

# Análisis de estrategias de control aplicadas al sistema de distribución de potencia de vehículos eléctricos con múltiples fuentes de energía

Víctor Díaz Alías, Andrés Barrado Bautista, Antonio Lázaro Blanco, Cristina Fernández Herrero  
 Grupo Sistemas Electrónicos de Potencia, Universidad Carlos III de Madrid  
 Av. Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid  
 victor.diaz@uc3m.es, andres.barrado@uc3m.es

**Resumen**—Los vehículos que funcionan basados en el uso de pilas de combustible (FCEV—Fuel Cell Electric Vehicle) como fuente primaria de energía, necesitan de una o varias fuentes de energía secundarias para suministrar potencia al motor o a los motores eléctricos que propulsan el vehículo. Esto es debido a la reducida respuesta dinámica, y las limitaciones en la dirección de la energía que presentan las pilas de combustible. Por lo tanto, es necesario estudiar diferentes arquitecturas de control para optimizar el funcionamiento del sistema completo y, por consiguiente, reducir el consumo de combustible, y mejorar las prestaciones del sistema.

En este trabajo, se han estudiado diferentes arquitecturas de control propuestas en el estado de la técnica, junto con otras propuestas originales. Estas arquitecturas se comparan mediante simulación para encontrar diferencias en su funcionamiento, sus ventajas e inconvenientes, y de este modo discernir cuál de ellas es la arquitectura de control óptima para este tipo de sistemas.

**Palabras clave**—Vehículo eléctrico, supercondensador, batería, control, arquitectura, pila de combustible.

## I. INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, PEMFC (*Proton-exchange membrane fuel cell*), son elementos electroquímicos capaces de obtener potencia eléctrica a partir de reacciones químicas que combinan hidrógeno y aire como combustible, generando como residuo agua y calor.

Este tipo de fuente de alimentación son una opción mucho más limpia que las actuales tecnologías, basadas en el uso total o parcial de combustibles derivados del petróleo, utilizadas para la alimentación de vehículos, ya que el residuo y los gases que emiten se reducen a vapor de agua. El funcionamiento de las pilas presenta una reducida respuesta dinámica, ya que el combustible ha de poder moverse por diferentes cavidades desde el tanque o depósito hasta la propia pila, impulsado a través de válvulas mecánicas, etc. Adicionalmente, la propia reacción química no se produce de manera instantánea, sino que lleva un cierto tiempo. Por estas razones, las pilas de combustible precisan de elementos de apoyo que sean capaces de suministrar potencia con una mayor respuesta dinámica.

Los principales elementos de apoyo a la pila de combustible son los supercondensadores y las baterías. Los supercondensadores tienen una densidad de potencia muy alta, pero una densidad energética muy baja. Esto significa que pueden proporcionar mucha potencia de manera casi instantánea pero que poseen una carga reducida, por lo que solo pueden hacerlo por un periodo muy limitado de tiempo. Este elemento será el que proporcione la potencia correspondiente a los escalones y variaciones bruscas de la energía demanda

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España y la Agencia Estatal de Investigación (AEI), a través de los proyectos de investigación CONEXPOT (DPI2017-84572-C2-2-R), EPIHOT (DPI2017-88062-R) e HIDRON (PID2020-116500RB-I00), y la Consejería de Ciencia, Universidades e Innovación de la Comunidad de Madrid a través del proyecto DROMADER-CM (Y2020/NMT-6584).

por el sistema. Las baterías son elementos intermedios entre el supercondensador y la pila de combustible, su densidad de potencia es más baja que la del supercondensador, no puede entregar potencia de manera tan rápida, mientras que su densidad energética es mucho más alta, de modo que son capaces de almacenar bastante energía y suministrarla durante un tiempo mucho mayor.

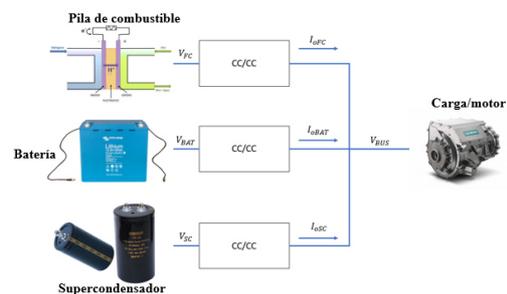


Figura 1: Representación del sistema multifuente para un vehículo con pila de combustible.

De esta manera, se tiene un sistema multifuente donde la pila de combustible, con menor respuesta dinámica, entrega el nivel medio o las variaciones más lentas de la demanda. El supercondensador por su parte suministra las variaciones más rápidas, como escalones y variaciones bruscas y rizados en la salida del sistema; y, por último, la batería trabaja en un punto intermedio, asumiendo la potencia de frecuencias medias y almacenando energía.

En una configuración más general y flexible, cada una de estas fuentes está conectada a un convertidor de potencia que alimenta a un bus, donde está conectado, en este caso, el motor y el resto de servicios auxiliares. Este motor puede ser tanto de corriente continua como de corriente alterna. En ambos casos, se requiere de un convertidor o *driver* específico, entre el bus y el motor, para acondicionar y controlar la energía.

En el presente artículo, se estudian varias arquitecturas de control con el objetivo de obtener la manera óptima de controlar este tipo de sistemas, en el que varias fuentes alimentan a una sola carga, y en el que cada una de estas fuentes posee determinadas características que las hacen óptimas para trabajar en ciertas condiciones.

## II. ESTRATEGIAS DE FUNCIONAMIENTO

Debido a que se trabaja con un sistema multifuente es necesario generar arquitecturas de control capaces de distinguir entre los diferentes tipos de fuentes, con sus características básicas, y que sea capaz de fijar la potencia adecuada que ha de entregar cada una de ellas.

Existen dos aproximaciones generales para abordar el problema, un control con arquitectura en cascada y un control por filtrado. La principal diferencia entre estos dos tipos de controles radica en el modo de controlar la carga de la batería y del supercondensador.

En la arquitectura en cascada el control de la carga de los componentes se hace de manera implícita, como se puede apreciar en la Figura 2. El supercondensador se activa cuando se produce un error en la tensión de salida, al entregar energía el supercondensador varía su carga lo que activa el convertidor de la batería. Del mismo modo, la batería comenzará a variar su tensión lo que activará la pila de combustible. En el modelado de la pila de combustible y de la batería es necesario asegurar que el sistema de control demande potencia de acuerdo con las capacidades dinámicas de cada fuente.

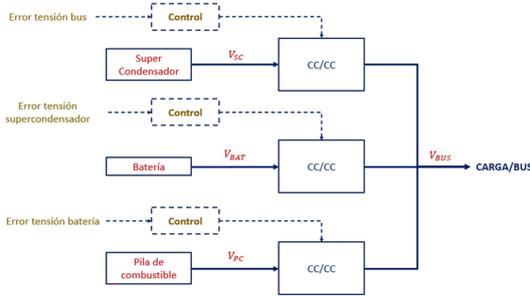


Figura 2: Arquitectura con control en cascada.

Gracias a esta configuración la tensión de los componentes está controlada de manera implícita, pero el sistema tiene un cierto retardo en el arranque, ya que las fuentes se van encendiendo de manera secuencial. En primer lugar, se activa el supercondensador, después la batería, y por último la pila de combustible, por lo que el sistema completo tarda algo más en estabilizarse y en alcanzar un punto de trabajo.

La segunda opción, ilustrada en la Figura 3, presenta una segunda manera de controlar el sistema, que funciona con un principio distinto. En este caso todas las fuentes se activan directamente con el error de la tensión de salida. Se calcula la potencia que deberían entregar el conjunto de las tres fuentes para mantener la tensión de salida controlada, y posteriormente se divide esta potencia de referencia de acuerdo con la frecuencia. De tal manera, que las frecuencias bajas las entregue la pila de combustible, las medias la batería y las altas el supercondensador.

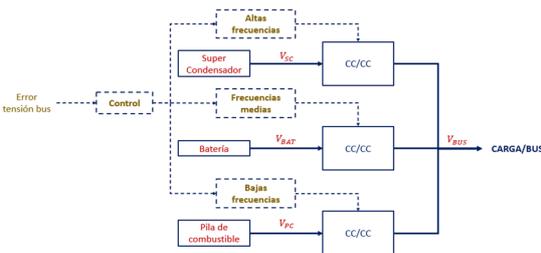


Figura 3: Arquitectura con control por filtrado.

Al comparar las dos opciones se observa que el control por filtrado no posee el retardo típico del control en cascada. Asimismo, se comprueba que en este segundo caso la carga tanto de la batería como del supercondensador no están reguladas de ninguna manera, lo que puede resultar en una descarga de éstas.

Por último, es preciso matizar que los convertidores de potencia asociados al supercondensador y la batería, en esta aplicación, han de ser bidireccionales. Suele ser habitual que alguna de las fuentes secundarias tenga que almacenar energía durante los procesos de frenado regenerativo, o cuando la pila de combustible genera energía en exceso ante escalones de demanda. De modo que tanto los convertidores como el control que se implemente han de permitir un flujo de energía en ambas direcciones.

### III. ARQUITECTURAS ANALIZADAS

Con el fin de encontrar una arquitectura que funcione de manera óptima, esto es, que cada componente entregue una potencia de acuerdo con su respuesta dinámica y características, se han diseñado y analizado seis arquitecturas de control para ser comparadas entre sí y poder estudiar sus diferencias. Dos de estas arquitecturas han sido extraídas de [1] y [2], una siguiendo la configuración en cascada y otra la configuración por filtrado. Adicionalmente, se han diseñado otras cuatro arquitecturas partiendo del control por filtrado. Estas arquitecturas de control fijan la potencia que han de entregar cada una de las fuentes, atendiendo a su respuesta dinámica.

#### A. Arquitectura en cascada

La primera de las opciones [1], presenta un control en cascada. Este control se basa en la estrategia descrita en la Figura 2.

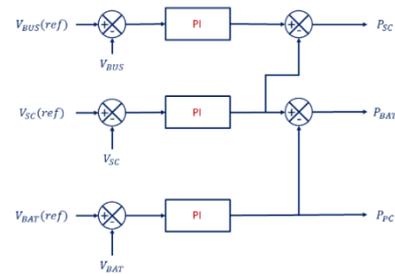


Figura 4: Arquitectura en cascada.

Como se puede observar en la Figura 4 el error de tensión en el bus fija la potencia que debe entregar el convertidor conectado a los supercondensadores, de modo que cuando cae la tensión del bus por un aumento en la demanda los supercondensadores son los primeros en reaccionar. Dado que su densidad energética es muy baja, su tensión variará de manera rápida. Es en ese momento cuando entra en funcionamiento el segundo controlador, que fija la potencia que ha de suministrar el convertidor conectado a la batería, para que ésta entregue la potencia necesaria para la recuperación de la tensión nominal del supercondensador. Por último, de manera análoga, se activará el controlador de la batería cuando ésta lleve unos instantes entregando potencia y su carga empiece a disminuir, actuando sobre la pila de combustible que entregará la potencia necesaria para que la batería se estabilice en su tensión de referencia. De esta manera se consigue un funcionamiento en régimen permanente en el que cada fuente entrega la potencia necesaria a la carga para regular la tensión de una de las fuentes secundarias.

#### B. Arquitectura basada en filtrado

Las cinco opciones restantes se han diseñado partiendo del modelo de control por filtrado. Este tipo de control solo precisa de un regulador, y, por consiguiente, todas las fuentes se activan al mismo tiempo.

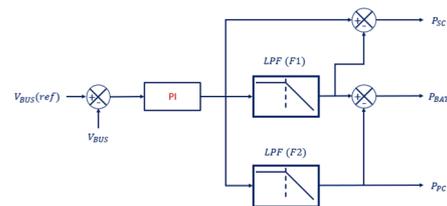


Figura 5: Arquitectura basada en filtrado.

En este caso, el error de tensión en el bus es el único valor regulado. Este error produce una potencia de referencia que

han de suministrar las tres fuentes en conjunto. En otras palabras, la potencia que fija el regulador es la potencia que ha de entregar el sistema completo para que la tensión de salida se mantenga en el valor de referencia. Dada la naturaleza de las fuentes, cada una de ellas tiene una respuesta dinámica diferente, como ya se ha comentado previamente, por lo que es preciso filtrar esta potencia de referencia y separarla en bajas frecuencias, medias frecuencias, y altas frecuencias. Con este fin, se introducen los dos filtros paso bajo ilustrados en la Figura 5. Para el correcto funcionamiento del sistema, la frecuencia de corte del filtro (F1) de la batería debe ser mayor que la frecuencia de corte del filtro (F2) de la pila de combustible.

El primer paso para poder separar los tres rangos de frecuencias es eliminar las medias y altas frecuencias, por lo que se introduce la señal de salida del regulador (PI) en un filtro paso bajo de muy baja frecuencia (F2), y en un filtro paso bajo de media frecuencia. El primero, dejará pasar únicamente las variaciones muy lentas, y el segundo las variaciones lentas y de media frecuencia. De esta manera, la salida de F2 se corresponde con la señal que activará el convertidor conectado a la pila de combustible. La salida de F1 menos la salida de F2 se corresponde con la señal que activará el convertidor conectado a la batería. Y finalmente, la señal sin filtrar, corresponderá con la señal que activará al convertidor conectado a los supercondensadores. Una vez separada la potencia de referencia en sus tres espectros, solo es necesario mandar esta información a los moduladores de cada uno de los convertidores para que cada una de las fuentes entregue la potencia necesaria.

Este esquema estudiado se corresponde con el sistema por filtrado general, esto es, sin controlar la tensión de la batería ni de los supercondensadores. Para solucionar este inconveniente se ha introducido el módulo SOC (state of charge). Este módulo regulará la tensión de las fuentes secundaria evitando de esta manera su descarga. Las cinco opciones restantes poseen la misma arquitectura de control mostrada en la Figura 5, la única variación entre ellas es la manera en la que se implementa este control SOC. La primera de las opciones [2] se ilustra en la Figura 6.

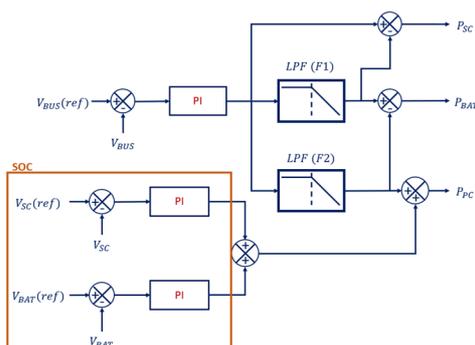


Figura 6: Primera arquitectura con los controladores actuando de manera conjunta [2] (Fil\_J\_1).

En esta primera opción, tanto el regulador de la tensión de la batería como el de la tensión del supercondensador actúan en el mismo punto. La influencia de ambos controladores se añade a la potencia a entregar de la pila de combustible. Se trata de la primera opción de filtrado donde ambos reguladores actúan sobre la misma potencia de referencia (Fil\_J\_1).

La segunda opción, Figura 7, se asemeja mucho a la primera ya que la influencia de ambos reguladores se introduce al sistema principal de manera conjunta. No obstante, en este caso, esta influencia se introduce antes del filtrado de la señal, de este modo se asegura que no se demandará de la pila de combustible variaciones de potencia bruscas. Esta arquitectura

de control corresponde a la segunda opción de filtrado donde ambos reguladores se encuentran juntos (Fil\_J\_2).

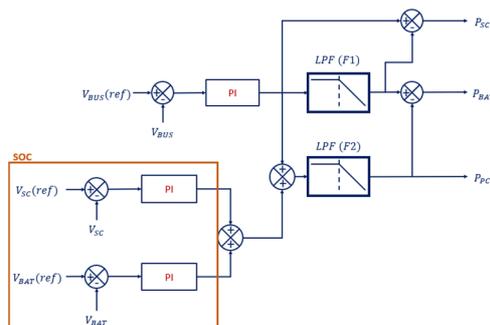


Figura 7: Segunda arquitectura con los controladores actuando de manera conjunta (Fil\_J\_2).

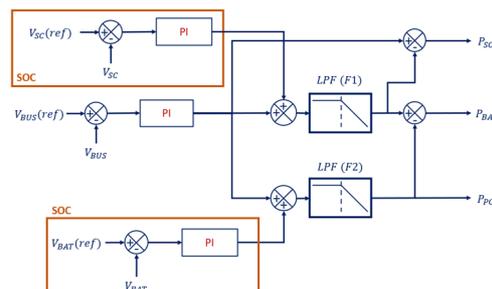


Figura 8: Primera arquitectura con los controladores actuando de manera independiente (Fil\_S\_1).

En la arquitectura ilustrada en la Figura 8, se han separado los puntos en donde actúan los reguladores de tensión encargados de la recarga de las fuentes secundarias, de modo que sea la batería la que controle la carga del supercondensador, y la pila de combustible la carga de la batería, ya que tienen respuestas dinámicas más afines. La influencia de ambos reguladores se ha introducido antes del filtrado de la señal, con el fin de que no se demanden de estas fuentes potencias con una respuesta dinámica mayor a la que pueden dar. Esta arquitectura de control se trata de la primera opción de filtrado donde ambos reguladores se encuentran separados (Fil\_S\_1).

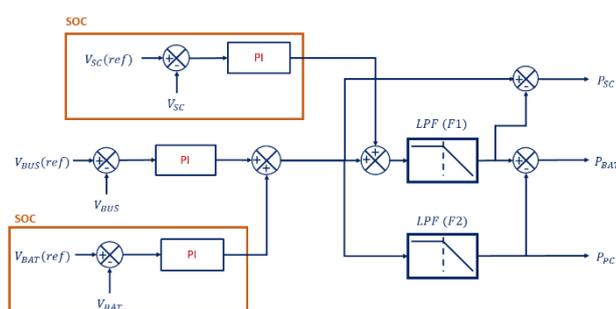


Figura 9: Segunda arquitectura con los controladores actuando de manera independiente (Fil\_S\_2).

La arquitectura de la Figura 9 se asemeja mucho a la arquitectura previa (Fil\_S\_1). En ambos casos los reguladores actúan en diferentes puntos del sistema, y de la misma manera la carga de la batería es controlada por la pila de combustible y la del supercondensador por la batería. La diferencia radica en el lugar en el que se introduce el efecto del regulador de la tensión de la batería. En este caso, se introduce justo a la salida del regulador de la tensión del bus, antes de que la arquitectura empiece a ramificarse, con el fin de que todas las fuentes puedan actuar sobre el error de la batería. Esta arquitectura de control se trata de la segunda opción de filtrado donde ambos reguladores se encuentran separados (Fil\_S\_2).

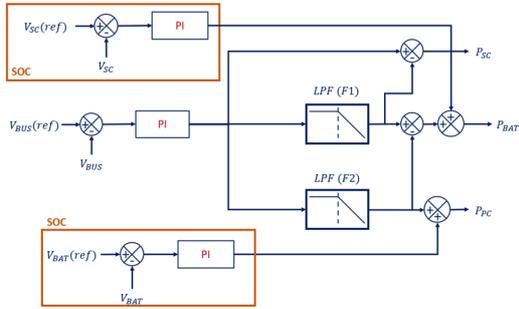


Figura 10: Tercera arquitectura con los controladores actuando de manera independiente (Fil\_S\_3).

Por último, se propone la arquitectura ilustrada en la Figura 10. En ella, al igual que en los dos últimos casos, la influencia de los reguladores de tensión se introduce en dos puntos diferentes del sistema, pero en este caso esta influencia se aplica después de los filtros. Con esto se pretende evitar retardos en la respuesta del sistema completo. Esta arquitectura de control se trata de la tercera opción de filtrado donde ambos reguladores se encuentran separados (Fil\_S\_3).

#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para realizar la comparación se ha implementado en PSIM tanto la etapa de potencia, como las seis diferentes arquitecturas de control. Todas las arquitecturas de control han sido sometidas a dos tipos de demandas de carga, una con una alta respuesta dinámica, para simular el comportamiento del vehículo en una ciudad, con grandes aceleraciones, paradas, y deceleraciones; y otra con una baja respuesta dinámica, para simular una aceleración suave, como podría suceder en una autopista, modelada como un escalón de demanda filtrando las altas frecuencias. El objetivo de someter el sistema a distintos tipos de demanda es comprobar su buen funcionamiento en ambos casos y de esa manera asegurar que el sistema funciona bien en cualquier entorno.

El sistema completo se ha implementado en PSIM, las tres fuentes de alimentación han sido modeladas de diferentes maneras con el fin de obtener una respuesta dinámica similar al real. Para los convertidores de potencia se ha optado por una topología reductor-elevador no inversor de cuatro interruptores, Figura 11. Se ha seleccionado este convertidor por ser bidireccional, por el amplio rango de tensiones de entrada-salida con el que puede operar, y por la simplicidad del control asociado.

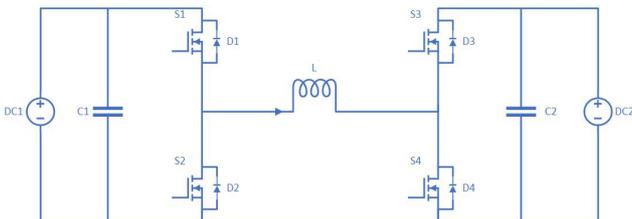


Figura 11. Convertidor reductor elevador de cuatro interruptores [4].

##### A. Modelado

Con el fin de poder simular el sistema completo es necesario modelar las diferentes fuentes de alimentación de acuerdo con su respuesta dinámica. El funcionamiento interno de la pila de combustible no es relevante para el estudio del sistema multifuente. Por esta razón, se ha modelado la pila como una fuente de tensión, a la que no se le va a demandar potencias con respuesta dinámica rápida, para ellos se ha incluido en todos las arquitecturas de control el filtro F2. En serie con la fuente de tensión se ha incluido una resistencia para emular las variaciones de la tensión de la pila a medida que aumenta la carga.

La batería ha sido modelada de dos maneras diferentes. En el primer caso, se ha utilizado el modelo facilitado por PSIM. Este modelo es muy exacto, pero requiere mucho tiempo de simulación, por esta razón, y dado que era necesario realizar un gran número de simulaciones, se ha modelado la batería de un segundo modo mucho más simple. Este modelo consiste en una fuente de tensión con una resistencia y un condensador en serie, y una resistencia en paralelo con todo el conjunto anterior. Este modelo es menos exacto, pero mucho más rápido de simular. Dado que la respuesta dinámica de la batería conseguida con ambos modelos es muy similar, de manera general se ha utilizado el modelado más simple y tan solo se ha simulado el diseño con el modelado de PSIM para hacer comprobaciones puntuales. Adicionalmente para emular la respuesta dinámica de la pila de combustible, se han añadido filtros específicos.

Por último, el supercondensador ha sido modelado de manera más compleja que las dos fuentes previas, su modelo ha sido extraído de [3]. Este modelo reproduce de manera fiable el comportamiento real del supercondensador.

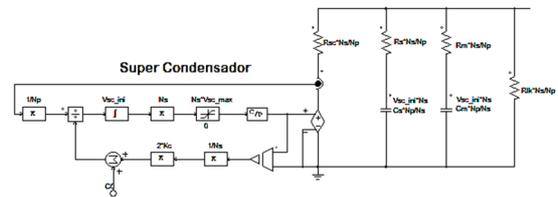


Figura 12: Modelo del supercondensador.

##### B. Tiempo de estabilización.

Tal y como se ha comentado al comienzo del capítulo, se han simulado los seis modelos de arquitecturas ante dos tipos de demanda distintos, obteniéndose un total de doce simulaciones. Estas simulaciones han sido comparadas entre sí para buscar diferencias y errores producidos por el propio control del sistema. La primera diferencia se ilustra en la Figura 13.

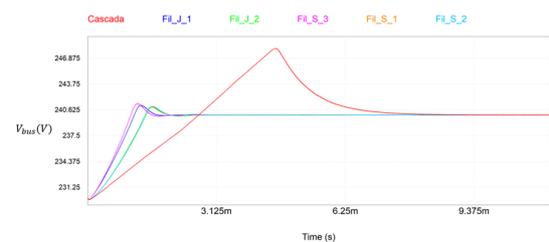


Figura 13: Tiempo de estabilización del sistema dependiendo de la arquitectura de control.

Se puede apreciar como la arquitectura en cascada presenta un mayor tiempo de estabilización. Del mismo modo, se puede apreciar como esta arquitectura alcanza una mayor sobretensión en la tensión del bus. Este fenómeno era de esperar por el modo de funcionamiento de la arquitectura, dado que los componentes en este caso se activan de manera secuencial. Es preciso aclarar que este fenómeno solo ocurre en el arranque del vehículo, una vez todas las fuentes se han activado el sistema responde de una manera muy similar a las arquitecturas de funcionamiento por filtrado.

##### C. Carga de los supercondensadores.

La segunda diferencia encontrada corresponde con el control de la tensión del supercondensador. En las arquitecturas donde es la pila de combustible la que regula esta tensión (Fil\_J\_1, y Fil\_J\_2) se puede apreciar que la tensión del supercondensador tiene transitorios mayores al resto de arquitecturas, errores de tensión superiores, e incluso la tensión

del supercondensador llega a estabilizarse en valores diferentes a la tensión de referencia. En la Figura 14, se muestra la tensión del supercondensador controlada por las diferentes arquitecturas. El resto de las arquitecturas no representadas responden de una manera muy similar a FIL\_S\_1.

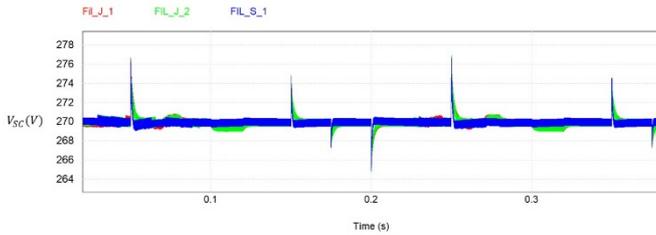


Figura 14: Detalle de la tensión del supercondensador.

Se puede apreciar como en la arquitectura Fil\_S\_1 el valor de tensión está muy regulado obviando los transitorios. Sin embargo, en Fil\_J\_1 y Fil\_J\_2, ante los mismos estímulos, la tensión varía más, llegando incluso a estabilizarse en una tensión que no es la esperada. Esta diferencia se debe a la respuesta dinámica de la pila de combustible. Al variar la carga del supercondensador de manera brusca, el control aumenta la potencia que debe entregar la pila de combustible para regular la tensión del supercondensador, pero al ser la respuesta dinámica de la pila de combustible muy lenta, tarda mucho en entregar esta potencia, de modo que la tensión del supercondensador no está regulada en ese tiempo. Esta diferencia puede evitarse haciendo que el error en la tensión del supercondensador sea regulado por la batería, con una respuesta dinámica más afín, en vez de por la pila de combustible, como en Fil\_S\_1, Fil\_S\_2, y Fil\_S\_3.

#### D. Potencia de la pila de combustible.

La siguiente diferencia se encuentra en el modo en que la pila de combustible entrega la potencia. En dos de las arquitecturas propuestas, Fil\_J\_1 y Fil\_S\_3, la influencia de los reguladores de carga de la batería y el supercondensador (SOC) se añaden tras el filtrado F2, lo que puede llegar a demandar de la pila de combustible una potencia con elevada respuesta dinámica. La gravedad de esta diferencia no reside tanto en el funcionamiento de la arquitectura, sino en el funcionamiento de la pila de combustible. Al demandar de la pila variaciones de potencia muy pronunciadas, se está forzando en exceso al componente y aumenta su consumo de combustible. De modo que aunque el sistema puede responder de manera correcta, se trata de una característica a evitar en el diseño de la arquitectura de control. En la Figura 15 se puede comprobar la respuesta dinámica de la pila de combustible. Se puede apreciar como las arquitecturas FIL\_S\_3 y FIL\_J\_1 poseen un dinamismo muy diferente al resto.

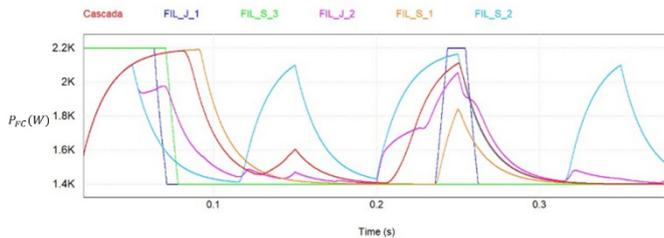


Figura 15: Comparación de la potencia entregada por la pila de combustible en dos arquitecturas.

Como se puede apreciar en la Figura 15, la demanda de potencia de la pila de combustible en las arquitecturas Fil\_J\_1, y Fil\_S\_3, varía de manera casi instantánea de su valor máximo al mínimo. Este tipo de demandas no es conveniente para la pila de combustible que responde mejor a variaciones más moderadas como las de la arquitectura Cascada.

#### E. Tensión en la batería.

Todas las diferencias de funcionamiento mencionadas se han detectado ante un estímulo de alta carga dinámica. Para buscar más situaciones en las que el sistema no actúa de manera óptima, se somete el diseño a una demanda de baja carga dinámica. Esta carga se ha modelado como una fuente de corriente dependiente, a la que se le introduce un escalón de tensión filtrado con un filtro paso bajo. Se ha diseñado el filtro con una resistencia de valor  $10k\Omega$ , y un condensador de  $10\mu F$ . La frecuencia del filtro resultante es de 1,6Hz.

$$f = \frac{1}{C \cdot R \cdot 2\pi} = \frac{1}{10\mu F \cdot 10k\Omega \cdot 2\pi} = 1,6Hz \quad (1)$$

Se ha fijado una frecuencia tan baja para que, idealmente, sea tan solo la pila de combustible la que actúe, y ver cómo se comporta el resto de fuentes cuando se encuentran inactivas.

La primera diferencia encontrada ante este tipo de demanda corresponde con el control de la tensión de la batería. Idealmente la batería no debería entrar en funcionamiento ante demandas de tan baja variación dinámica. Aunque existe un pequeño transitorio al comienzo de la simulación para regular la tensión del bus, por lo que la tensión en la batería cambia, una vez superado este transitorio, la tensión debería regresar al valor de referencia, 300 voltios fijados como referencia.

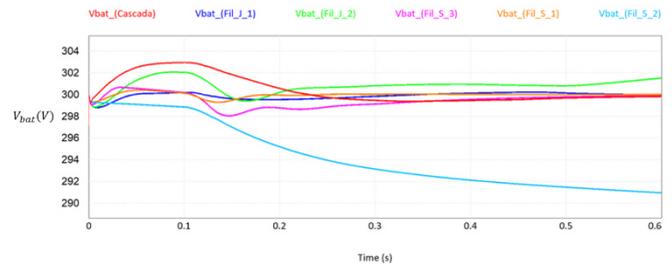


Figura 16: Tensión de la batería en función de su arquitectura de control.

En dos de las arquitecturas, Fil\_J\_2, y Fil\_S\_2, la tensión no alcanza el valor esperado. En el caso de la arquitectura Fil\_J\_2, la tensión de la batería se estabiliza en un valor diferente al de referencia. En la arquitectura Fil\_S\_2 por otro lado, el valor de la tensión no llega nunca a estabilizarse. En la Figura 16, se muestra el valor de tensión de la batería con las diferentes estrategias de control. Se puede apreciar como todas las arquitecturas de control acaban estabilizándose en el valor de referencia, con mayor o menor oscilación y en un tiempo diferente. En las dos arquitecturas mencionadas, Fil\_J\_2, y Fil\_S\_2, esto no ocurre. En este caso, estos errores se deben a dos causas totalmente distintas.

El error de la opción Fil\_S\_2 se debe a que, por el propio diseño de la arquitectura, todas las fuentes actúan sobre el error de la batería, incluida la propia batería. De modo que en el momento en que la batería empieza a descargarse la propia batería empieza a dar más potencia para regular el error de tensión, lo que hace que este error aumente y en ningún momento se alcance la tensión de referencia.

Por otro lado, el error en la arquitectura Fil\_J\_2 se debe al hecho de que se introduce la influencia de ambos reguladores en un mismo punto. Dado que la influencia de ambos reguladores se suma, si estos tienen mismo módulo pero signos opuestos se anulan entre sí. Esto significa que la influencia del SOC será nula en ciertas situaciones en las que el error de carga de las dos fuentes no sea nulo, por lo que no se controlará de manera correcta la tensión en las fuentes secundarias.

$$\varepsilon_{bat} \cdot G_{bat}(s) + \varepsilon_{sc} \cdot G_{sc}(s) = 0 \quad (2)$$

Si se cumple la ecuación (2) la influencia de los reguladores se anula entre sí por lo que, tanto la tensión del supercondensador, como la de la batería se estabiliza en un punto que no es el fijado en el control. Es preciso destacar que aunque no se haya detectado en simulación la opción Fil\_J\_1 también puede presentar este error en ciertas circunstancias.

#### F. Potencia de referencia.

En último lugar, se ha detectado un error en la potencia de referencia que fija el regulador PI principal. Como se ha comentado, el control fija una potencia de referencia que posteriormente es separada en función de la frecuencias que pueden atender cada tipo de fuente, a continuación esta potencia de referencia se envía a un modulador que accionará los transistores necesarios en cada convertidor. El error que se ha detectado consiste en una discrepancia entre la potencia de referencia y la potencia real que entrega el sistema. La potencia que han de entregar las tres fuentes en conjunto ha de ser igual a la potencia de referencia, pero en algunas de las arquitecturas Fil\_J\_1, Fil\_S\_2, y Fil\_S\_3, existe diferencias entre ellas.

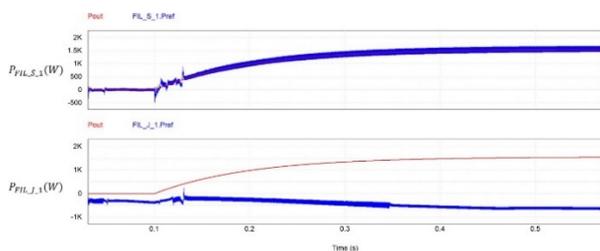


Figura 17. Potencia en el control de FIL\_S\_1, y FIL\_J\_1.

En la Figura 17 se muestra la potencia de referencia de la arquitectura Fil\_S\_1, la cual es equivalente a las arquitecturas cascada y Fil\_J\_2, y de la arquitectura Fil\_J\_1, la cual es equivalente a las arquitecturas Fil\_S\_2 y Fil\_S\_3. Se puede apreciar como en la arquitectura Fil\_S\_1, la potencia de referencia calculada es equivalente a la potencia de salida que demanda la carga. Por otra parte, en la arquitectura Fil\_J\_1, la potencia de referencia no coincide con la potencia de salida. Tal y como se ha comentado en la Figura 5, para separar los diferentes armónicos se filtra la señal dos veces y se opera con su salida y sus entradas para obtener las frecuencias bajas, las medias y las altas. Tras la operación, la suma de las tres potencias resultantes es igual a la potencia de referencia. El error ocurre cuando en estas dos arquitecturas, Fil\_J\_1, y Fil\_S\_3, se añade la influencia de los controladores de carga únicamente afectando o a la referencia de potencia de la pila de combustible o a la referencia de potencia de la batería, produciendo que la suma de la potencia de las tres fuentes sea diferente a la potencia de referencia.

En Fil\_S\_2, el error se debe a que la influencia del controlador de la tensión en la batería se produce a la salida de la potencia de referencia, modificando la potencia de referencia global que debe dar el sistema.

#### Comparativa

Para realizar la comparativa de las arquitecturas es preciso en primer lugar clasificar las diferencias y errores por su gravedad.

- Tiempo de estabilización (B): Esta diferencia es un pequeño inconveniente de la arquitectura en cascada, pero dado que solo ocurre en el arranque y que tan solo se trata de un breve retardo es un error de gravedad leve.
- Diferencias en la tensión supercondensador (C): Aunque la diferencia es pequeña en módulo, esto afecta a la tensión de salida. Este error por lo tanto es de carácter moderado.

- Potencia pila de combustible (D): Aunque no es conveniente demandar de la pila de combustible variaciones pronunciadas de potencia, en caso de que esta no pudiera suministrarla sería la batería o los supercondensadores los que compensarían esa falta de potencia. De modo que esta diferencia está más relacionado con el correcto mantenimiento de la pila que con el control del sistema multifuente, no obstante dado que es un fallo evitable se considera un error de gravedad baja.
- Diferencias en la tensión de la batería (E): Esta diferencia puede producir una descarga total de la batería por lo que el sistema completo dejaría de funcionar, este error es por lo tanto de carácter grave.
- Potencia de referencia (F): Esta diferencia puede resultar en un mal funcionamiento del sistema completo por lo que es de carácter grave.

Si se comparan las diferencias y errores de los diferentes modelos se obtiene la información incluida en la tabla 1.

	Cascada	Fil_J_1	Fil_J_2	Fil_S_1	Fil_S_2	Fil_S_3
B	X					
C		X	X			
D		X				X
E		X	X		X	
F		X			X	X

Tabla 1. Resumen de diferencias y errores.

Como se puede apreciar la arquitectura **Fil\_S\_1**, no posee ninguna de las diferencias y errores que se han estudiado, por lo tanto sería seleccionada como la arquitectura óptima. Del mismo modo la arquitectura **Cascada** tan solo posee la diferencia con la menor gravedad que se ha encontrado, por lo que es una opción también válida.

## V. CONCLUSIONES

Un correcto control del sistema multifuente es esencial para crear vehículos que funcionen con pilas de combustible, que sean competitivos en el mercado actual, y a su vez sean eficientes. En este artículo, se han estudiado y analizado las principales diferencias entre las arquitecturas de control propuestas. Se ha mostrado que la posición en la que se introduce el efecto de los reguladores de tensión de las fuentes secundarias afecta de manera importante a las prestaciones de las arquitecturas. Los resultados obtenidos demuestran que las arquitecturas que presentan mejores prestaciones son la opción en **Cascada**, y la opción **FIL\_S\_1**. Se ha comprobado mediante simulación el correcto funcionamiento de ambas arquitecturas.

## REFERENCIAS

- [1] P. Thounthonga, S. Rael y B. Davat, «Energy management of fuel cell/ battery/ supercapacitor hybrid power source, » Journal of Power Sources, vol. 193, pp. 376-385, 2009.
- [2] T. Azib, C. Larouci, A. Chaibet y M. Boukhniher, «Online Energy Management Strategy of a Hybrid Fuel Cell/ Battery/ Ultracapacitor Vehicular Power System, » IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, vol. 9, pp. 548-554, 2014.
- [3] H. Miniguano, «Sistemas de Gestión de Energía en Vehículos Eléctricos,» Modelado e Identificación de Baterías de Ion-Litio y Supercondensadores para su aplicación al Vehículo Eléctrico, Tesis Doctoral. UC3M, 2019, pp. 113-144.
- [4] S. Waffler y J. W. Kolar, «A Novel Low-Loss Modulating Strategy for High-Power Bidirectional Buck+Boost Converters,» IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, vol. 24, n° 6, pp. 1589-1599, 2009.