

mejores elementos para soportar las potencias elevadas necesarias en los procesos de frenado y aceleración. Además, si se dimensionan para

ello, se requiere un volumen muy importante de baterías que soporte las corrientes necesarias.

Los elementos que soportan mejor estas potencias elevadas son los supercondensadores. Por lo tanto, en aplicaciones de frenado regenerativo, estos elementos son imprescindibles si no se quiere acortar la vida de las baterías y dejar de recuperar parte de la energía en el proceso de frenado.

A modo de ejemplo, si se quisiera motorizar un vehículo eléctrico que requiriera una potencia de 50 kW, con una autonomía en energía de 3,5 kWh, con solo baterías o supercondensadores, se obtendrían los valores de la tabla adjunta. Se observa claramente que los supercondensadores solos no son útiles para esta aplicación, ya que su energía específica es demasiado baja. Para el caso de las baterías de plomo, se ve claramente que el número de baterías necesario para satisfacer la potencia pico de 50 kW es muy elevado, y esto provoca un sobredimensionamiento importante en lo



■ Hibridación de batería y supercondensador en un vehículo eléctrico.

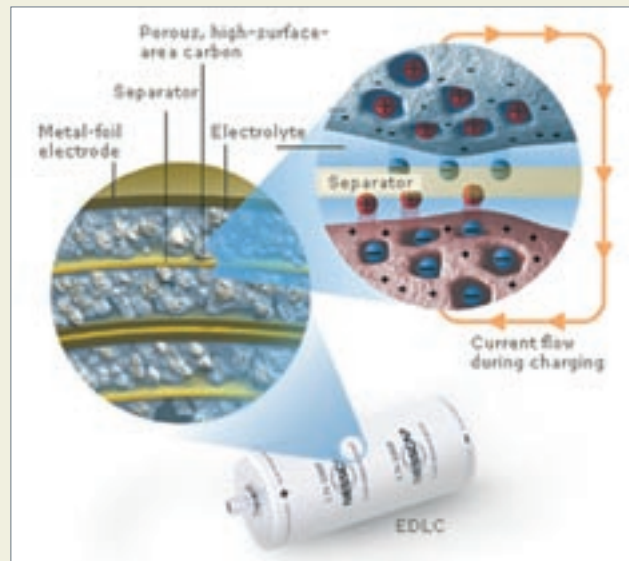
	Pb-ácido	NiMH	Li-ion	Supercondensadores
Potencia específica (W/kg)	75	140	1.000	2.500
Energía específica (Wh/kg)	30	64	100	2
Peso total (kg)	667	357	50	1750

■ Masa de elementos de almacenaje de energía para un vehículo que requiera 50 kW de potencia y 3,5 kWh de energía para su funcionamiento.

## Fisonomía del supercondensador

Están formados por dos electrodos de aluminio y dos capas de carbón activo (ya que se trata de un condensador electroquímico simétrico) separadas por un electrolito que actúa meramente de reserva de iones, como se puede ver en la figura adjunta. Inicialmente, al ser simétrico el SC no tiene polaridad, pero al dar la primera carga, las impurezas propias del material caracterizan a los electrodos. Por lo tanto, el SC está formado por dos condensadores de doble capa, cada uno con conexión metálica a un electrodo y conexión por líquido al otro. Cuando el SC se carga, el potencial es casi una línea diagonal que rápidamente colapsa en un elevado potencial en bornes de las láminas de carbono activo y una pendiente menos marcada en el electrolito. Esta pendiente tan pronunciada en el carbono es la característica principal del SC, conseguida gracias a la elevada porosidad del carbón activo. Con la tecnología actual de crecimiento de nanotubos de carbono se pueden llegar a conseguir hasta 2.200 m<sup>2</sup>/g de carbón activo.

Por ejemplo, para un condensador de 3 kF se necesitan unos 140 g de carbono activo, obtenidos de unas 20 cáscaras de coco, para soportar los cerca de 12 kF de capacidad interna, separada después en dos con-



■ Funcionamiento y fisonomía del supercondensador. (Fuente: [www.nesscap.com](http://www.nesscap.com)).

densadores de 6 kF en serie, obteniendo finalmente los 3 kF anteriormente mencionados.

## Modelización del supercondensador

Debido al tortuoso camino que deben recorrer los electrones para llegar de un electrodo al otro, el compor-

➔ Continúa en página siguiente

que se refiere a energía. Se puede decir que alimentar el vehículo solo con baterías de Pb-ácido no es una buena solución. En el caso de las baterías de NiMH sucede algo parecido, aunque el peso de las baterías es menor por su mayor potencia y densidad específicas. Para el caso de las baterías de Li-ion, donde la relación potencia específica energía específica es de 10, hay todavía sobredimensionamiento en energía de las baterías debido a la potencia, pero este es mucho menor y aceptable.

Puede deducirse que sería mucho más óptimo usar un sistema que combinara supercondensadores para satisfacer los 50 kW y baterías para satisfacer los 3,5 kWh. Se puede definir el ratio energía potencia como:

$$R_{E/P} = \frac{E_r}{P_r} = \frac{M_b E_b + M_c E_c}{M_b P_b + M_c P_c}$$

donde  $E_r$  es la energía requerida,  $P_r$  es la potencia requerida,  $M_b$  y  $M_c$  son la masa de baterías y supercon-

densadores, respectivamente,  $E_b$  y  $E_c$  son la energía específica de la batería y los supercondensadores, respectivamente y,  $P_b$  y  $P_c$  son la potencia específica de la batería y los supercondensadores, respectivamente. De esta forma, se obtienen los resultados recogidos en la tabla inferior. Puede observarse que el sistema más beneficiado es el de Pb-ácido, por su baja potencia específica. A medida que la potencia específica se incrementa, el uso de supercondensadores no es tan beneficioso.

Por lo tanto, hasta que los fabricantes de baterías desarrollen bate-

rias con más potencia específica, o los fabricantes de supercondensadores desarrollen supercondensadores con más energía específica, la hibridación mediante el uso de baterías combinado con supercondensadores es un elemento importante a tener en cuenta en los vehículos eléctricos para optimizar el peso y también la vida útil de las baterías, ya que estarán sometidas a menos esfuerzos de potencia.

Básicamente, la hibridación de batería y supercondensadores se puede hacer de dos formas distintas, que pueden observarse en la figura de la página anterior. La primera

	Pb-ácido	NiMH	Li-ion
Potencia específica (W/kg)	378,5	703	1222
Energía específica (Wh/kg)	26,5	49,2	85,5
Peso baterías (kg)	116	54	35
Peso supercondensadores (kg)	16,5	16,9	6,05
Peso total	132	71	41

■ Masa de elementos de almacenaje de energía para un vehículo híbrido que requiera 50 kW de potencia y 3,5 kWh de energía para su funcionamiento.

→ Viene de página anterior

tamiento del supercondensador tiene algo de parecido con una línea de transmisión eléctrica, mostrando también diferentes constantes de tiempo dados los dos condensadores internos en serie.

El modelo más sencillo para caracterizarlos consta de un condensador con una resistencia en paralelo y una resistencia en serie. La primera caracteriza la autodescarga y la segunda la resistencia interna equivalente (ESR). Ambos parámetros se pueden obtener fácilmente de las hojas de características de los diferentes fabricantes.

Modelos más finos se pueden realizar teniendo en cuenta las dos capacidades y la resistencia que las une, pero los parámetros del modelo solo se pueden obtener mediante pruebas físicas del supercondensador.

## Dimensionamiento de bancos de supercondensadores

A efectos prácticos, para dimensionar un banco de supercondensadores para almacenamiento de energía se puede usar la fórmula de la energía almacenada en un condensador:

$$E_{SC} = \frac{1}{2} C_{SC} (U_{ini}^2 - U_{fin}^2)$$

Se parte de un banco de supercondensadores de capacidad equivalente  $C_{sc}$  a una tensión inicial  $U_{ini}$  que se descargarán hasta una tensión final  $U_{fin}$ .

Dependiendo de la aplicación, se puede conocer la excursión de tensión admisible en el lugar donde se vaya a conectar el banco de supercondensadores a diseñar. Lo más recomendado es usar un convertidor DC/DC para poder aumentar la diferencia entre la tensión inicial y la final, almacenando más energía con menor capacidad.

Aun así, es recomendable no bajar por debajo del 50% de la tensión máxima de carga, ya que entre el 100% y el 50% de tensión es donde se encuentra el 75% de la energía total que puede almacenar el banco. Aun así, es un compromiso entre la tensión admisible a la entrada del convertidor, el rendimiento del

Parámetros		Supercondensador	Batería
Tiempo de descarga	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ s	1~30 s	0.3~3 h
Tiempo de carga	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ s	1~30 s	1~5 h
Densidad de energía (Wh/kg)	< 0.1	1~10	10~100
Densidad de potencia (W/kg)	< 10.000	10.000	50~200
Eficiencia	~ 1,0	~1,0	0,7~0,85
Vida (ciclos)	>500.000	> 500.000	500~2.000

■ Comparación entre condensadores, supercondensadores y baterías. (Fuente: [www.nesscap.com](http://www.nesscap.com)).

4

propone la conexión directa de la batería con los supercondensadores y la segunda propone la conexión de los supercondensadores y la batería mediante un convertidor.

Para analizar estas dos opciones hay que tener en cuenta la expresión de la energía almacenada en los supercondensadores, que es:

$$E = \frac{1}{2} C (U_{c,max} - U_{c,min})^2$$

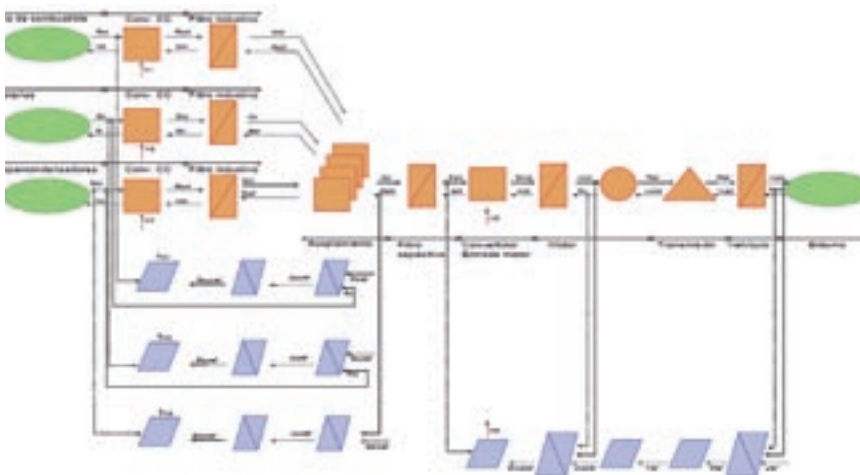
donde C es la capacidad de los supercondensadores,  $U_{c,max}$  es la tensión máxima de los supercondensadores y  $U_{c,min}$  es la tensión mínima de los supercondensadores. Una excursión de tensión de los supercondensadores de la tensión

nominal a la mitad de la tensión nominal corresponde al 75 % de la energía almacenada en los supercondensadores.

En el caso de la conexión directa de los supercondensadores y la batería, la excursión en tensión de los supercondensadores viene fijada por la variación de tensión en la batería, que puede ser de alrededor del 20 %; por lo tanto, de los supercondensadores no se aprovecha toda su capacidad energética.

Si, en cambio, se usa la opción de conectar un convertidor entre los supercondensadores y la batería, la excursión en tensión de los supercondensadores puede ser cercana al 50 %, aprovechando al máximo toda la energía de los supercondensadores.

En ambos casos, la batería se conecta directamente al convertidor del motor. Este convertidor tiene que ser capaz de tolerar las variaciones de tensión en la batería en función de su estado de carga.



■ Representación Energética Macroscópica del vehículo y el entorno.

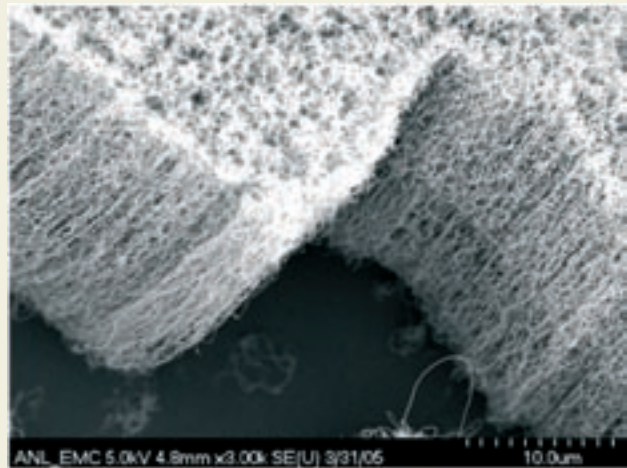


mismo y la capacidad necesaria. Todos estos términos al final se traducen en un coste que se debe optimizar para escoger la pareja de banco de supercondensadores y convertidor por un coste y rendimiento razonables.

### Supercondensadores disponibles en el mercado

Actualmente existen diferentes fabricantes de supercondensadores, entre los que se encuentran:

- Boostcap (*Maxwell Technologies*, [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com)): SC individuales hasta 3kF a 2,7 V y módulos de hasta 63 F a 128 V. Tienen tres líneas de productos muy marcadas, una línea de supercondensadores centrados en alta energía, otra en alta potencia y los módulos. Éstos llevan protecciones e indicadores como por ejemplo si el condensador está completamente cargado o no, la temperatura del mismo, etc.
- EDLC (*Nesscap*, [www.nesscap.com](http://www.nesscap.com)): SC individuales hasta 5kF a 2,7 V y módulos de hasta 62 F a 125 V. Los SC individuales no están tan separados como en *Maxwell*, pero se pueden encontrar equivalencias. En cuanto a los módulos, también los podemos encontrar con extras como en el caso anterior.
- Supercondensers (*Koneika*, <http://koneika.com>): SC en módulos desde 5 F a 15 V hasta 1,4 F a 200 V. Empresa con fabrica en España, ofrece supercondensadores con muy baja ESR y altas potencias, destacando por encima de los demás fabricantes. Como contrapartida, el peso de sus módulos es mayor. Se especializa



■ Lámina de carbono activo de 2.200 m<sup>2</sup>/g. (Fuente: Argonne National Laboratory).

en aplicaciones de arranque de motores, calidad del suministro y aplicaciones de audio para coches.

- DLCAP (*Chemi-Con*, [www.chemi-con.com](http://www.chemi-con.com)): SC individuales hasta 3kF a 2,5 V y módulos de hasta 116 F a 210 V. De propósito general.
- EVerCap (*Nichicon*, [www.nichicon.co.jp](http://www.nichicon.co.jp)): SC individuales C < 6 kF a 2,5 V, de propósito general.
- BestCap (*AVX Corporation*, [www.avx.com](http://www.avx.com)): SC individuales y módulos hasta 1 F y 16 V. Tienen la característica de tener empaquetados de perfil bajo, indicados para soldar en PCB.

Por lo tanto, también los vehículos eléctricos tienen que ser híbridos, combinando una batería como fuente de energía y unos supercondensadores como fuente de potencia. Esta hibridación permite optimizar al máximo el elemento de almacenamiento energético en términos de volumen, peso y capacidad. Además, posibilita alargar la vida útil de la batería, que no estará sometida a fuertes cargas y descargas.

### Representación Energética Macroscópica (REM)- Estructura Maximal de Control (SMC)

Una buena manera de entender el comportamiento energético del vehículo pasa por representar los flujos de energía que intervienen en el proceso de funcionamiento de este. Para ello se utiliza la llamada *Representación Energética Macroscópica (REM)* (ver figura en página anterior). En ella se representan mediante una forma geométrica

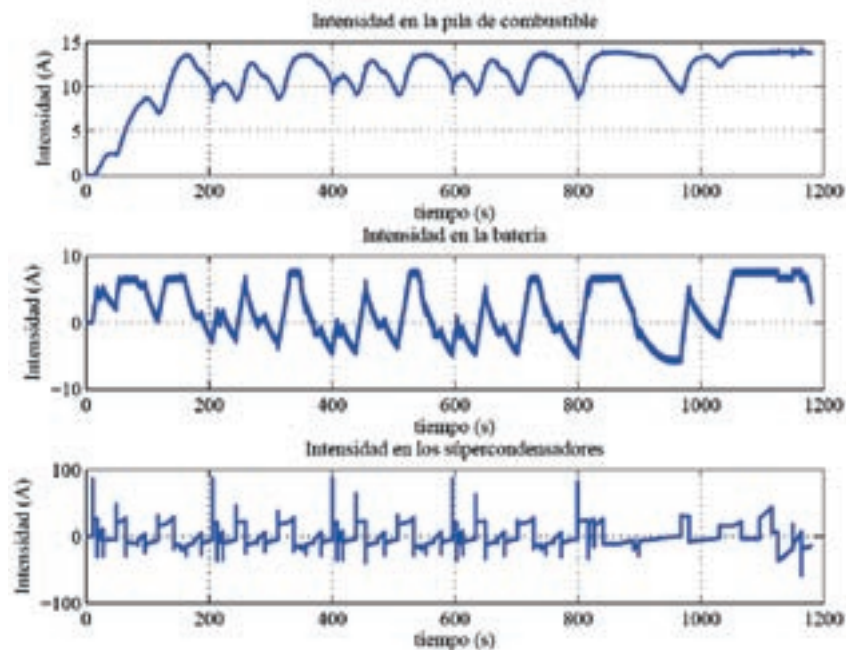
diferente todos los elementos que intervienen en el flujo energético. Este flujo energético se produce siempre entre dos o más fuentes, representado en horizontal. Unas que entregan energía y otras que la absorben. Cabe recordar que la energía ni se crea ni se destruye, si no que se transforma.

Los bloques cuentan con variables de entrada (flechas hacia el bloque) y de salida (flechas saliendo del bloque) que serán datos (entrada) e incógnitas (salida) en el planteamiento posterior de ecuaciones para identificar ese bloque analíticamente.

Las fuentes de energía, entendiendo como fuente de energía todo aquello que no solo genera energía sino también que disipa, se representa con un óvalo verde con borde verde. Poseen una salida, variable que imponen (tensión en una batería), y una entrada, variable impuesta por el elemento siguiente (corriente en una batería, que viene impuesto por la carga que se le conecta). El pro-

ducto de las dos variables es siempre potencia, sea cual sea la naturaleza de la fuente.

Los convertidores de energía (convertidores estáticos, motores, reductores, etc.) convierten la energía de entrada en otro tipo de energía sin necesidad de acumular energía, y se representan por una figura de color naranja y borde rojo. Pueden disponer de una entrada de regulación. Por la izquierda disponen de una entrada y una salida, al igual que por la derecha. La entrada de regulación es por debajo del bloque. Un ejemplo de convertidor de energía sería un transformador, en donde la variable de entrada por la izquierda sería la tensión impuesta en el primario del transformador, la variable de salida por la izquierda sería la corriente de primario, la variable de control sería la relación de transformación, la variable de salida por la derecha sería la tensión del secundario, y la variable de entrada del lado derecho sería la corriente del secundario. Un



■ Corriente suministrada por cada una de las fuentes en el vehículo híbrido.

reductor mecánico o la conversión electromecánica en un motor serían otro tipo de transformador.

Los acumuladores son los encargados de acumular energía entre dos fuentes. Pueden tener pérdidas internas y se representan con rectángulo naranja con bordes rojos y una línea diagonal uniendo la esquina superior izquierda con la inferior derecha. Como elementos acumuladores se dispone de condensadores e inductancias, pero también la inercia mecánica. Los acumuladores disponen de dos entradas y dos salidas. Las dos salidas, una para cada lado, representan la misma variable. En el caso de un condensador, es la tensión en bornes de este; en el caso de una inductancia, es la corriente que pasa por ella.

En la citada figura de la página anterior se puede observar la representación del vehículo estudiado, que en este caso es un vehículo eléctrico que incorpora tres fuentes de energía: una pila de combustible, una batería y unos supercondensadores, que se pueden ver a la izquierda de la figura. A la derecha de la figura se puede ver el entorno, representado por otra fuente, que en este caso solo consume energía. En medio existen los tres convertidores estáticos para cada una de las fuentes, el convertidor del motor,

el motor y la transmisión mecánica del vehículo.

La REM es una representación energética del sistema y permite visualizar fácilmente la relación energética entre cada uno de los bloques.

De la REM se puede deducir la estructura de control necesaria para controlar una o varias de las variables energéticas. Por ejemplo, para controlar la velocidad del vehículo representado en la figura, se ve claramente que hay que actuar sobre la señal de control m5 del convertidor de entrada al motor. La estructura de control solo tiene que deshacer el camino, desde la velocidad, hasta m5, invirtiendo cada uno de los bloques de la REM. Así, se puede obtener lo que se llama la *Estructura Maximal del Control (SMC)*, y que se representa mediante bloques de color azul inclinados. Cada bloque en la REM tiene su inversa en la SMC, excepto los generadores, claro. El problema radica en los elementos almacenadores. Como almacenadores, integran las variables de entrada, por lo tanto, la inversa sería la función derivada, lo cual significa que se perdería la causalidad, y deberíamos saber lo que va a pasar en el futuro. Esto no es posible y, por lo tanto, en la inversa de los elementos de almacenaje es

donde se ubican los controladores, que no son más que filtros que intentan adaptarse a los cambios. Por lo tanto, como se puede ver en la figura, para controlar la velocidad del vehículo hace falta un controlador de velocidad, la salida del cual será la referencia de fuerza en las ruedas. Esta fuerza se puede convertir fácilmente a par en las ruedas mediante el radio de la rueda, y a par motor si se conoce el índice de reducción de la transmisión. Llegados a este punto, la fuerza es la referencia de par del motor que impulsa el vehículo. El par motor lo podemos controlar mediante el control de la corriente, que es una variable almacenada en la inductancia del motor. Por lo tanto, ahora tenemos que cerrar el lazo de par del motor, la salida del cual es la tensión que hay que aplicar al motor para que circule la corriente que nos da el par que deseamos. Esta tensión es aplicada por el convertidor del motor.

Los resultados de simular este vehículo en un ciclo NEDC se pueden ver en la figura adjunta. Se puede observar claramente la distinta dinámica en corriente de cada una de las distintas fuentes. La pila de combustible es una fuente de una dinámica baja, no puede suministrar picos de corriente y, además, tarda un tiempo en arrancar hasta llegar a su plena potencia, como se puede ver al inicio del ciclo. Las baterías, en cambio, suministran la energía al inicio del ciclo. Además, el valor medio de su corriente, al igual que la de los supercondensadores, es cercano a cero, hecho que indica que al final de ciclo mantendrán su estado de carga inicial. La energía en este vehículo híbrido es suministrada por la pila de combustible que tiene un valor medio distinto de cero de la corriente. También se puede ver que las fuertes demandas de potencia en las aceleraciones o en las frenadas son entregadas o absorbidas mayoritariamente por los supercondensadores, con picos de corriente cercanos a los 100 A.

**Autores**  
CITCEA