

Optimización del sistema de gestión de energía de un vehículo híbrido de pila de combustible basado en la minimización de las pérdidas de energía

A. Martin-Lozano, A. Barrado, A. Rodriguez-Lorente, A. Lázaro, C. Fernández
Grupo de Sistema Electrónicos de Potencia, Universidad Carlos III de Madrid
albermar@ing.uc3m.es, andres.barrado@uc3m.es

Resumen—Los vehículos eléctricos híbridos basados en el uso de una pila de combustible son una alternativa viable a los vehículos con motores de combustión interna. Este artículo presenta un algoritmo de optimización para el sistema de gestión de energía de estos vehículos orientado a aumentar su autonomía. El sistema utiliza una pila de combustible como fuente de energía principal, una batería conectada directamente al bus como fuente secundaria y un convertidor de potencia entre la pila de combustible y el bus. Ambas fuentes de energía aportan la potencia necesaria que requiere el vehículo. El algoritmo de optimización propuesto se basa en la minimización de las pérdidas de energía del sistema y se valida con simulaciones realizadas en PSIM® y SIMULINK® utilizando baterías óptimamente dimensionadas, baterías sobredimensionadas y baterías de capacidad insuficiente. El dimensionamiento obtenido mediante el uso del algoritmo propuesto se compara con el disponible en una de las referencias del estado de la técnica, consiguiendo una mejora en masa, volumen y coste total del sistema. Finalmente, se compara la configuración del sistema con menor masa, volumen y coste con el que presenta menores pérdidas de energía.

Palabras clave—Batería, Dimensionamiento, Gestión de energía, Optimización, Pila de combustible, Vehículo híbrido

I. INTRODUCCIÓN

Los vehículos eléctricos híbridos de pila de combustible (FCHV) presentan como mejora a los vehículos con motores de combustión interna (ICE) la ausencia de emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, los FCHV requieren un control más complejo debido a la presencia de más de una fuente de energía. No obstante, esto le aporta al sistema un grado de libertad adicional, que permite seleccionar cómo es el aporte de energía de cada fuente. Es por ello que el sistema de gestión de energía (EMS) puede ser optimizado con una función objetivo específica a maximizar o minimizar.

Los FCHV pueden tener diferentes EMS. En [1], el EMS se basa en lógica de control difusa y en [2] en multiplicadores de Lagrange. En [3] se utiliza algoritmos de optimización basados

en reglas, programación dinámica y aprendizaje profundo reforzado en tiempo real. Independientemente de la estrategia escogida, los datos de entrada del sistema pueden ser diferentes, por ejemplo, un perfil de potencia conocido o usar modelos predictivos para el funcionamiento del motor en tiempo real [4].

En el presente artículo, el objetivo del algoritmo de optimización es minimizar las pérdidas de energía en las resistencias internas del sistema de potencia. El perfil de potencia consumida se basa en el consumo escalado 1 a 10 de un vehículo eléctrico ligero que sigue un perfil de conducción estándar europeo ECE-15 de 195 segundos de duración. Dicho ciclo se aplica consecutivamente 148 veces para simular una jornada laboral (8 h) [5]. Una vez ha finalizado el proceso de optimización, los perfiles de potencia de cada fuente que minimizan las pérdidas de energía son conocidos. A continuación, basándose en los perfiles de potencia de cada fuente de energía, se dimensiona el sistema de potencia del vehículo.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se detallan los modelos de los componentes del sistema: la batería, la pila de combustible, el convertidor de potencia y la carga. El algoritmo de optimización junto con la metodología para calcular la masa, volumen y coste total del sistema son detallados en la sección III. A continuación, en la sección IV se validan los resultados del algoritmo de optimización con simulaciones realizadas en SIMULINK® y PSIM® utilizando una batería óptima, una sobredimensionada y una con capacidad insuficiente. Después, se compara la masa, volumen y coste total del sistema obtenido mediante el criterio de diseño del algoritmo de optimización con el obtenido usando el criterio de diseño de [6]. Posteriormente, se compara el sistema que presenta mínima masa, volumen y coste, con el sistema que minimiza las pérdidas de energía y, con ello, el consumo de hidrógeno. Finalmente, la sección V presenta las conclusiones obtenidas a lo largo de la investigación.

II. MODELADO DEL SISTEMA

A. Arquitectura

La arquitectura del sistema de distribución de potencia se muestra en Fig. 1.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado, por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del proyecto de investigación CONEXPOT-2 (DPI2017-84572-C2-2-R) y EPIIOT (DPI2017-88062-R).

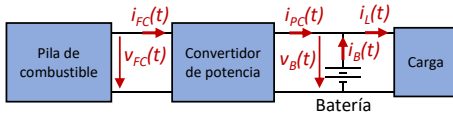


Fig. 1. Arquitectura del sistema de distribución de potencia cuya gestión de energía es optimizada.

En la Fig. 1 se muestra las tensiones de la pila de combustible $v_{FC}(t)$ y batería $v_B(t)$ junto con las corrientes de la pila de combustible $i_{FC}(t)$, batería $i_B(t)$, convertidor de potencia $i_{PC}(t)$ y carga $i_L(t)$.

La corriente de carga debe ser abastecida en todo momento por la corriente del convertidor y/o la corriente de la batería (1).

$$i_L(t) = i_{PC}(t) + i_B(t) \quad (1)$$

Se ha de tener en cuenta que la batería es el único elemento capaz de recuperar energía durante los frenados regenerativos y lidiar con las corrientes negativas de la carga.

B. Modelo de Batería

El modelo utilizado se basa en una batería de Li-Ion [7] y se muestra en Fig. 2.

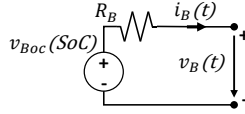


Fig. 2. Modelo simplificado estático de la batería.

La ecuación del modelo se muestra en (2) donde $v_{Boc}(SoC)$ es la tensión de circuito abierto, R_B es la resistencia interna, $v_B(t)$ es la tensión de salida y $i_B(t)$ es la corriente de la batería.

$$v_B(t) = v_{Boc}(SoC) - R_B \cdot i_B(t) \quad (2)$$

La tensión del circuito abierto $v_{Boc}(SoC)$ depende del estado de carga de la batería $SoC(t)$, tal y como se muestra en la Fig. 3, la cual es modelada con un polinomio de grado 10 [7].

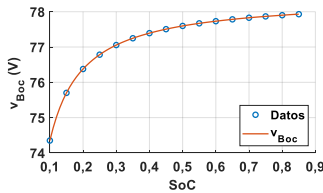


Fig. 3. Tensión del circuito abierto en función del estado de carga de la batería.

La variación del estado de carga en tanto por uno viene regida por (3) donde SoC_t y SoC_{t-1} son el estado de carga en un determinado instante t y en el anterior, Δt es el paso de tiempo (s) y Q es la capacidad de la batería (Ah).

$$SoC_t = SoC_{t-1} - \left(\frac{i_B(t) \cdot \Delta t}{Q \cdot 3600} \right), \forall t \in [0, T] \quad (3)$$

Para que la batería no se sobrecargue ni se descargue demasiado, se añaden dos condiciones adicionales (4) donde SoC_{min} y SoC_{max} son el estado de carga máximo y mínimo permitidos en la batería.

$$SoC_{min} \leq SoC_t \leq SoC_{max} \quad (4)$$

En el caso del presente artículo, la resistencia de la batería R_B es 148 mΩ y el paso de tiempo Δt utilizado es 1 s.

C. Modelo de Pila de Combustible

El modelo utilizado de pila combustible se muestra en Fig. 4

y viene modelado por la ecuación (6). Los parámetros del modelo son la tensión de circuito abierto v_{FCoc} , la resistencia constante R_{FCc} , la resistencia variable $R_{FCv}(i_{FC})$, la tensión de salida $v_{FC}(t)$ y la corriente $i_{FC}(t)$.

$$v_{FC}(t) = v_{FCoc} - R_{FCc} \cdot i_{FC}(t) - R_{FCv}(i_{FC}) \cdot i_{FC}(t) \quad (6)$$

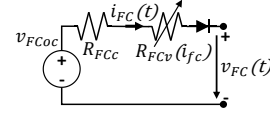


Fig. 4. Modelo simplificado estático de la pila de combustible.

El modelo se basa en una pila de combustible Nexa Ballard de 1,2 kW con una resistencia constante R_{FCc} de 120 mΩ, una tensión de circuito abierto v_{FCoc} de 43 V y una resistencia variable $R_{FCv}(i_{FC})$ que depende de la corriente $i_{FC}(t)$ [8].

Para modelar la resistencia variable, se utiliza un polinomio de grado 5 expresado en (6) cuyos coeficientes se indican en la TABLA I.

$$R_{FCv}(i_{FC}) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot i_{FC}^{n-i}(t) \quad (6)$$

TABLA I. COEFICIENTES DEL POLINOMIO QUE MODELA LA RESISTENCIA VARIABLE.

a_i	Value	a_i	Value	a_i	Value
a_0	-2,3211·10 ⁻⁷	a_2	-0,0015	a_4	-0,3515
a_1	3,0316·10 ⁻⁵	a_3	0,0331	a_5	1,8859

Finalmente, la potencia suministrada por la pila de combustible $P_{FC}(t)$ (7), está acotada por una potencia mínima P_{FCmin} y una potencia máxima P_{FCmax} (8).

$$P_{FC}(t) = v_{FC}(t) \cdot i_{FC}(t) \quad (7)$$

$$P_{FCmin} \leq P_{FC}(t) \leq P_{FCmax} \quad (8)$$

D. Modelo de Convertidor de Potencia

El modelo del convertidor de potencia relaciona la potencia de salida $P_{PC}(t)$ con la potencia de entrada $P_{FC}(t)$ por medio de la eficiencia del convertidor η_{PC} (9). Se utilizará una eficiencia constante de valor $\eta_{PC}=1$ por simplicidad.

$$\begin{aligned} P_{FC}(t) \cdot \eta_{PC} &= v_{FC}(t) \cdot i_{FC}(t) \cdot \eta_{PC} = \\ &= v_B(t) \cdot i_{PC}(t) = P_{PC}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

E. Modelo de Carga

El perfil de potencia consumida $P_L(t)$ (10) se basa en el consumo de potencia durante una jornada laboral (8 h) del motor eléctrico de un vehículo eléctrico ligero con un factor de escala 1/10. El vehículo sigue un perfil de conducción estándar europeo (ECE-15) de 195 segundos de duración, el cual es aplicado 148 veces para simular la jornada completa [5].

$$P_L(t) = i_L(t) \cdot v_B(t) \quad (10)$$

La tensión de salida de la batería $v_B(t)$ es desconocida ya que depende de su estado carga $SoC(t)$ y de su corriente $i_B(t)$ (2). Para solucionarlo, se inicializa el algoritmo de optimización con un valor constante de tensión $v_B(t)$ igual a $v_{Boc}(SoC_{min})$, para todos los instantes del periodo. A continuación, se realiza la optimización y se recalcula la tensión de salida de la batería $v_B(t)$ con el valor de corriente de batería $i_B(t)$ obtenido. El proceso se repite hasta que la diferencia media entre la corriente de batería en dos iteraciones consecutivas sea inferior al 0,1 %.

III. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN

El objetivo del método de optimización propuesto es minimizar las pérdidas de energía totales del sistema durante un periodo T (11) que en este caso es de 8 horas.

$$E_{per} = \sum_{t=0}^T [i_{FC}^2(t)(R_{FCc} + R_{FCv}(i_{FC})) + i_B^2(t)R_B] \quad (11)$$

El algoritmo de optimización calcula los valores de las variables $i_{PC}(t)$, $i_{FC}(t)$, y $i_B(t)$ en todos los instantes del periodo, que consiguen minimizar (11). Además, debe de satisfacer las ecuaciones (1), (2), (4), (6), (8), y las inecuaciones (5), y (9). Los parámetros de entrada y salida del algoritmo se muestran en la Fig. 5.

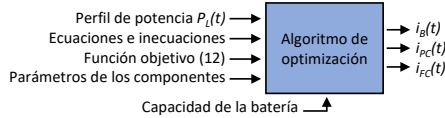


Fig. 5. Parámetros de entrada y salida del algoritmo de optimización.

A la hora de realizar la optimización, todo el periodo de trabajo debe ser considerado simultáneamente, debido a que el objetivo es minimizar el total de pérdidas de energía durante el periodo, y no las pérdidas en cada instante. En caso contrario, se pueden conseguir situaciones indeseables como una descarga prematura de la batería, impidiendo así su posterior uso durante el resto de la jornada. Debido a esto, cada segundo de cada corriente es una variable independiente, lo que implica un gran sistema de ecuaciones con un gran coste computacional para resolverlo. Para solucionar esto, la jornada se divide en 148 ciclos, usando como datos iniciales de un ciclo los finales del anterior.

Finalmente, para evitar una descarga prematura de la batería antes de terminar los 148 ciclos, se limita la descarga de cada ciclo a una parte proporcional de la descarga total (12).

$$SoC_{tfi} = SoC_{toi} - \frac{SoC_{t00} - SoC_{tf148}}{148} \forall i \in [1, 148] \quad (12)$$

En (12), SoC_{tfi} y SoC_{toi} son el estado carga final e inicial del ciclo i ésimo. El estado de carga inicial de toda la jornada SoC_{t00} se fija en 0,85 y el estado de carga final SoC_{tf148} en 0,1.

El algoritmo de optimización se implementa en MATLAB® utilizando la función *fmincon*, la cual permite realizar optimizaciones con condiciones no lineales. Una vez finaliza el proceso de optimización, se calcula la masa, volumen y coste total de cada componente del sistema de potencia utilizando las ecuaciones (13)-(25). Los valores de los parámetros usados en dichas ecuaciones se expresan en la TABLA II.

Las ecuaciones (13), (14) y (15) se usan para calcular la masa m_{FC} (kg), volumen vol_{FC} (l) y coste c_{FC} (€) de la pila de combustible. En dichas ecuaciones, P_{FCmax} es la potencia máxima que aporta la pila de combustible en kW y E_{FC} es la energía total aportada por ésta en toda la jornada en kWh [6], [9], [10].

$$m_{FC} = \frac{P_{FCmax}}{\rho_{FCp}} + \frac{E_{FC}}{\rho_{STe}} \quad (13)$$

$$vol_{FC} = \frac{P_{FCmax}}{\rho_{FCp} \cdot \rho_{FCv}} + \frac{E_{FC}}{\rho_{STv}} \quad (14)$$

$$c_{FC} = P_{FCmax} \cdot Pr_{FC} + E_{FC} \cdot Pr_{ST} \quad (15)$$

TABLA II. PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES DE LA MASA, VOLUMEN Y COSTE DE LA PILA DE COMBUSTIBLE, CONVERTIDOR Y BATERÍA [6], [9]–[12].

Parámetro	Definición	Valor
ρ_{FCp}	Densidad de potencia de la pila de combustible.	0,5 kW/kg
ρ_{FCv}	Densidad de la pila de combustible.	1 kg/l
ρ_{STe}	Densidad gravimétrica de energía del sistema de almacenamiento del hidrógeno a 700 bares en depósito de fibra de carbono.	1,6 kWh/kg
ρ_{STv}	Densidad volumétrica de energía del sistema de almacenamiento del hidrógeno a 700 bares en depósito de fibra de carbono.	0,85 kWh/l
Pr_{FC}	Precio de la pila de combustible.	200 €/kW
Pr_{ST}	Precio del sistema de almacenamiento.	240 €/kWh
k_{AV}	Coefficiente que penaliza al convertidor por trabajar en un rango de tensiones elevado.	1,2
η_{PC}	Eficiencia del convertidor de potencia.	1
ρ_{PCp}	Densidad de potencia del convertidor de potencia.	12,5 kW/kg
ρ_{PCv}	Densidad del convertidor de potencia.	2 kg/l
Pr_{PC}	Precio del convertidor de potencia.	56 €/kW
ρ_{Bp}	Densidad de potencia de la batería.	0,3 kW/kg
ρ_{Be}	Densidad de energía de la batería.	0,1 kWh/kg
ΔSoC	Máxima variación del estado de carga permitido.	0,75
ρ_{Bv}	Densidad de la batería.	2 kg/l
Pr_B	Precio de la batería.	170 €/kWh

La masa m_{PC} (kg), volumen vol_{PC} (l), y coste c_{PC} (€) del convertidor de potencia se calcula utilizando las ecuaciones (16), (17) y (18) [6], [11].

$$m_{PC} = \frac{P_{FCmax} \cdot k_{AV}}{\eta_{PC} \cdot \rho_{PCp}} \quad (16)$$

$$vol_{PC} = \frac{m_{PC}}{\rho_{PCv}} \quad (17)$$

$$c_{PC} = \frac{P_{FCmax} \cdot Pr_{PC}}{\eta_{PC}} \quad (18)$$

Para calcular la masa de batería m_B (kg) se deben cumplir las condiciones (19) y (20), ya que ésta debe ser capaz de aportar la potencia y energía necesaria. P_{Bmax} es la potencia máxima que aporta la batería en kW y E_B es la energía total que esta maneja en kWh. Para calcular el volumen vol_B (l) y coste c_B (€) de la batería se utilizan las ecuaciones (21) y (22) [6], [12].

$$m_B \geq \frac{P_{Bmax}}{\rho_{Bp}} \quad (19)$$

$$m_B \geq \frac{E_B}{\rho_{Be} \cdot \Delta SoC} \quad (20)$$

$$vol_B = \frac{m_B}{\rho_{Bv}} \quad (21)$$

$$c_B = m_B \cdot \rho_{Be} \cdot Pr_B \quad (22)$$

Finalmente, la masa m_T (kg), volumen vol_T (l) y coste c_T (€) total del sistema de potencia se calcula utilizando las ecuaciones (23), (24) y (25).

$$m_T = m_{FC} + m_{PC} + m_B \quad (23)$$

$$vol_T = vol_{FC} + vol_{PC} + vol_B \quad (24)$$

$$c_T = c_{FC} + c_{PC} + c_B \quad (25)$$

El dimensionamiento queda en función de la potencia máxima y energía total que manejan la batería y la pila de combustible.

A continuación, se realiza el dimensionamiento para diferentes valores de capacidad de batería Q .

La Fig. 6 muestra la potencia máxima aportada por la batería y la pila de combustible para valores de Q entre 2,8 Ah y

18,8 Ah. Para valores altos de Q , la potencia máxima de la pila de combustible P_{FCmax} tiende a 0 W, i.e., vehículo eléctrico puro, por lo que valores de batería mayores a 18,8 Ah se encuentran fuera del alcance de esta investigación.

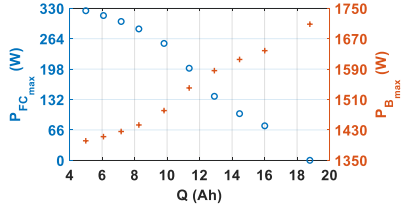


Fig. 6. Potencia máxima aportada por la pila de combustible (círculos azules) y batería (cruces naranjas) para diferentes valores de capacidad de batería Q . Vehículo escalado 1 a 10.

La Fig. 6 muestra que, en todos los casos, la potencia de la batería es mayor que la potencia de la pila de combustible. Esto se debe a que la resistencia interna de la pila de combustible es mucho mayor a la de la batería, lo que obliga a la batería a aportar una mayor corriente eficaz con respecto a la pila de combustible, para disminuir las pérdidas de energía.

La energía total que la batería puede almacenar E_{Bdis} (kWh) por tener una capacidad Q (Ah) y una tensión nominal $V_{Bnom}=75,74$ V se expresa en (26). Está debe ser mayor que la energía total que la batería entrega durante toda la jornada ya que en caso contrario, la energía de la batería sería insuficiente.

$$E_{Bdis}(Q) = Q \cdot V_{Bnom} / 1000 \quad (26)$$

Dicho requisito se satisface para todos los valores de Q tal y como muestra la Fig. 7.

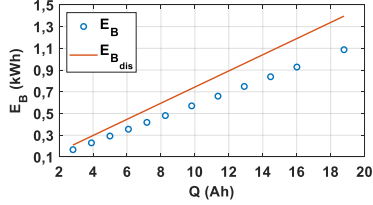


Fig. 7. Energía total aportada por la batería durante toda la jornada (círculos azules) y energía total que la batería puede almacenar (línea roja) para diferentes capacidades de batería Q . Vehículo escalado 1 a 10.

Además, la energía total que la batería puede almacenar E_{Bdis} también debe cumplir la inecuación (20). Para ello, se utiliza este valor E_{Bdis} en el caso más restrictivo de dicha inecuación, dando como resultado la ecuación (27).

$$m_B = \frac{E_{Bdis}(Q, V_{Bnom})}{\rho_{Be} \cdot \Delta SoC} \quad (27)$$

Sustituyendo entonces (27) en la inecuación (19), se obtiene (28) donde P_{Bdis} , es el valor de potencia máxima que puede aportar una batería de una capacidad Q y una tensión nominal V_{Bnom} considerando sus densidades de potencia y energía.

$$P_{Bmax} \leq \frac{E_{Bdis}(Q) \cdot \rho_{Bp}}{\rho_{Be} \cdot \Delta SoC} = P_{Bdes} \quad (28)$$

La potencia máxima que aporta la batería P_{Bmax} no puede ser superior al límite P_{Bdis} . A continuación, en Fig. 8 se muestra P_{Bmax} junto con la limitación de potencia máxima P_{Bdis} . Se observa que las soluciones obtenidas para valores de Q inferiores a 5 Ah no cumple la condición (28). Por ello, el rango capacidades de baterías considerado varía entre 5 Ah y 18,8 Ah.

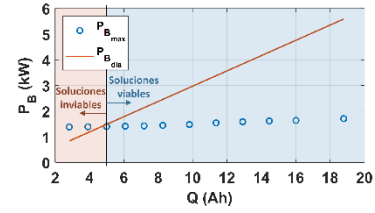


Fig. 8. Potencia máxima que debe aportar la batería (círculos azules) y límite de potencia máxima que puede aportar la batería (línea roja) para diferentes capacidades de batería Q . Vehículo escalado 1 a 10.

IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A. Comparación entre diferentes tamaños de batería: óptima, sobredimensionada e infra dimensionada

En esta sección, los resultados obtenidos del algoritmo de optimización se comparan con los resultados de las simulaciones obtenidos con PSIM® y SIMULINK®. Los datos de entrada para las simulaciones son el perfil de potencia consumida por la carga $P_L(t)$ y el perfil de corriente de la pila de combustible $i_{FC}(t)$, el cual es controlado por el convertidor de potencia. El perfil de corriente $i_{FC}(t)$ es obtenido mediante el algoritmo de optimización desarrollado, mientras que el perfil de potencia consumida es el mismo para todos los casos.

Cuatro escenarios diferentes se plantean para validar los resultados obtenidos por el algoritmo de optimización:

- Escenario 1: caso óptimo con un perfil de potencia de pila de combustible con $P_{FCmax}=325$ W utilizando una batería óptimamente dimensionada, $Q=5$ Ah.
- Escenario 2: simulación con el mismo perfil de potencia de pila de combustible con $P_{FCmax}=325$ W utilizando una batería sobredimensionada, $Q=9,8$ Ah.
- Escenario 3: simulación con el mismo perfil de potencia de pila de combustible, $P_{FCmax}=325$ W utilizando una batería con capacidad insuficiente, $Q=4,5$ Ah.
- Escenario 4: caso óptimo con un perfil menor de potencia de pila de combustible con $P_{FCmax}=255$ W utilizando una batería óptima, $Q=9,8$ Ah.

En el primer escenario, la batería termina con un estado de carga mínimo $SoC_{tf148}=SoC_{min}$. Esto se puede observar en la Fig. 9, la cual muestra la evolución del estado de carga de la batería durante el periodo considerado (8 h) obtenido mediante el algoritmo de optimización, la simulación en PSIM® y la simulación en SIMULINK®.

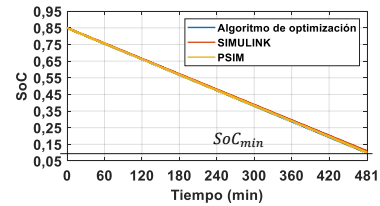


Fig. 9. Estado de carga de la batería durante una jornada laboral (8 h) utilizando una batería óptima, $Q=5$ Ah, para un perfil de potencia de pila de combustible específico (ECE-15), $P_{FCmax}=325$ W. Vehículo escalado 1 a 10.

Se observa que los resultados son similares, teniendo un error medio de 1,9 % con SIMULINK® y 0,4 % con PSIM®.

A continuación, los resultados simulados de los escenarios 2 y 3 se muestran en Fig. 10. Ambos escenarios utilizan el mismo perfil de potencia de pila de combustible, pero el escenario 2 tiene una batería sobredimensionada $Q=9,8$ Ah, y el escenario 3 tiene una batería cuya capacidad es insuficiente, $Q=4,5$ Ah.

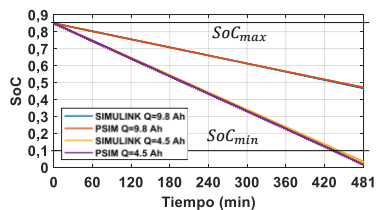


Fig. 10. Estado de carga de la batería durante una jornada laboral (8 h) utilizando una batería con capacidad insuficiente, $Q=4,5$ Ah, y una batería sobredimensionada, $Q=9,8$ Ah, para un perfil de potencia de pila de combustible específico (ECE-15), $P_{FCmax}=325$ W. Vehículo escalado 1 a 10.

La Fig. 10 muestra que, al utilizar una batería sobredimensionada, el vehículo finaliza la jornada con un exceso de energía de batería, lo cual no es una solución óptima. Por otro lado, cuando la batería tiene una capacidad insuficiente, ésta llega a un punto donde su estado de carga es menor al mínimo indicado en (4), i.e., sufre una sobredescarga, lo cual acelera su envejecimiento. Además, en el caso de tener mayor descarga, el consumo de hidrógeno aumenta pues la menor tensión implica mayor corriente y a su vez, mayores pérdidas.

Finalmente, se muestran en Fig. 11 la evolución del estado de carga obtenido en el escenario 4 con el algoritmo de optimización junto con los resultados de las simulaciones en PSIM® y SIMULINK®.

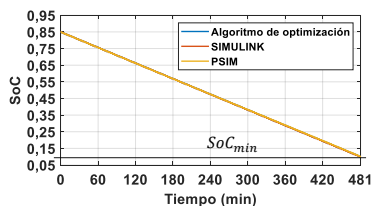


Fig. 11. Estado de carga de la batería durante una jornada laboral (8 h) utilizando una batería óptima, $Q=9,8$ Ah, para un perfil de potencia de pila de combustible específico (ECE-15), $P_{FCmax}=255$ W. Vehículo escalado 1 a 10.

En este escenario, al igual que en el escenario 1, la batería termina en el estado de carga mínimo dado que el perfil de potencia de pila de combustible utilizado en las simulaciones es el obtenido por algoritmo de optimización, lo cual garantiza una correcta descarga de la batería. De nuevo, se observa que los resultados son bastante similares, siendo el error medio de un 0,2 % al utilizar SIMULINK® y de un 0,3% al utilizar PSIM®.

B. Comparación del dimensionamiento entre dos algoritmos de optimización: propuesto y el presentado en [6]

En esta sección se compara la masa, volumen y coste total del sistema obtenido usando el algoritmo de optimización propuesto con el obtenido mediante el uso de la estrategia de dimensionamiento descrita en [6], la cual utiliza las mismas ecuaciones de dimensionamiento a excepción de la minimización de las pérdidas de energía. Es por ello que los perfiles de potencia de la batería y de la pila de combustible son

diferentes y las pérdidas de energía en [6] serán mayores.

El criterio de diseño utilizado en [6] se basa en que la pila de combustible abastecerá toda la potencia demandada por la carga siempre que ésta se encuentre dentro de un rango de funcionamiento indicado. El resto de potencia será aportado por la batería. Es por ello que cada valor de potencia máxima de pila de combustible P_{FCmax} se corresponde de manera biunívoca con un valor de capacidad de batería Q , para un perfil de conducción determinado.

La Fig. 12 (a), (b) y (c), muestran la masa (kg), volumen (l) y coste (€) total del sistema utilizando el criterio de [6] junto con el obtenido mediante el algoritmo de optimización propuesto.

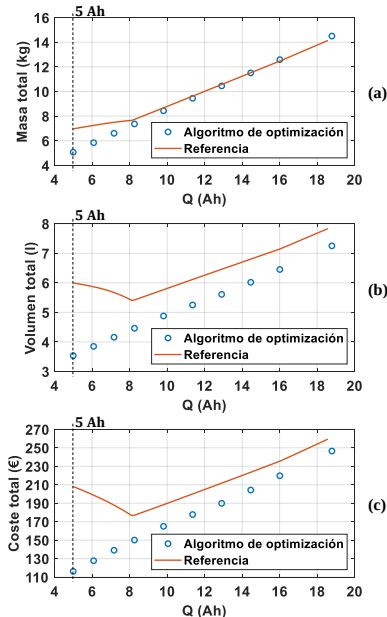


Fig. 12. Masa (a), volumen (b) y coste (c) total del sistema de potencia para diferentes capacidades de batería Q utilizando el algoritmo propuesto (círculos azules) y mediante el criterio de la referencia [6] (línea roja). Vehículo escalado 1 a 10.

Se observa que el volumen y coste total del sistema son menores utilizando el algoritmo de optimización propuesto. La masa es menor excepto cuando se utilizan valores altos de capacidad de batería Q , en cuyo caso la masa total es similar. La mejora es mayor para baterías menores, i.e., mayores pilas de combustible, obteniéndose una reducción máxima en masa, volumen y coste del 64 %, 54 % y 55 %, respectivamente.

C. Dimensionamiento óptimo frente a mínimas pérdidas de energía

En esta sección se comparan la masa (kg), volumen (l) y coste (€) total del sistema frente a las pérdidas totales del sistema. Los resultados se muestran en Fig. 13 (a), (b) y (c) para diferentes valores de capacidades de batería Q .

Se observa que a medida que el valor de Q aumenta, las pérdidas de energía disminuyen, pero la masa, volumen y coste total del sistema aumenta. Es por ello, que las características del sistema que tiene las menores pérdidas de energía son diferentes a las del sistema con menor masa, volumen y coste total, tal y como se muestra en TABLA III.

TABLA III. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA Y PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE LOS SISTEMA CON DIMENSIONAMIENTO MÍNIMO Y PÉRDIDAS MÍNIMAS.

Q (Ah)	m_T (kg)	vol_T (l)	c_T (€)	E_{per} (kJ)	Mínimo
5	5,1	3,5	116	282,2	Masa, volumen y coste
16	12,6	6,5	220	100,6	Pérdidas de energía

La mejor solución desde el punto de vista del fabricante es un FCHV con una batería pequeña ya que la masa, volumen y coste total del sistema son menores. Sin embargo, la mejor solución en términos de pérdidas de energía, rango y consumo del vehículo corresponde con un vehículo que utiliza una pequeña pila de combustible y una gran batería en detrimento de su masa, volumen y coste.

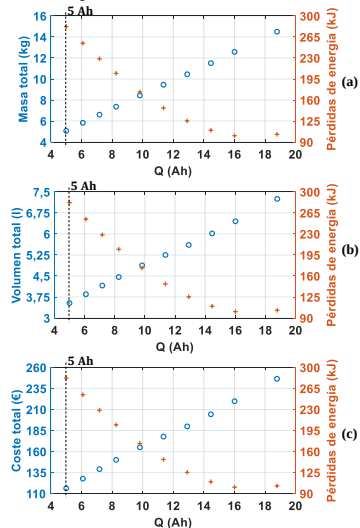


Fig. 13. Masa (a), volumen (b) y coste (c) total del sistema de potencia (círculos azules) y pérdidas totales de energía en una jornada (cruces naranjas) para diferentes capacidades de batería Q . Vehículo escalado 1 a 10.

V. CONCLUSIONES

En este artículo, se valida el algoritmo de optimización de gestión de energía de un sistema de distribución de potencia para un vehículo eléctrico híbrido de pila de combustible.

El algoritmo de optimización calcula los perfiles de corriente de la batería, convertidor y pila de combustible que minimizan las pérdidas de energía totales del sistema durante una jornada laboral (8 h). La pila de combustible y la batería deben abastecer la potencia demandada por la carga en todo momento, la cual se basa en la potencia consumida por un vehículo eléctrico ligero que sigue un perfil de conducción estándar europeo ECE-15, repetidamente durante la jornada laboral. Además, el algoritmo considera unas limitaciones prácticas como el rango de potencia de la pila de combustible y los límites del estado de carga de la batería.

Los resultados obtenidos por el algoritmo de optimización son validados con simulaciones realizadas en PSIM® y SIMULINK® para diferentes capacidades de batería. Además, se realizan simulaciones adicionales con una batería con capacidad menor y mayor a la calculada como óptima. Los resultados demuestran que, al utilizar una batería con capacidad menor, ésta finaliza descargada en exceso al final del periodo, lo cual implicaría un mayor envejecimiento en la batería. Por otro lado, al utilizar una batería sobredimensionada, se obtiene

un exceso de energía en ésta al final de la jornada, lo cual implica una solución no óptima.

Además, se calcula la masa, volumen y coste total del sistema utilizando los perfiles de potencia de cada fuente, pila de combustible y batería, obtenidos mediante el algoritmo. Se observa que hay una mejora en la masa, volumen y coste comparado con los resultados obtenidos usando el criterio de dimensionamiento de referencia descrito en [6]. Además, la solución obtenida garantiza las mínimas pérdidas de energía en el sistema.

Finalmente, se compara la masa, volumen y coste total con las pérdidas de energía del sistema para diferentes valores de capacidad de batería. Se demuestra que el sistema con mínima masa, volumen y coste es aquél que utiliza la menor batería $Q=5$ Ah, con un perfil de potencia de pila de combustible cuya potencia máxima es $P_{FCmax}=325$ W. Esta solución sería la indicada para diseños con baja masa, volumen o coste, por ejemplo, diseños orientados a fabricantes. Sin embargo, el sistema con las menores pérdidas de energía es aquel con una mayor batería $Q=16$ Ah, que corresponde perfil de potencia de pila de combustible cuyo máximo es menor, $P_{FCmax}=75$ W. Ésta es la solución óptima cuando se prioriza la reducción de pérdida de energía, por ejemplo, vehículos de bajo consumo.

REFERENCIAS

- [1] S. Ahmadi, S. M. T. Bathaee, and A. H. Hosseinpour, "Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 160, no. December 2017, pp. 74–84, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.01.020.
- [2] A. Castings, W. Lhomme, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Comparison of energy management strategies of a battery / supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints," *Appl. Energy*, vol. 163, pp. 190–200, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.11.020.
- [3] R. Xiong, Y. Duan, J. Cao, and Q. Yu, "Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle," *Appl. Energy*, vol. 217, no. 5, pp. 153–165, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.128.
- [4] C. Xiang, F. Ding, W. Wang, and W. He, "Energy management of a dual-mode power-split hybrid electric vehicle based on velocity prediction and nonlinear model predictive control," *Appl. Energy*, vol. 189, pp. 640–653, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.056.
- [5] C. Raga, A. Barrado, A. Lazaro, A. Martin-lozano, I. Quesada, and P. Zumel, "Influence of the Main Design Factors on the Optimal Fuel Cell-Based Powertrain Sizing," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/en11113060.
- [6] C. Raga *et al.*, "Analysis and Sizing of Power Distribution Architectures Applied to Fuel Cell Based Vehicles," *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2597, Sep. 2018, doi: 10.3390/en11102597.
- [7] C. Raga *et al.*, "Economic impact of the energy management applied on fuel cell based vehicles with undersized and oversized secondary energy sources," *2016 Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls. Road Veh. Int. Transp. Electr. Conf. ESARS-ITEC 2016*, 2017, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841344.
- [8] C. Raga *et al.*, "Black-Box Model, Identification Technique and Frequency Analysis for PEM Fuel Cell With Overshooted Transient Response," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 10, pp. 5334–5346, Oct. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2292599.
- [9] E. J. Carlson, P. Kopf, J. Sinha, S. Sriramulu, and Y. Yang, "Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation," *Natl. Renew. Energy Lab.*, no. December, 2005, doi: 10.2172/862302.
- [10] N. Stetson and R. C. Bowman, "On-Board Hydrogen Storage Systems – Projected Performance and Cost Parameters," *DOE Hydrog. Fuel Cells Progr. Rec.*, vol. 8, pp. 1–18, 2010.
- [11] J. W. Kolar *et al.*, "PWM Converter Power Density Barriers," vol. L, 2007, doi: 10.1109/PCCON.2007.372914.
- [12] EUROBAT, ILA, ACEA, JAMA, and KAMA, "A REVIEW OF BATTERY TECHNOLOGIES FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS." [Online]. Available: https://www.acea.be/uploads/publications/Rev_of_Battery_technology_-_full_report.pdf. [Accessed: 22-Oct-2018].