

# Comparación entre las dos tecnologías líderes en el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos: baterías y pilas de combustible



Isabel María Gabriel Pizarro  
Félix García Torres  
Carlos Fúnez Guerra

Ingeniera Industrial  
Ingeniero Industrial  
Ingeniero de Minas

CENTRO NACIONAL DEL HIDROGENO. Unidad de Ingeniería y Montaje. Prolongación Fernando el Santo, s/n- 13500 Puertollano (Ciudad Real). Tfno:+ 34 926 42 06 82. felix.garcia@cnh2.es

Recibido: 22/03/2012 • Aceptado: 04/06/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5003>

## COMPARISON BETWEEN THE TWO LEADING TECHNOLOGIES ENERGY STORAGE IN ELECTRIC VEHICLES: BATTERIES AND FUEL CELLS

### ABSTRACT

• There are currently two technologies that dominate the current trends of electric vehicles: fuel cell and battery. Both options generate electricity to drive electric motors, eliminate pollution and improve vehicle efficiency. Fuel cells derive their energy from hydrogen stored in the vehicle, while the batteries get the energy from grid. The two forms of electricity generation have advantages and disadvantages in terms of power density and energy density, dynamic response, refueling time, autonomy and the possibility of regenerative braking, infrastructure for recharging.

The electric vehicle configuration will consist of a series of blocks that must give the system a performance similar to the conventional configuration in the same terms of speed, acceleration, time of refueling and comfort.

This paper develops the analysis of current technology in the propulsion system of electric vehicles for further optimal sizing of components and systems that make the same fundamental, a study of the most appropriate for the use of either technology .

• **Keywords:** fuel cell, battery, electric vehicle.

### RESUMEN

Existen dos tecnologías que dominan las tendencias actuales del vehículo eléctrico: la pila de combustible y la batería. Ambas opciones generan electricidad para impulsar los motores eléctricos, eliminan la contaminación y mejoran la eficiencia del vehículo. Las pilas de combustible derivan su energía a partir del hidrógeno almacenado en el vehículo, mientras que las baterías obtienen toda la energía de la red eléctrica. Las dos formas de generación de electricidad presentan ventajas y desventajas en cuanto a densidad de potencia y densidad de energía, respuesta dinámica, tiempo de repostado, autonomía y posibilidad de frenada regenerativa, infraestructura necesaria para la recarga.

La configuración del vehículo eléctrico estará formada por una serie de bloques que darán al sistema unas prestacio-

nes similares a la configuración convencional del mismo, tanto en velocidad, aceleración, tiempo de repostado y confort.

El presente artículo desarrolla el análisis de la tecnología actual en el sistema de propulsión del vehículo eléctrico para un posterior dimensionamiento óptimo de los componentes y sistemas fundamentales que conforman el mismo, realizando un estudio de los escenarios más apropiados para el uso de una u otra tecnología.

**Palabras Clave:** pila de combustible, batería, vehículo eléctrico.

### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente todas las compañías de automoción están preparando la transición del vehículo en su concepción actual basada en combustibles

fósiles y motores de combustión interna. En la actualidad existen dos tendencias que están liderando la transición del vehículo de combustión interna al vehículo eléctrico: las pilas de combustible y las baterías.

En la siguiente figura, se muestran los bloques fundamentales que componen la configuración del vehículo eléctrico: [1]

3. *Bloque de servicios auxiliares*: se encarga de la alimentación de sistemas de baja demanda de potencia.

## 2. MÉTODOS

La diferencia sustancial entre una u otra tecnología vendrá dada por el bloque fuente de energía, donde se debe hacer un

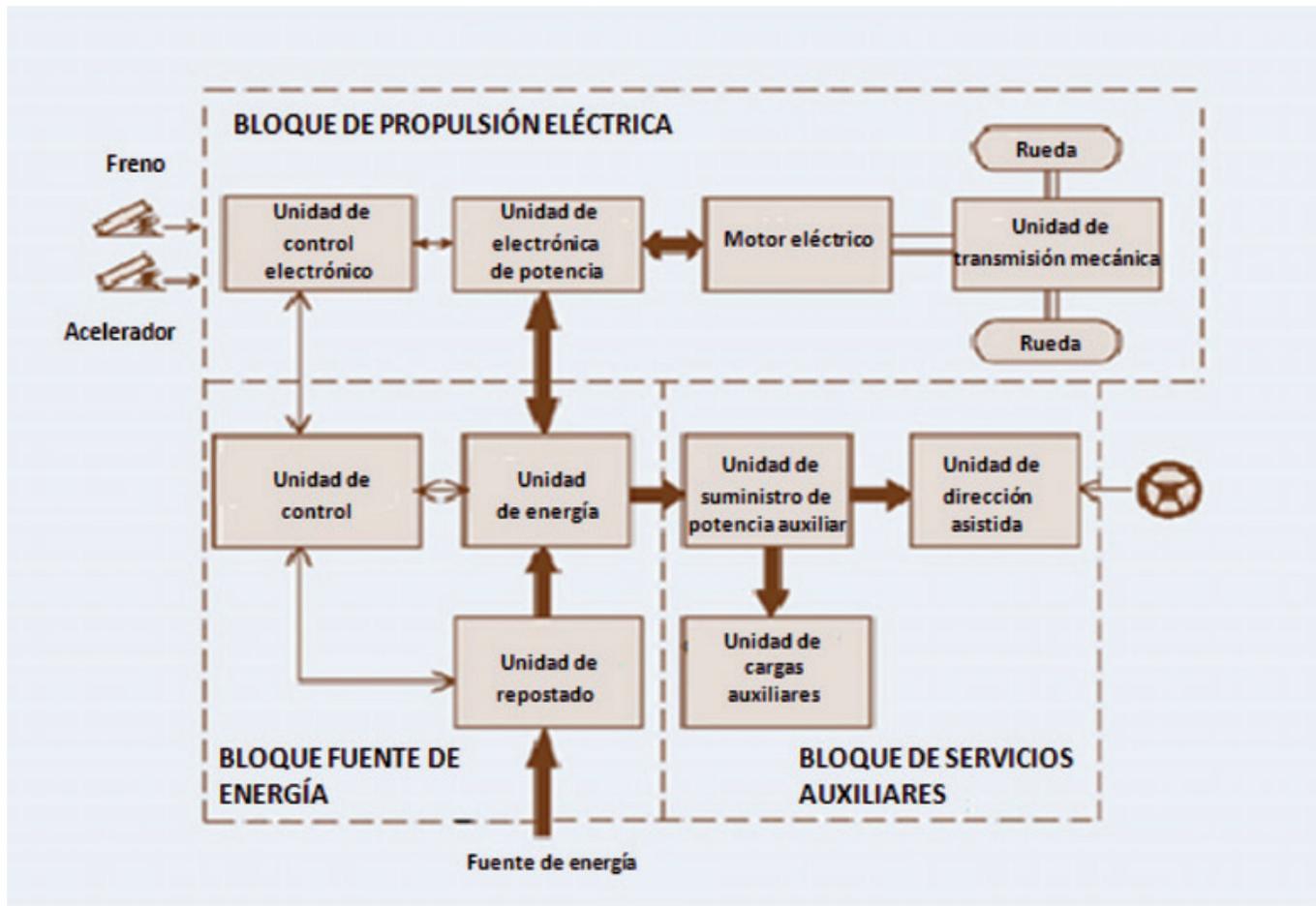


Figura 1: Diagrama de bloques principal del sistema de control de un vehículo eléctrico

1. *Bloque fuente de energía*: parte del vehículo donde se encuentra el sistema de acumulación de energía que dará autonomía al vehículo, dependiendo de la tecnología del vehículo. Vendrá dado por la batería, en el vehículo eléctrico de batería, o bien por la pila de combustible en el vehículo eléctrico de pila de combustible.
2. *Bloque de propulsión eléctrica*: bloque fundamental del vehículo, pues es el que se integra al conjunto de sistemas del vehículo realizando la transmisión mecánica a las ruedas. Incorpora un controlador electrónico que recibe las señales del freno y el acelerador cuya salida dará una consigna de funcionamiento al convertidor de electrónica de potencia y al sistema de fuente de energía.

análisis de cada una de las unidades integrantes. El bloque de energía está compuesto por tres unidades fundamentales cuyo análisis se va a realizar a continuación:

1. La *unidad de energía*: compuesta por el sistema que partiendo de una energía almacenada - bien sea en forma de hidrógeno, electricidad o combustible fósil - tiene la capacidad de transformarla en energía eléctrica para transmitir el movimiento al vehículo.
2. La *unidad de control de la energía*: tiene como función el accionamiento de los componentes de la unidad de energía para que se produzca la conversión de energía.
3. La *unidad de repostado de energía*: su función es permitir el aprovisionamiento de energía cuando las necesidades del vehículo así lo requieran.

## 2.1. UNIDAD DE ENERGÍA

La unidad de energía deberá dotar al vehículo de una correcta autonomía, pero igualmente deberá mantener prestaciones similares al vehículo actual, en cuanto a respuesta frente a cambios de velocidad, espacio ocupado en el vehículo, peso del vehículo, atendiendo igualmente a criterios de eficiencia y coste del combustible. [2]

La principal diferencia energética entre las baterías y las pilas de combustible viene dada por la diferencia entre la densidad de energía (Wh/kg) y la densidad de potencia (W/kg). Las pilas de combustible tienen una dinámica más lenta que las baterías al tener menor densidad de potencia, sin embargo, al tener mayor densidad de energía esta tecnología en un mismo volumen darían más autonomía al vehículo. (Ver Fig. 1). [3]

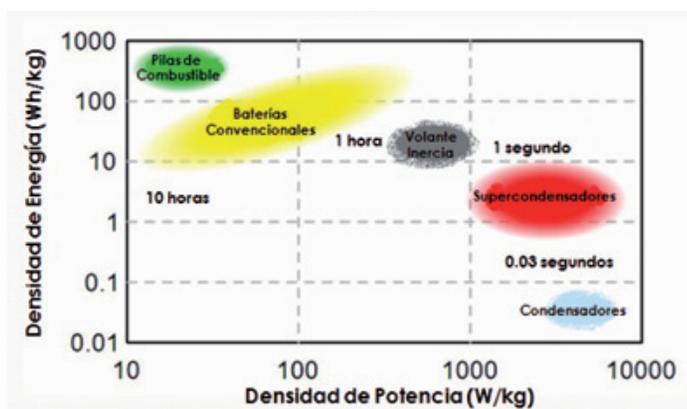


Figura 1: Plano de Ragone: Densidad de energía (Wh/kg) frente densidad de potencia (W/kg) de los distintos sistemas de almacenamiento de energía

Las diferencias en cuanto a densidad de potencia se traducen en un tiempo de respuesta distinto para cada una de las tecnologías. (Ver Fig. 2)

Una respuesta rápida frente a transitorios es sin duda un factor clave del sistema de almacenamiento de energía debido a la importancia de aceptar variaciones de demanda de potencia impredecibles. Sin embargo, es necesario tener en consideración otros aspectos como autonomía, ciclos de vida, eficiencia en tiempo de carga y descarga, infraestructura de repostado que a continuación son analizados. (Ver Tabla 1) [4][5]

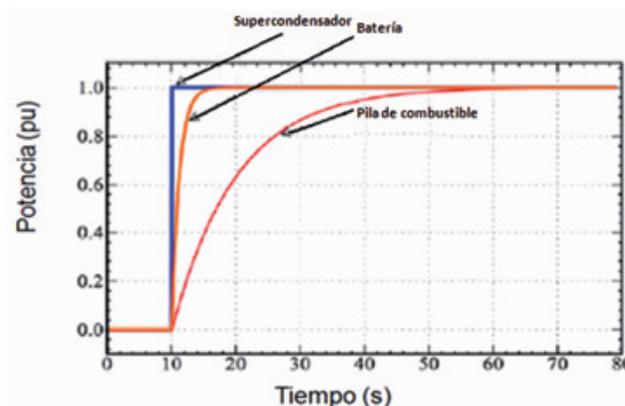


Figura 2: Tiempo de respuesta de los distintos sistemas de almacenamiento

Los supercondensadores tienen alta eficiencia en ciclos de carga y descarga y ciclos de vida cuasi-ilimitados, sin embargo, disponen de muy baja autonomía lo cual les inhabilita como opción de energía primaria. Tanto las baterías como las pilas de combustible tienen tiempos aceptables de autonomía teniendo mayor autonomía estas últimas por su mayor densidad de energía. A continuación, se describen otras ventajas e inconvenientes de las opciones actuales de almacenamiento de energía en el vehículo: [6]

- Las pilas de combustible podrían sustituir a las baterías por su menor peso. Se ganaría en densidad de energía (en comparación con las baterías, que aunque se ha avanzado mucho continúan siendo grandes y pesadas), y con un sistema del mismo tamaño y peso, conseguiríamos una autonomía superior.
- El inconveniente principal de los vehículos eléctricos de pila de combustible es básicamente el volumen necesario para el depósito de hidrógeno y el potencial peligro del mismo, ya que el hidrógeno ha de hallarse confinado bajo una presión de 350 bar o superior. No obstante, los tanques de hidrógeno comprimido del sistema de pila de combustible ocupan menos espacio que las baterías.
- La estrategia de propulsión eléctrica tanto por batería como por pila de combustible puede ser contaminante si la recarga de la misma o la producción de hidrógeno

	Supercondensador	Batería	Ciclo de hidrógeno
Densidad de energía específica (Wh/kg)	1-10	10-100	100-1000
Densidad de potencia específica (W/kg)	<10000	<1000	<100
Ciclos de vida	>500000 carga y descarga	1000 carga y descarga	5000 horas de funcionamiento
Eficiencia de carga/descarga	85-98%	70-85%	35-45% <sup>(1)</sup>
Tiempo de repostado	0.3-30s	1-5h	3-10 min
Tiempo de autonomía	0.3-30s	0.3-3h	2-6hr

(1) Dato basado en producción de hidrogeno a partir de electrolisis, compresión a 700 bar y eficiencia de uso de la pila de combustible

Tabla 1: Diferentes características de los principales sistemas de almacenamiento de energía

se realiza con energía contaminante. Sin embargo, la utilización de baterías siempre llevará ligado cierto nivel de contaminación debido a los materiales que utilizan. Sólo la estrategia híbrida con pila de combustible reduce en gran medida la emisión contaminante.

- La eficiencia en carga y descarga de las baterías es superior a la producción de hidrogeno para su posterior uso en la pila de combustible a bordo del vehículo.
- Las pilas de combustible cuando operan con bajo caudal de aire minimizan las perdidas parásitas asociadas con la potencia del dispositivo de suministro del caudal, están propensas a sufrir una falta de alimentación de oxígeno durante los cambios de carga incluso en los mejores diseños de la capa de distribución de gases. La baja estequiometría en oxidación temporal produce una caída del voltaje, dando como resultado un aumento de la temperatura local. El caudal insuficiente de gases asociado con la dinámica de cargas puede hacer que se acumule un exceso de agua y posiblemente bloquee la difusión de los reactantes. Condiciones de operación anómalas pueden causar no sólo pérdidas de rendimiento sino que también pueden provocar degradaciones irreversibles. Habitualmente se mantiene la relación de exceso

Siendo:

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,react}} \geq 2 \tag{1}$$

$W_{O_2,in}$  : caudal másico de entrada de oxígeno en el cátodo (kg/s).

$W_{O_2,react}$  : caudal másico de oxígeno que reacciona en la pila (kg/s).

- La vida útil de las baterías es mayor cuando los ciclos de carga y descarga son suaves.
- Los mayores problemas que se tienen en el supercondensador tienen lugar por limitaciones propias del cortocircuito provocado por la baja diferencia de potencial ante rápidas descargas, que podría dar lugar en niveles de intensidad excesivamente altos para las limitaciones propias de los convertidores de potencia.

**2.2. UNIDAD DE CONTROL**

La complejidad del control y los elementos auxiliares necesarios para la correcta operación del sistema es otro de los aspectos a considerar para la selección de una u otra tecnología. Este debe ser un criterio a valorar en cuanto a tiempos de desarrollo.

**2.2.1. Control de la pila de combustible**

El control de la pila de combustible tiene mayor complejidad que el de la batería por el número de componentes que ensamblan el balance de operación en planta de la misma. En la Figura 3, se muestra la complejidad del mismo, pudiéndose diferenciarse tres sistemas que conforman la unidad de la pila de combustible cuyo control es necesario:

A) Sistema de la pila de combustible.

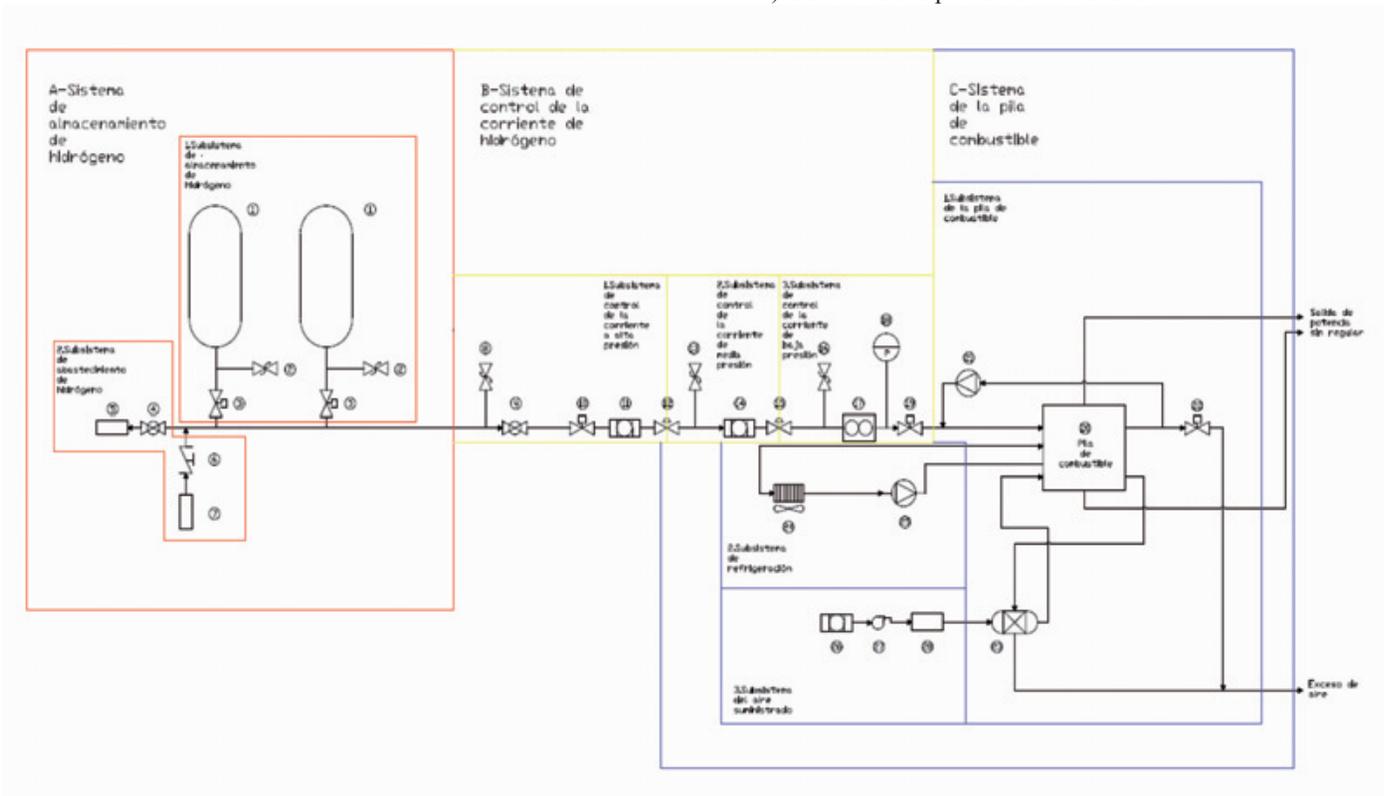


Figura 3: Balance de operación en planta del sistema pila de combustible

- B) Sistema de control de la corriente de hidrógeno.
- C) Sistema de almacenamiento de hidrógeno.

A continuación, se describe como se realiza el control de estos sistemas:

#### **A) Gestión de hidrógeno**

La gestión del hidrógeno se encarga de suministrar a la pila de combustible el aire y el combustible, hidrógeno, en este caso. El hidrógeno es comprimido en el tanque de alta presión de 700 bar, el hidrógeno se expande a presión de trabajo a través de una serie de subsistemas reductores de presión y alimenta al ánodo a través del inyector de gas hidrógeno. [7]

El oxígeno necesario para la reacción electroquímica es tomado desde el aire del ambiente. El aire es aspirado por el lado del cátodo de la pila de combustible a través de un filtro de aire a través de un compresor de cátodo y es comprimido aproximadamente a 1 o 2 bar. El compresor esencialmente asume la función de controlar el caudal de aire. La presión se ajusta mediante una válvula de control de presión dinámica, que es similar a la del actuador de la válvula de un motor de combustión interna. Para evitar que la membrana se seque, el suministro de aire a la pila de combustible se enriquece con el agua a través de un humidificador de gas.

#### **B) Control del proceso de arranque**

La energía eléctrica de la batería de 12 V del sistema eléctrico proveniente de la batería de tracción se utiliza para el arranque de la pila de combustible, al no producir esta energía hasta que se suministra hidrógeno y aire en el ánodo y cátodo respectivamente. El sistema eléctrico del vehículo de 12 V suministra potencia a la centralita de control que activa a la instrumentación asociada al ánodo y cátodo de la pila de combustible, para poder disponer de hidrógeno y oxígeno para realizar la reacción electroquímica. Este sistema debe de encenderse por desbloqueo remoto o mediante la llave de contacto.

El pre-acondicionamiento de la pila de combustible, consiste en varias etapas: el compresor de aire comienza a inyectar oxígeno en el cátodo, el suministro de hidrógeno desde el tanque de alta presión se libera y la bomba de agua comienza a funcionar. A temperaturas superiores a 0°C la pila de combustible es capaz en pocos segundos de realizar la producción de energía eléctrica. A temperaturas inferiores a 0°C de la fase de acondicionamiento tarda algo más dado que es necesaria una etapa de precalentamiento a través de resistencias situadas sobre el *stack* para evitar el estado sólido en los canales del *stack* de la pila de combustible, esto provocaría una degradación de la misma.

#### **C) Modo de conducción**

Durante la conducción, la potencia eléctrica requerida varía en función de la velocidad de la conducción, de las pendientes ascendentes y descendentes, etc. La gestión de la

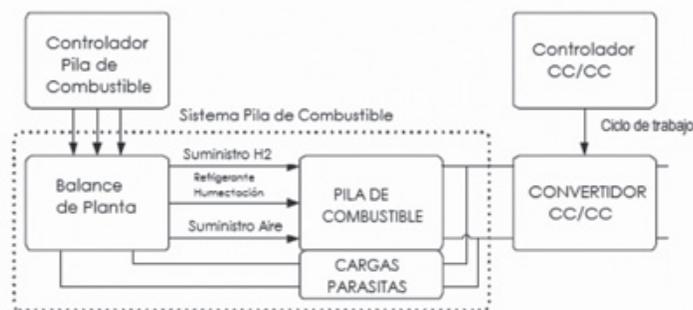
energía eléctrica regula el flujo de la corriente eléctrica, de tal forma, que la carga que suministra la pila varía en función de la demanda de los componentes del bloque de propulsión eléctrica. La gestión de la pila de combustible ajusta el suministro de gas y el sistema de refrigeración, de tal manera que la pila puede dar salida a la potencia demandada en el punto de funcionamiento óptimo. El calor residual de la pila de combustible se disipa a través de un circuito de refrigeración.

A corto plazo, los picos de potencia, por ejemplo, desde el arranque hasta que el vehículo alcanza una cierta dinámica o en procesos de aceleración o desaceleración del vehículo, deben estar cubiertos por la batería, ya que el sistema de célula de combustible sólo puede dar salida a la energía eléctrica con un pequeño retraso y de no ser así se podría producir mecanismos de degradación en la misma.

El objetivo de la estrategia de control para la gestión de la pila de combustible realiza las siguientes funciones:

- Entregar la potencia solicitada de manera que esté disponible lo más rápido posible.
- Asegurar que el funcionamiento del sistema de pila de combustible se realice con una eficiencia óptima.
- Disponer de una reserva de potencia para que pueda ser utilizada inmediatamente.

Figura 4: Diagrama de bloques del control del sistema pila de combustible



El control de la pila de combustible en modo conducción (como se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura 4) consiste en el control de suministro de los reactantes, control del agua/temperatura y control de la potencia. La pérdida de robustez en el control puede causar un acoplamiento cruzado de pérdidas durante los cambios dinámicos de la carga en el sistema de la pila de combustible. [7]

#### **D) Modo de repostado**

En el modo de repostado, la unidad de control abrirá la válvula correspondiente para permitir el abastecimiento de hidrógeno al depósito de almacenamiento de hidrógeno, cerrando la misma cuando se extraiga el surtidor.

#### **2.2.2. Control de la batería**

El control del vehículo eléctrico de batería es mucho más simple que el de pila de combustible por disponer de un balance de operación en planta menos complejo.

#### **A) Sistema de gestión de la batería**

El sistema de gestión de la batería mide la corriente de la batería y la tensión de las celdas individuales, así como su temperatura. El estado de carga de las celdas de la batería se determina a partir de estos datos. En el caso de sobrecarga o de exceso de temperatura se apaga el sistema o se desconecta para proteger dichas celdas.

El sistema de control de la batería no puede influir directamente en la corriente de carga o en el estado de la carga, sino que simplemente comunica el estado de la batería.

El sistema proporciona los límites de la corriente de carga y descarga o los límites de potencia. Es la función de la carga o la estrategia de operación la que mantiene el estado de carga dentro de unos puntos específicos sin exceder los límites de potencia específicos del sistema de gestión de la batería.

#### **B) Enfriamiento**

Con el fin de garantizar un funcionamiento seguro de la batería incluso estando bajo una carga muy fluctuante, la batería no debe exceder una temperatura de 45 - 60°C. La vida útil de una batería disminuye notablemente a medida que aumenta la media de la temperatura de la batería, ya que muchos procesos dependen del nivel de temperatura.

#### **C) Compensación del sistema de carga**

Debido a las reacciones secundarias, que dependen de los parámetros de las celdas y la temperatura de la célula, las celdas individuales tienen con el tiempo un estado de carga diferente. Esto desencadena en un problema, debido a que la célula con bajo estado de carga tiene que especificar el límite de descarga y la célula con un estado de carga mayor tiene que especificar el límite de carga.

#### **D) Estrategia de carga**

Siempre que la batería esté dañada por la carga y descarga, hay que tener en cuenta que, cuanto mayor sea el ciclo de carga y descarga mayor será el daño que se produzca en la misma. Sin embargo, los ciclos de carga y descarga son necesarios para aumentar la eficiencia de la transmisión, por ejemplo, por medio de la conducción eléctrica para proporcionar una recuperación posterior. La configuración de la estrategia de carga y el tamaño elegido de la batería, representa por lo tanto, un compromiso entre la batería y la vida útil, los costos y el peso de la misma, y por otro lado, la eficiencia de transmisión de dicha batería.

Normalmente se trata de mantener el estado de carga de la batería dentro de unos límites de aproximadamente el 50 - 70%. Si el estado de carga alcanza el 50%, es necesario asegurar una adecuada capacidad de la batería,

ya que esta decide sobre el impulso y por lo tanto la capacidad de aceleración del vehículo. La batería es por lo tanto, intensamente recargada cuando se alcanza el límite inferior del estado de carga de la misma. La capacidad de descarga se reduce lentamente hasta llegar a cero solamente cuando una gran parte del estado de carga es inferior. En el funcionamiento normal de conducción del vehículo prácticamente nunca se llega a este límite y el conductor siempre realiza la aceleración con un rendimiento óptimo.

### **2.3. UNIDAD DE REPOSTADO**

Conseguir tiempos de repostado similares a los de los vehículos convencionales será otro de los retos a conseguir para la correcta implantación del vehículo eléctrico.

#### **2.3.1. Pila de combustible**

La velocidad de repostado es un problema técnico, que afectará al diseño del esquema de carga y dependerá del tipo de combustible que se imponga: hidrógeno comprimido, licuado o combinado en un compuesto líquido.

No obstante, actualmente se consiguen repostados de 15 minutos para vehículos de gran tamaño y de 2-5 minutos para vehículos de menor tamaño.

Las partes fundamentales de una estación de servicio que se verán afectadas por una transición del parque automovilístico actual basado en petróleo a uno basado en hidrógeno serán:

- Surtidor.
- Sistema de carga.
- Sistema de almacenamiento.
- Sistemas de seguridad.
- Sistema de abastecimiento.

El primero de estos equipos sufrirá cambios diferentes dependiendo del modo de suministrar el hidrógeno que se imponga. Así, si la manera de cargar el hidrógeno en el vehículo es combinado con un compuesto químico (líquido), los cambios serán apenas apreciables. El surtidor tendrá que soportar temperaturas muy bajas, y por lo tanto, se necesitarán materiales especiales, y un sistema de retorno del hidrógeno evaporado (inevitablemente en el momento de la carga).

Por último, en el caso más probable de que sea el hidrógeno gaseoso lo que se cargue en el vehículo, aún queda la incertidumbre de la presión a la que se ha de suministrar. Esta presión dependerá exclusivamente del sistema de almacenamiento del automóvil. En la actualidad, el sistema más extendido es en tanques de hidrógeno comprimido. Hasta la fecha se están utilizando presiones de entre 250 bar y 450 bar, aunque ya hay proyectos en curso para llegar hasta 750 bar. El uso de presiones tan altas va encaminado a una mayor autonomía de los vehículos, pero implica un manejo más complejo del hidrógeno, especialmente desde el punto de vista de la seguridad. El aumentar la presión de carga implica un aumento en el peso del surtidor, por lo que dificulta su uso por el público en general. Otro aspecto que se verá afectado

es la medida de cuando se ha cargado. Esta probablemente se haga en términos máxicos, e implicará la medida de la temperatura y presión del sistema de almacenamiento de vehículo [8]

El surtidor de hidrógeno, a pesar de la temperatura del gas remanente en su interior debida a la presurización del mismo, no tiene la capacidad de calcular el volumen libre del depósito del vehículo a repostar. Por lo tanto, el surtidor inyectará primero un pequeño volumen de muestra, de esta forma se miden los cambios de presión y de temperaturas que indicarán a la estación de control programable del surtidor de capacidad libre que le resta al tanque.

En el caso, de ser suministrado así, el surtidor tendrá que soportar temperaturas muy bajas (-252°C) y un sistema de retorno del hidrógeno evaporado (generado de forma inevitable en el momento de la carga). Un importante inconveniente que presenta el repostaje de hidrógeno líquido, parte de la necesidad de incrementar la temperatura del dispositivo inyector del surtidor antes de iniciar la operación. [9]

El hidrógeno se almacena en depósitos de alta presión, así en el momento de transferir el gas al vehículo a repostar, el trasvase se producirá por diferencia de presiones al tanque del automóvil. El uso de presiones tan altas conllevaría una mayor autonomía del vehículo aunque tiene por contrapartida condiciones más complejas para garantizar la seguridad en el suministro. Un aumento en la presión de suministro de hidrógeno conlleva un aumento en el peso del surtidor, lo cual, dificultaría el uso público, en general.

Para reducir el consumo energético, el “sistema de cascada” se compone de varios grupos de depósitos múltiples a diferentes presiones.

Este sistema requiere una presión de almacenamiento de 440 bar, para repostar vehículos con depósitos diseñados para contener el hidrógeno a 350 bar. El suministro a depósitos de 700 bar requerirá que los tanques de suministro del sistema mantengan el gas confinado a 880 bar.

### 2.3.2. Batería

La recarga del vehículo eléctrico basado únicamente en baterías, es uno de los mayores problemas para el desarrollo de los vehículos eléctricos basados exclusivamente en esta tecnología, siendo limitaciones físicas de las propias baterías la causa de este problema. Llenar un depósito de combustible ya sea un vehículo de hidrógeno, gasolina o gasoil tiene un tiempo de repostado del orden de 2 a 10 minutos, sin embargo, en los vehículos eléctricos de baterías el tiempo de recarga óptimo para que no sufra la batería oscila entre 2 y 4 horas.

Atendiendo a la forma de recarga de la batería se tienen distintas estrategias:

- Remplazando la batería descargada.
- Recargando la batería del mismo vehículo: el sistema de recarga puede estar integrado al vehículo o colocado de manera independiente, en un lugar fijo y la recarga

puede ser rápida usando unos cuantos minutos o lenta alrededor de 8 horas [10]

Las baterías presentan dos ventajas fundamentales: su comportamiento bidireccional les permite recargarse mediante frenada regenerativa, y la disposición de una infraestructura de recarga doméstica simple, dándoles por ello la posibilidad de ser recargadas en el propio domicilio del conductor.

## 3. RESULTADOS

La arquitectura que se seleccione deberá cumplir criterios de eficiencia y respeto con el medio ambiente, al mismo tiempo que mantenga unas prestaciones similares a la configuración original, tanto en velocidad, aceleración, tiempo de repostado y confort.

Para la definición de la arquitectura del vehículo se parte de los ciclos estandarizados. Los ciclos tienden a ser bastante más sencillos, con períodos de aceleración constante y velocidad constante. El ciclo ECE-15 es útil para probar el rendimiento de los vehículos pequeños, como los coches eléctricos de batería; este ciclo de conducción representa la conducción urbana. Se caracteriza por pruebas de baja velocidad (máx.50 km/h) y carga del motor baja. En las pruebas de emisión de la CE se tiene que combinar con el ciclo de conducción en carretera europeo (EUDC), que tiene una velocidad máxima de 120 km/h. Este ciclo describe una ruta

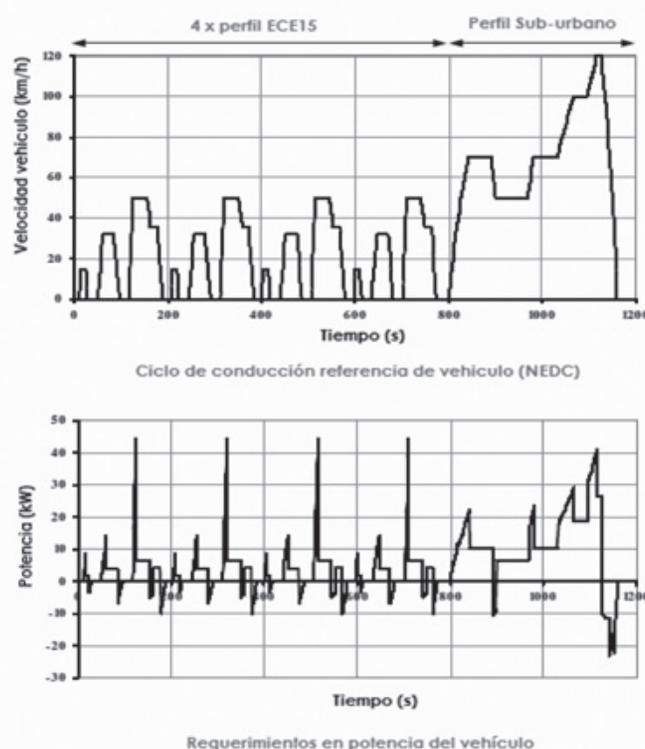


Figura 5: Perfiles de potencia y velocidad tipo en el nuevo ciclo de conducción europeo (NEDC)

suburbana. Al final del ciclo, el vehículo acelera a velocidad de autopista. En la Figura 6 se hace una comparativa entre los requerimientos de potencia y velocidad del vehículo cuando este se somete al nuevo ciclo de conducción europeo (NEDC, *New European Driving Cycle*). El ciclo NEDC representa el uso típico de un automóvil en Europa, en el se tienen cuatro ciclos repetidos (ECE-15) que representan el comportamiento en ciudad y un ciclo (EUDC, *Extra-Urban driving cycle*).

Como se observa en la figura siguiente los requerimientos de potencia del vehículo están compuestos por una demanda de potencia base y distintos picos de potencia dados por las variaciones en la demanda de velocidad y las frenadas realizadas en el vehículo.

Con las conclusiones desarrolladas se llega al establecimiento de los siguientes criterios de diseño en el vehículo:

- 1) Dada la posibilidad de utilizar la recarga doméstica, el vehículo tendrá un sistema de baterías suficiente para ser utilizado en trayectos urbanos donde la velocidad no sea superior a 50 km/h. En dichos trayectos no funcionará la pila de combustible salvo por elevada descarga de las baterías. Dada la dinámica más rápida de los supercondensadores estos abastecerán los picos de potencia en estos trayectos.
- 2) Dada la limitada autonomía de las baterías para trayectos suburbanos, se establece que para velocidades superiores a 50 km/h se utilice la pila de combustible como fuente principal de energía, utilizando la batería sólo cuando los requerimientos de velocidad demandados por el usuario haga necesario que trabajen en paralelo ambas fuentes de energía.
- 3) Dada la lenta dinámica en cuanto a variaciones de carga de la pila de combustible, cuando esta esté funcionando trabajará de manera híbrida con la batería y el supercondensador para abastecer picos de potencia en aceleración suburbana.

#### 4. DISCUSIÓN

La combinación de los distintos sistemas de almacenamiento expuestos: pila de combustible, batería y supercondensador, permite abastecer aplicaciones desde transitorios de picos de potencia hasta una potencia media prolongada en el tiempo, generándose una fuente de potencia virtual con alta potencia específica y alta energía específica.

Atendiendo al coste de la energía, la eficiencia de la batería en ciclo de carga y descarga de un 70-85% frente a una eficiencia de producción de hidrogeno frente a electrolisis con sus etapas de compresión y descompresión para su uso posterior en la pila de combustible a bordo del

vehículo del 35-45%, por lo que, siempre que las limitaciones de tiempo de repostado y autonomía no sean restrictivas el coste del desplazamiento será menor si se usa la batería que la pila de combustible, siendo por tanto, la tecnología de las baterías la más indicada para desplazamientos urbanos. Este aspecto tiene mayor relevancia, si se tiene en consideración la disposición de una infraestructura de recarga doméstica para las baterías.

Los tiempos de repostado mejores y la autonomía del vehículo de pila de combustible lo hacen más apropiado para los desplazamientos extra-urbanos.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chan CC, Wong YS. "Electric Vehicle Charge Forward". 2004. Power Energy Mag. Vol.2. no.6. p. 24-33. ISSN: 1540-7977
- [2] Liang J, Chunmei F. "Stability Improvement of Microgrids with Coordinate Control of Fuel Cell and Ultracapacitor". En: *Power Electronics Specialists Conference, 2007. IEEE, (Orlando 17-21 de Junio 2007)*. ISBN: 978-1-4244-0655-5
- [3] Thomas CE. "Fuel cell and battery electric vehicles compared", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34., no.15 . 2009. p. 6005-6020.
- [4] Chicón-Domínguez JC, Vidal-Sanz N. "Los coches híbridos". Colegio de Ingenieros Industriales de Cataluña, 2006.
- [5] Baumann J. "Advances in Fuel Cell Design". Director: Kazerani M. University of Waterloo, Department of Electrical and Computer Engineering. Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [6] Thomas CE. "Comparison of transportation options in a carbon-constrained world: hydrogen, plug-in hybrids and biofuels." 2009. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34. p. 9279-9296.
- [7] Hui L, Danwei L. "Power distribution strategy of fuel cell vehicle system with hybrid energy storage elements using triple half bridge (THB) bidirectional DC-DC converter. 42nd IAS annual meeting. Conference record of the 2007 IEEE industry applications conference; 2007. p. 636-642.
- [8] AIR LIQUIDE – DTA. "Handbook for Hydrogen Refuelling Station Approval". Project Hyapproval. Deliverable 2.2, Version 2.1, 4 Junio 2008.
- [9] Girón Monzón E. "IV Curso de Hidrogeno y Pilas de Combustible". Asociación Española del Hidrogeno. Madrid. Octubre, 2005.
- [10] Suh KW. "Modelling, Analysis and Control of Fuel Cell Hybrid Power Systems". Director: Anna G. Stefanopoulou. University of Michigan. Department of Mechanical Engineering. Michigan, USA, 2007.