

Modelado y ajuste matemático de funciones de eficiencia para topologías híbridas FC

Modelling and mathematical fitting of efficiency functions for FC hybrid topologies

Harrynson Ramírez-Murillo^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-3474-4783>
Martha P. Camargo-Martínez¹  <https://orcid.org/0000-0003-2986-2467>
Fabián Salazar-Cáceres¹  <https://orcid.org/0000-0001-5949-3979>
Carlos A. Torres-Pinzón²  <https://orcid.org/0000-0003-0367-8143>

Recibido 06 de diciembre de 2022, aceptado 24 de mayo de 2023
Received: December 06, 2022 Accepted: May 24, 2023

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo matemático de eficiencias para sistemas híbridos Fuel Cell (FC), considerando las topologías serie (SH), paralelo (PH) y serie-paralelo (SPH). En estos sistemas, se implementaron convertidores Buck-Boost modulares no inversores. Sus funciones de eficiencia dependen de sus puntos de operación, particularmente de sus corrientes de salida y modos de operación (Buck, Boost y Buck-Boost). Además, la eficiencia del Bus de DC se ha modelado y utilizado en cada sistema, el cual corresponde una función del ciclo de trabajo de carga con una frecuencia de 100 Hz. La potencia pico y la tensión nominal de este bus de CC corresponden a 1,5 kW y 48 V, respectivamente. Estos sistemas híbridos fueron implementados en SIMULINK / MATLAB®, considerando condiciones iniciales de tensión o de precarga en los capacitores para reducir el tiempo de cómputo. Los resultados analíticos y experimentales se validan mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

Palabras clave: Sistemas FC, ajuste funcional, gestión de energía.

ABSTRACT

In this work, a mathematical model of efficiencies for hybrid Fuel Cell (FC) systems is presented, considering the series (SH), parallel (PH), and serial-parallel (SPH) topologies. In these systems, were implemented modular non-inverting Buck-Boost converters. Their efficiency functions depend on their operating points, particularly their output currents and operation modes (Buck, Boost, and Buck-Boost). In addition, the DC Bus efficiency has been modeled and used in each system, corresponding to a function of the load duty cycle with a frequency of 100 Hz. This DC Bus's peak power and nominal voltage correspond to 1.5 kW and 48 V, respectively. These hybrid systems were implemented in SIMULINK / MATLAB®, considering the capacitors' initial voltage or pre-charge conditions to reduce the computation time. The analytical and experimental results are validated using the Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSE).

Keywords: FC Systems, curve fitting, energy management.

¹ Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia.
E-mail: haramirez@unisalle.edu.co; mpcamargo@unisalle.edu.co; jfsalazar@unisalle.edu.co

² Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., Colombia, Grupo de investigación MEM.
E-mail: carlostorresp@usta.edu.co

* Autor de correspondencia: haramirez@unisalle.edu.co

INTRODUCCIÓN

El hidrógeno ha sido considerado como un vector energético para hacer frente al cambio climático [1-2]. Diferentes actores a nivel mundial han presentado propuestas para reducir emisiones, con la finalidad de cumplir las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales fueron definidos en el año 2015. En particular, el ODS 7, busca aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, además de promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias, entre otras, contribuyendo a limitar el aumento de la temperatura mundial en 2 grados centígrados [3]. Para la implementación de estas tecnologías, se presentan desafíos tanto en los métodos limpios requeridos para su producción, como en el marco regulatorio y el establecimiento de mercados maduros que incentiven su uso. De esta forma se logrará la reducción de su costo total de instalación, dado en USD/kW, y se aumentará su competitividad frente a otros tipos de energías convencionales, como la solar fotovoltaica y la eólica. A nivel de Latinoamérica, Chile es pionero con la implementación de estrategias en hidrógeno, mientras que en Uruguay y Brasil se encuentran en etapa de preparación normativa y puesta en marcha de proyectos piloto, respectivamente. Así mismo, en Colombia y Argentina se encuentran en etapa inicial de establecimiento de políticas para su uso [4].

Adicionalmente, ante esta fuente de generación no regulada mencionada anteriormente, se requieren de Dispositivos Almacenadores Auxiliares (Auxiliary Storage Devices, ASDs) y etapas adaptadoras de tensiones que permitan extender su vida útil y realizar una gestión adecuada de la energía hacia la carga. La interacción de todos estos elementos en conjunto se define como sistema híbrido, y tienen la posibilidad de ser autónomos (off-grid) o de conectarse a la red (on-grid). Para una selección adecuada de convertidores conmutados en sistemas híbridos, se requiere considerar aspectos tales como el costo, la eficiencia, la potencia de operación y la flexibilidad que se tiene en el rango de operación para las tensiones y corrientes de entrada/salida. Por tal motivo, un convertidor modular Buck-Boost

es adecuado para este tipo de sistemas, ofreciendo un amplio ancho de banda [5-6]. Así mismo, según la forma como se encuentren interconectados los diferentes elementos, se pueden clasificar en Topología Serie (Series Hybrid, SH), Paralelo (Parallel Hybrid, PH) y Serie-Paralelo (Serial-Parallel Hybrid, SPH) [7-10].

En la literatura, se han realizado estudios previos, en donde se han modelado matemáticamente las eficiencias de las topologías híbridas, en el contexto de sistemas FC [11]. Así mismo, estas curvas han sido obtenidas experimentalmente, en donde se observa una diferencia representativa respecto a las modeladas teóricamente, dado que no han sido considerados efectos tales como: eficiencia variable de los convertidores modulares DC-DC empleados, ya que dependen de su punto de operación; inestabilidades presentes en los lazos de tensión que regulan el Bus DC, dado la naturaleza unidireccional de los convertidores empleados; y efectos parásitos y de modelado térmico asociados a los MOSFETS, cableado y circuitos integrados impresos (Printed Circuit Board, PCBs) [12].

A partir de las diferencias evidentes entre el modelo matemático y los resultados experimentales obtenidos, se resalta el aporte de este trabajo, cuya metodología consiste, en primera instancia, en el planteamiento de un modelo matemático de eficiencia del convertidor modular Buck-Boost, el cual depende de su modo de operación. Luego, se considera un modelo de eficiencia del Bus DC, en función del ciclo de trabajo de la carga. Posteriormente, se plantean modelos de eficiencia teóricos para las topologías SH, PH y SPH, donde se utilizan las eficiencias individuales de los convertidores DC-DC conmutados utilizados y el Bus DC. Estas topologías se implementan en SIMULINK/MATLAB®, con la finalidad de contrastar los resultados obtenidos analíticamente, con las curvas de eficiencia reales. Finalmente, en la última sección, se sintetizan las principales conclusiones y futuras líneas de trabajo.

METODOLOGÍA

En esta sección se obtendrá el correspondiente modelo de eficiencias del convertidor modular empleado, el cual será validado mediante SIMULINK/MATLAB®. Así mismo, se presentará el modelo matemático de

las curvas de eficiencia correspondientes a cada una de las topologías consideradas (SH, PH y SPH).

Modelo de eficiencias del convertidor Buck-Boost modular seleccionado

Se implementa en SIMULINK el convertidor Buck-Boost modular seleccionado de la Figura 1, ante diferentes corrientes de salida i_o y para sus diferentes modos de operación: Buck ($V_g > V_o$), Boost ($V_g < V_o$) y Buck-Boost ($V_g \approx V_o$). Posteriormente, se realiza un ajuste polinómico, mediante mínimos cuadrados, de sus correspondientes funciones de eficiencia reales, que provienen de [13] y se encuentran en función de su corriente promedio I_o , tal como se ilustra en la ecuación (1):

$$\begin{aligned}\eta_{Buck}(I_o)[\%] &= 0,0034I_o^3 - 0,1142I_o^2 + 1,1965I_o + 92,681 \\ \eta_{Buck-Boost}(I_o)[\%] &= 0,0033I_o^3 - 0,1138I_o^2 + 1,1818I_o + 91,677 \quad (1) \\ \eta_{Boost}(I_o)[\%] &= 0,004I_o^3 - 0,125I_o^2 + 1,1821I_o + 92,885\end{aligned}$$

Los coeficientes de determinación R^2 obtenido para las eficiencias η_{Buck} y $\eta_{Buck-Boost}$ corresponden al valor 1, mientras que para η_{Boost} es de 0.9309, lo cual es muestra una apropiada bondad de su ajuste.

El modelo de simulación implementado en SIMULINK, el cual será considerado para las topologías híbridas estudiantes en este trabajo, se muestra en la Figura 1. Los parámetros para el sistema en lazo abierto y su Control Modo Corriente Promedio (Averaged Current-Mode Control, ACC) se encuentran en [5-6].

Modelos matemáticos de eficiencias

Para ilustrar la metodología empleada en este trabajo, la cual busca obtener una comparativa de

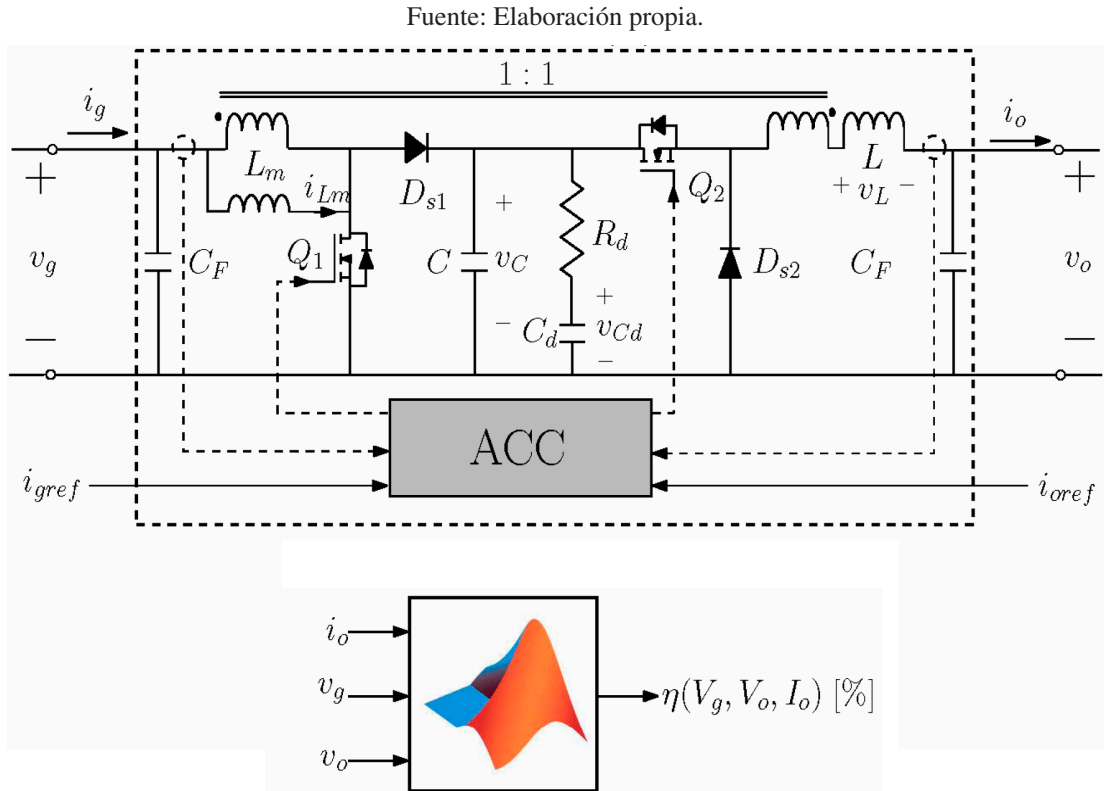


Figura 1. Modelo de simulación del convertidor modular empleado en las topologías SH, PH y SPH, en conjunto con su correspondiente modelo de eficiencias.

eficiencias teórica de las topologías híbridas SH, PH y SPH, para contrastar los modelos matemáticos y resultados experimentales obtenidos para cada una de ellas [8], se emplea el perfil de carga pulsante $P_L(t)$, con $P_L(t)$, con $f = \frac{1}{T} = 100\text{Hz}$, con un valor promedio constante $\bar{P}_L(t) = P_{Lavg} = P_{Lmax}D$. Así mismo, asumiendo que la dinámica de la carga es mucho mayor que la FC, con la finalidad de extender su vida útil, tal que $\bar{P}_{FC}(t) = P_{FCavg}$ y el sistema se encuentra en régimen permanente, es decir, el ASD conserva su energía al final de cada periodo T , tal como se aprecia en la ecuación (2):

$$\begin{aligned} \bar{P}_{ASD} &= \frac{1}{T} \int_0^T P_{ASD}(t) dt = P_{ASD}^+ D - \\ P_{ASD}^- D' &= 0 \Rightarrow P_{ASD}^+ D = P_{ASD}^- D' \end{aligned} \quad (2)$$

Donde $D' = 1 - D$, corresponde al ciclo de trabajo complementario de la carga en estado estacionario. Los perfiles de potencia empleados para determinar las eficiencias η_S , η_P y η_{SP} , se muestran en la Figura 2:

La eficiencia para cada una de las topologías híbridas consideradas, se muestran en la ecuación (3). Así mismo, es importante resaltar que la cantidad de elementos empleados, que corresponden a fuente no regulada, convertidores modulares DC-DC y ASD, son iguales en cada una de ellas, con la finalidad de garantizar una comparativa adecuada.

$$\eta_{S,P,SP} = \frac{\bar{P}_L(t)}{\bar{P}_{FC}(t)} = \frac{P_{Lavg}}{P_{FCavg}} = \frac{P_{Lmax}D}{P_{FCavg}} \quad (3)$$

Topología híbrida serie (SH)

Para la obtención del correspondiente modelo matemático de eficiencia de esta topología, se parte del sistema implementado en [7], el cual se muestra en la Figura 3:

Es importante aclarar que como los convertidores modulares 2 y 3 se encuentran conectados en paralelo, tanto sus tensiones de entrada/salida y sus corrientes de salida son iguales ($I_{o2} = I_{o3}$), ya que $P_o(t)$ se distribuye igualmente, por tal motivo $\eta_2(I_{o2})$

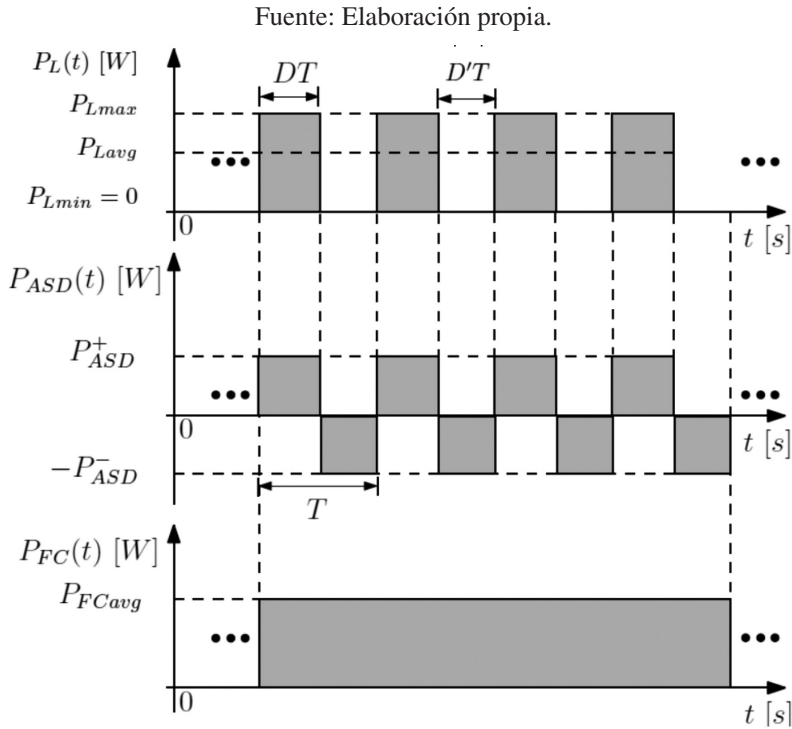


Figura 2. Perfiles de potencias $P_L(t)$, $P_{ASD}(t)$ y $P_{FC}(t)$ considerados para la obtención de las funciones de eficiencia analíticas consideradas en este estudio.

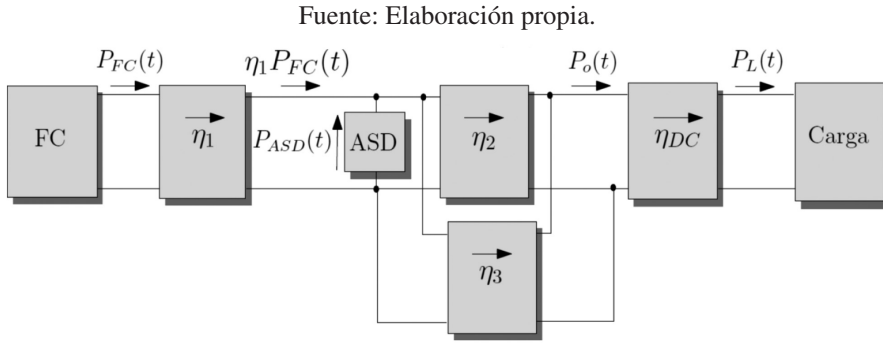


Figura 3. Topología SH empleada para determinar analíticamente su eficiencia.

$= \eta_3(I_{o3})$. Así mismo, se considera la eficiencia del Bus DC como $\eta_{DC}(D)$, es decir como una función del ciclo de trabajo de la carga D. La potencia instantánea en la carga $P_L(t)$ viene dada como se muestra en la ecuación (4):

$$P_L(t) = P_o(t) \eta_{DC}(D) = \eta_2(I_{o2}) [\eta_1(I_{o1}) P_{FC}(t) + P_{ASD}(t)] \eta_{DC}(D) \quad (4)$$

Promediando la expresión anterior, en un periodo de tiempo T , y considerando los perfiles de carga de la Figura 3, se obtiene la eficiencia analítica de la ecuación (5):

$$\eta_S(I_{o1}, I_{o2}, D) = \frac{\bar{P}_L(t)}{P_{FC}(t)} = \frac{P_{Lmax} D}{P_{FCavg}} = \eta_1(I_{o1}) \eta_2(I_{o2}) \eta_{DC}(D) \quad (5)$$

Es importante aclarar que la función de eficiencia del Bus DC $\eta_{DC}(D)$ es la misma para todas las topologías consideradas en este estudio, dado que los perfiles de carga $P_L(t)$ y la tensión del Bus es regulada en 48 V, es decir, el Estado de Carga (State Of Charge, SOC) del condensador electrolítico conectado es constante, dado que el sistema se considera en estado estable. Por otro lado, dado que la dinámica de la carga es mucho más rápida que la del ASD, se considera que su eficiencia $\eta_{ASD} = 1$.

Topología paralelo carga (PH)

Para la obtención del modelo matemático de eficiencia de esta topología, se requiere del sistema implementado en [9], el cual se muestra en forma de manera esquemática en la Figura (4):

Adicionalmente a las potencias instantáneas presentados en la Figura 3, se requieren de las potencias $P_{ASDC}(t)$ y $P_{ASDD}(t)$, las cuales se encuentran estrechamente relacionadas con la carga y descarga del ASD, respectivamente, y se ilustran en la Figura 5:

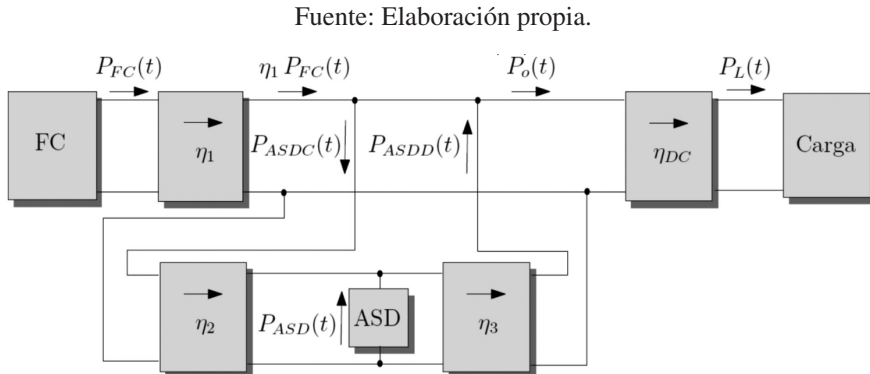
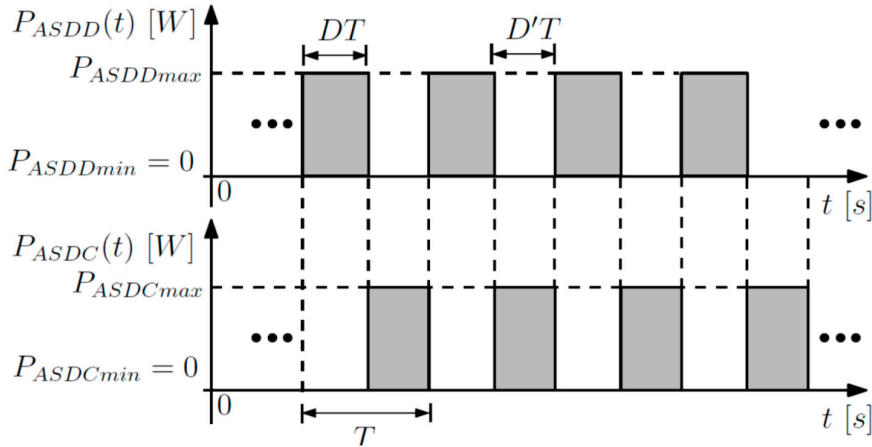


Figura 4. Topología PH empleada para determinar su función de eficiencia.

Fuente: Elaboración propia.


 Figura 5. Perfiles de potencia instantáneos de carga y descarga del ASD $P_{ASDC}(t)$ y $P_{ASDD}(t)$.

Considerando que las eficiencias $\eta_1(I_{o1})$, $\eta_2(I_{o2})$, $\eta_3(I_{o3})$ y $\eta_{dc}(D)$, son diferentes, debido a sus puntos de operación, la potencia instantánea en la carga $P_L(t)$ viene dada por la ecuación (6):

$$P_L(t) = P_o(t)\eta_{DC}(D) = \{\eta_1(I_{o1})P_{FC}(t) + P_{ASDD}(t) - P_{ASDC}(t)\}\eta_{DC}(D) \quad (6)$$

De manera análoga, promediando la expresión anterior, en un periodo de tiempo T , y considerando que $P_{ASDCmax} = \eta_1 P_{FCavg}$, $\eta_2(I_{o2})P_{ASDCmax} = P_{ASD}^-$ y $P_{ASDDmax} = \eta_3(I_{o3})P_{ASD}^+$, en conjunto al principio de conservación de energía del ASD representado en la ecuación (2), donde se establece que $P_{ASD}^+ D = P_{ASD}^- D'$, se obtiene la función de eficiencia para la topología PH en la ecuación (7):

$$\eta_P(I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}, D) = \frac{\bar{P}_L(t)}{P_{FC}(t)} = \eta_1(I_{o1})\{\eta_2(I_{o2})\eta_3(I_{o3}) + [1 - \eta_2(I_{o2})\eta_3(I_{o3})]D\}\eta_{DC}(D) \quad (7)$$

Topología serie-paralelo (SPH)

En este apartado se obtendrá analíticamente la correspondiente función de eficiencia para el sistema FC SPH, cuyo esquema se presenta en la Figura 6, considerando las especificaciones de trabajos anteriores tales como [8].

Así mismo, se requieren de las potencias instantáneas que se presentan en la Figura 2 y Figura 5, que

fueron de utilidad en las topologías SH y PH, respectivamente, en conjunto con el nuevo perfil $P_{FCL}(t)$, el cual se ilustra en la Figura 7:

Por otro lado, como las eficiencias $\eta_1(I_{o1})$, $\eta_2(I_{o2})$, $\eta_3(I_{o3})$ y $\eta_{dc}(D)$ son diferentes, debido a sus puntos de operación, la potencia instantánea en la carga $P_L(t)$ viene dada por la ecuación (8):

$$P_L(t) = P_o(t)\eta_{DC}(D) = \{\eta_1(I_{o1})P_{FCL}(t) + P_{ASDD}(t)\}\eta_{DC}(D) \\ \eta_{DC}(D)P_L(t) = \{\eta_1(I_{o1})[P_{FC}(t) - P_{ASDC}(t)] + \eta_3(I_{o3})[\eta_2(I_{o2})P_{ASDC}(t) + P_{ASD}(t)]\}\eta_{DC}(D) \quad (8)$$

Promediando la ecuación (8) en un periodo de tiempo T , y considerando que $P_{ASDCmax} = P_{FCavg}$, $\eta_2(I_{o2})P_{ASD}^-$ y $P_{ASDDmax} = \eta_3(I_{o3})P_{ASD}^+$, en conjunto al principio de conservación de energía del ASD representado en la ecuación (2), donde se establece que $P_{ASD}^+ D = P_{ASD}^- D'$, se obtiene la función de eficiencia para la topología SPH en la ecuación (9):

$$\eta_{SP}(I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}, D) = \frac{\bar{P}_L(t)}{P_{FC}(t)} = \{\eta_2(I_{o2})\eta_3(I_{o3}) + [\eta_1(I_{o1}) - \eta_2(I_{o2})\eta_3(I_{o3})]D\}\eta_{DC}(D) \quad (9)$$

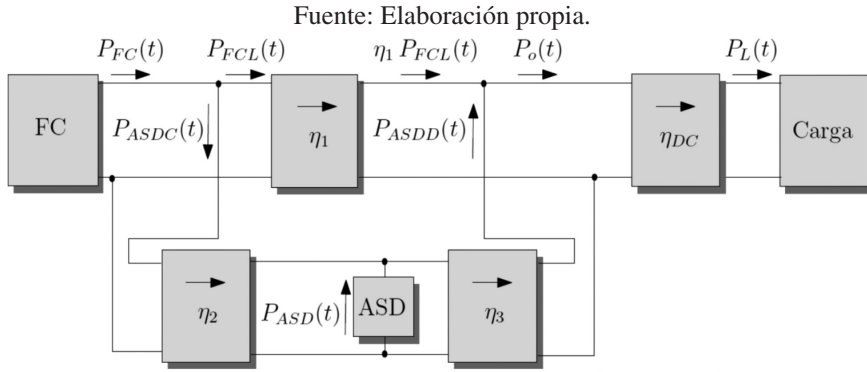


Figura 6. Topología SPH empleada para obtener su eficiencia analítica.

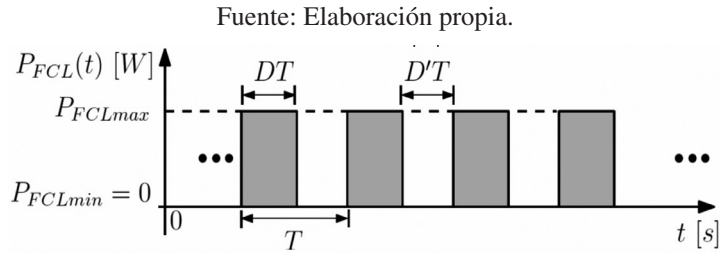


Figura 7. Perfil de potencia instantáneo $P_{FCL}(t)$, el cual representa flujo de potencia que circula por el convertidor modular 1 y el Bus DC, con eficiencias $\eta_1(I_{o1})$ y $\eta_{dc}(D)$, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones iniciales de los voltajes en los capacitores

La tensión obtenida en terminales de la FC, la cual corresponde a V_{FC} (P_{FCavg}), es necesaria como condición inicial para el SOC del filtro paso bajo de segundo orden, el cual se encuentra conectado entre la FC y los convertidores modulares 1 (para todos los sistemas híbridos) y/o 2 (sólo para la topología SPH) y, de esta manera, es posible reducir la complejidad computacional para ejecutar las diferentes simulaciones requeridas en este apartado. La finalidad del filtro mencionado consiste en limitar significativamente el rizado de la corriente de la FC, que corresponde I_{FC} (P_{FCavg}), permitiendo extender de esta manera su vida útil, al evitar la degradación de su potencia [14-16]. Por otro lado, se consideran también las condiciones iniciales para el ASD como $V_{ASD} = V_{ASDref} = 50V$ y el Bus DC como $V_o = V_{oref} = 48V$. Así mismo, se emplea un modelo estático de la FC que representa un circuito equivalente de Thévenin, donde $V_{th} = 51.2V$, $R_{th} = 1.2\Omega$ e $I_N = \frac{V_{th}}{R_{th}} = 42.67A$, tal

como se ilustra en la Figura 8. En el caso de la tensión de los condensadores intermedios C y C_d , para cada uno de los convertidores modulares empleados, cuyo circuito esquemático se encuentra en la Figura 1, se establecen como condición inicial $V_C = V_{Cd} = \max(V_g, V_o)$.

Simulaciones de topologías híbridas

Para los resultados de simulación obtenidos, es importante resaltar que las topologías objeto de estudio, que corresponden a SH, PH y SPH, fueron implementadas en SIMULINK/MATLAB®, considerando las especificaciones y algoritmos de gestión de energía presentados en [7-9], que se ilustran en las Figuras 3, 4 y 6, respectivamente. Los tiempos de establecimiento para las variables en las diferentes topologías SH, PH y SPH equivalen a 250, 250 y 200 ms, respectivamente. El tiempo máximo de simulación considerado para los diferentes sistemas híbridos es de 400 ms, de tal manera que posibilite el cálculo de las eficiencias $\eta_1(I_{o1})$, $\eta_2(I_{o2})$, $\eta_3(I_{o3})$ y $\eta_{DC}(D)$ en estado estable.

Fuente: Elaboración propia.

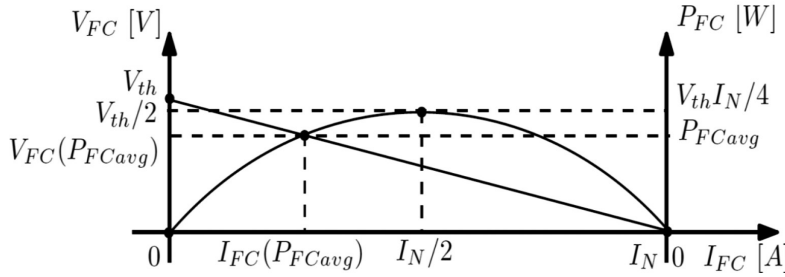


Figura 8. Curva característica estática de la FC, cuyo punto de operación corresponde a las coordenadas $(I_{FC}(P_{FCavg}), (V_{FC}(P_{FCavg})$ en el plano V_{FC} [V] Vs. I_{FC} [A].

En el Bus DC, se encuentran conectadas por resistencias fijas comerciales de 42, 47 y 47Ω, las cuales se emplean en los sistemas SH, PH y SPH, respectivamente, y se encuentran relacionadas con P_{Lmin} . Adicionalmente, para considerar las variaciones de carga, se utiliza una resistencia conectada en paralelo mediante un MOSFET de lado bajo, la cual se encuentra relacionada con P_{Lmax} . De esta manera, es posible obtener un perfil de carga instantáneo $P_L(t)$, con una frecuencia

$$f = \frac{1}{T} = 100 \text{ Hz} \text{ y un ciclo de trabajo } D \in [0, 100] \text{ \%}.$$

Para un adecuado funcionamiento de esta carga periódica, se emplea una señal de activación, mediante una compuerta lógica AND, Bloques Step y Pulse Generator de SIMULINK, una vez obtenido un tiempo de establecimiento máximo de 250 ms en las variables de estado de cada uno de los sistemas híbridos FC.

Modelo de ajuste de eficiencia del bus DC

A partir de la función de eficiencia de la topología híbrida serie, la cual se encuentra en la ecuación (5), obteniendo las eficiencias individuales para cada uno de los convertidores modulares simulación, que corresponden a $\eta_1(I_{o1})$ y $\eta_2(I_{o2}) = \eta_3(I_{o3})$, se obtiene $\eta_{DC}(D)$ mediante un ajuste polinómico, con coeficiente de determinación R^2 igual a 0,9853, tal como se muestra en la ecuación (10), la cual es la misma función para todos los sistemas considerados en este trabajo, dado que $V_o = V_{oref} = 48$, considerándose un SOC constante.

$$\eta_{DC}(D) [\%] = 4 \times 10^{-5} D^3 - 8 \times 10^{-3} D^2 + 5,9 \times 10^{-1} D + 82,97 \quad (10)$$

Curvas de eficiencias topologías híbridas

Las eficiencias experimentales estudios previos tales como [9], que se muestran en la Figura 9a, son contrastadas mediante el cálculo de las eficiencias $\eta_1(I_{o1})$, $\eta_2(I_{o2})$ y $\eta_3(I_{o3})$, provenientes en las simulaciones de las topologías provenientes, en conjunto con la expresión para $\eta_{DC}(D)$, de la ecuación 10. A partir de las ecuaciones (5), (7) y (9) se obtienen las eficiencias analíticas de la Figura 9b.

Por otro lado, los puntos de para cada una de las topologías consideradas en este trabajo, tanto experimental como analítico, se muestran en la Tabla I (ver página siguiente).

Evaluación de bondad de ajuste de las curvas de eficiencia analíticas

Para evaluar la metodología propuesta en este trabajo, el cual tiene como objetivo obtener de manera analítica las funciones de eficiencia para las diferentes topologías híbridas SH, PH y SPH, se propone el indicador adimensional C_{eff} aplicado a diversos modelos matemáticos, el cual se define como el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) [17-18] y se calcula mediante la ecuación (11):

$$C_{eff} = NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [O_i - P_i]^2}{\sum_{i=1}^N [O_i - O]^2} = 1 - \left(\frac{RMSE}{SD} \right)^2 \quad (11)$$

Donde el conjunto de datos (O_i, P_i) corresponden a la muestra i -ésima, de N muestras en total, observados (experimentales) y calculados mediante el modelo (analíticos). Así mismo, $RMSE$ y SD , corresponden al Error Cuadrático Medio (Root Mean Square

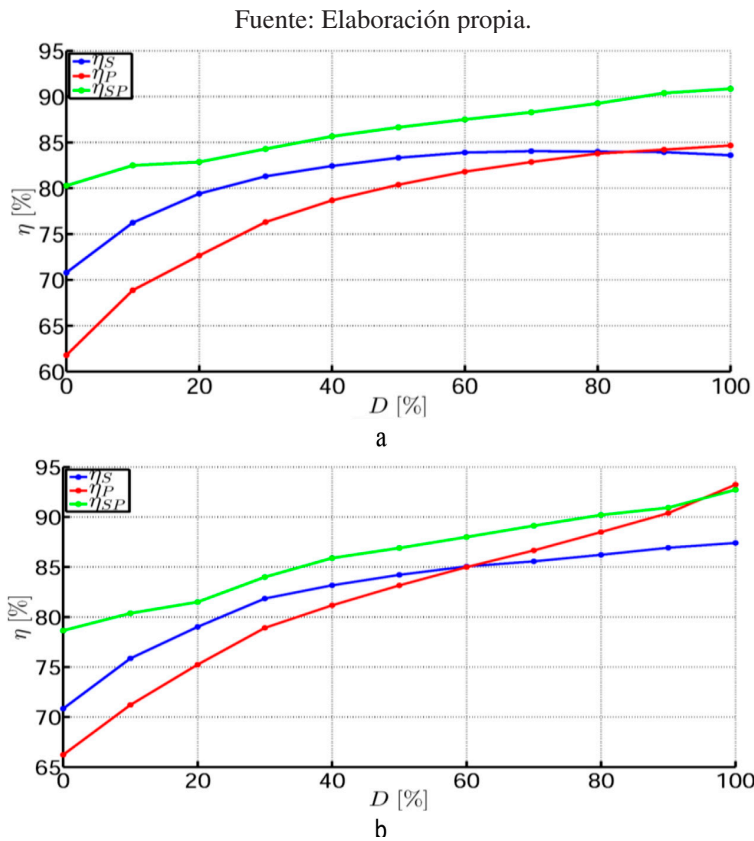


Figura 9. Funciones de eficiencia: (a) experimentales, obtenidas en [9] y (b) analíticas para las topologías SH, PH y PH, las cuales corresponden a η_S , η_P y η_{SP} , respectivamente.

Tabla I. Comparativa de resultados experimentales y de simulación para los sistemas híbridos SH, PH y SPH.

D [%]	Resultados Experimentales			Resultados de Simulación		
	η_S [%]	η_P [%]	η_{SP} [%]	η_S [%]	η_P [%]	η_{SP} [%]
10	70,7894	61,7871	80,2763	70,8398	66,2230	78,6465
20	76,2407	68,8711	82,4874	75,8616	71,2101	80,3708
30	79,4074	72,6483	82,8557	79,0121	75,2384	81,4947
40	81,2998	76,3056	84,2905	81,8466	78,9116	83,9921
50	82,4236	78,6730	85,6537	83,1656	81,1625	85,8904
60	83,3226	80,3826	86,6436	84,2117	83,1585	86,8932
70	83,8916	81,8018	87,4995	85,0518	84,9827	87,9915
80	84,0401	82,8579	88,2876	85,5619	86,6536	89,1207

Fuente: Elaboración propia.

Error) y Desviación Estándar (Standard Deviation), respectivamente. El criterio para una evaluación de la bondad del ajuste para las curvas de eficiencia obtenidas se muestra en la Tabla II [17]:

A partir del criterio enunciado en la Tabla II, la evaluación de la bondad en los modelos analíticos obtenidos para las topologías SH, PH y SPH se presenta en la Tabla III (ver página siguiente).

Tabla II. Criterio de evaluación de bondad del ajuste.

Evaluación	$\left(\frac{RMSE}{SD}\right) * 100 [\%]$	$C_{eff} [-]$
Muy Buena	$\leq 30\%$	$\geq 0,91$
Buena	$30 - 40\%$	$0,84 - 0,91$
Aceptable	$40 - 50\%$	$0,75 - 0,84$
No Aceptable	$>50\%$	$< 0,75\%$

Fuente: [17].

Tabla III. Evaluación de las funciones de eficiencias analíticas desarrolladas en este trabajo.

Topología	$\left(\frac{RMSE}{SD}\right) * 100 [\%]$	$C_{eff} [-]$	Evaluación
SH	35,5366	0.8737	Buena
PH	9,9780	0.9900	Muy Buena
SPH	28,9271	0.9163	Muy Buena

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En esta última sección se expondrán los principales aportes de este artículo y el direccionamiento de futuras líneas de investigación.

Se ha desarrollado modelo de eficiencias del convertidor Buck-Boost modular, con la finalidad de obtener curvas de eficiencia teóricas cercanas a las reales para las diferentes topologías híbridas consideradas en este trabajo, cuyos coeficientes de eficiencia C_{eff} se aprecian en la Tabla III, donde se obtuvo una evaluación de Muy Buena para las topologías PH y SPH, mientras que la SH corresponde a una valoración de Buena. Cada convertidor modular posee un modo de operación diferente, el cual depende de sus corrientes promedio de salida y difiere en cada sistema FC.

Se ha propuesto un modelo de eficiencia para el Bus DC, el cual se encuentra en función de ciclo de trabajo de la carga D , con una frecuencia de 100 Hz , de tal manera que permite un ajuste apropiado de las diferentes modelos de eficiencias propuestos en las ecuaciones (5), (7) y (9). Así mismo, es importante destacar la eficiencia del ASD ha sido considerada constante e igual al 100% dado que su tensión se

encuentra regulada en 50 V , garantizando su SOC constante, y su dinámica es lenta en comparación con la del resto del sistema. Esta consideración se extiende al filtro paso bajo de segundo orden que se encuentra conectado en terminales de la FC, donde la condición inicial para V_{FC} se determina a partir de la curva estática de la Figura 8.

Para mejorar las funciones de eficiencia propuestas para las topologías SH, PH y SPH, se requiere de un modelo matemático multivariable del convertidor Buck-Boost modular empleado, de tal manera que se consideren otros descriptores tales como: su corriente y tensión de entrada (I_g , V_g) y su tensión de salida (V_o), con la finalidad de obtener una función de eficiencia $\eta(V_g, I_g, V_o, I_o)$. Así mismo, es importante modelar en trabajos futuros efectos parásitos asociados a los elementos pasivos, debido la frecuencia de conmutación de los convertidores utilizados, que corresponde a 100 kHz , en conjunto a la consideración de efectos térmicos en los diferentes dispositivos de estado sólido que los conforman, tales como diodos, MOSFETS, reguladores lineales, integrados, entre otros.

Como futuro trabajo de investigación, se requiere incluir en los modelos matemáticos de eficiencias

para las topologías la dinámica del ASD, lo cual podría permitir obtener un modelo de eficiencias cercano a los resultados experimentales, para frecuencias de 0,5 y 5 Hz. Así mismo, se requiere considerar un modelo de gran señal del convertidor modular en SIMULINK/MATLAB®, de tal manera que se reduzca el tiempo de cómputo, con la finalidad emplear diferentes perfiles de carga de otras frecuencias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Vicerrectoría de Investigación y Transferencia (VRIT), de la Universidad de La Salle, a través del proyecto bajo código institucional IELE221-211.

REFERENCIAS

- [1] J.C. Martín Valiño. “Planta de producción de H₂ con autoconsumo de energía solar fotovoltaica”, Tesis Máster, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/45641>
- [2] Z. Abdin, A. Zafaranloo, A. Rafiee, W. Mérida, W. Lipiński, and K.R. Khalilpour, “Hydrogen as an energy vector”, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 120, pp. 109620, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109620.
- [3] J.P. Sarmiento, “¿Cuál es la agenda de desarrollo pos-2015? Una mirada desde los determinantes del riesgo de desastres”, *REDER*, vol. 1, no. 1, pp. 29-42, 2017, doi: 10.55467/reder.v1i1.3.
- [4] S. Mantilla and D.M.F. Santos, “Green and Blue Hydrogen Production: An Overview in Colombia”, *Energies*, vol. 15, pp. 8862, 2022, doi: 10.3390/en15238862.
- [5] C. Restrepo, J. Calvente, A. Romero, E. Vidal-Idiarte, and R. Giral, “Current-Mode Control of a Coupled-Inductor Buck-Boost DC–DC Switching Converter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 5, pp. 2536-2549, 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2172226.
- [6] C. Restrepo, T. Konjedic, J. Calvente, M. Milanovic, and R. Giral, “Fast Transitions Between Current Control Loops of the Coupled-Inductor Buck-Boost DC-DC Switching Converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 3648-3652, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2231882.
- [7] H. Ramírez-Murillo, C. Restrepo, J. Calvente, A. Romero, and R. Giral, “Energy Management DC System Based on Current-Controlled Buck-Boost Modules,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2644-2653, 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2330198.
- [8] H. Ramírez-Murillo, C. Restrepo, J. Calvente, A. Romero, and R. Giral, “Energy Management of a Fuel-Cell Serial-Parallel Hybrid System,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 5227-5235, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2395386.
- [9] H. Ramírez-Murillo et al., “An Efficiency Comparison of Fuel-Cell Hybrid Systems Based on the Versatile Buck-Boost Converter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 1237-1246, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2678160.
- [10] C. Restrepo and C. González-Castaño, “Digital control strategies of DC-DC converters in automotive hybrid powertrains”, in *Modeling, Operation, and Analysis of DC Grids*, A. Garcés, Ed., London, UK: Elsevier, 2021, ch. 10, pp. 245-287, doi: 10.1016/B978-0-12-822101-3.00015-0.
- [11] C.A. Ramos-Paja, A. Romero, R. Giral, J. Calvente, and L. Martinez-Salamero, “Mathematical analysis of hybrid topologies efficiency for PEM fuel cell power systems design”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 9, pp. 1049-1061, 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.01.032.
- [12] H. Ramírez Murillo. “Diseño, supervisión y control de sistemas híbridos PEMFC”, Doctoral dissertation, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España, 2015. [En línea]. Disponible: https://repositori.urv.cat/estatic/TDX0011/es_TDX1945.html
- [13] C. Restrepo, J. Calvente, A. Cid-Pastor, A. E. Aroudi and R. Giral, “A Noninverting Buck-Boost DC-DC Switching Converter with High Efficiency and Wide Bandwidth”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 9, pp. 2490-2503, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2108668.

- [14] D. Sha, Y. Xu, J. Zhang and Y. Yan, “Current-Fed Hybrid Dual Active Bridge DC-DC Converter for a Fuel Cell Power Conditioning System with Reduced Input Current Ripple”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6628-6638, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2698376.
- [15] M. Pan, H. Zhou, J. Cao, Y. Liu, J. Hao, S. Li, and C.H. Chen, “Water Level Prediction Model Based on GRU and CNN”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 60090-60100, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2982433.
- [16] T. Jarry, A. Jaafar, C. Turpin, F. Lacrosonniere, E. Bru, O. Rallieres, and M. Scohy, “Impact of high frequency current ripples on the degradation of high-temperature PEM fuel cells (HT-PEMFC),” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.027.
- [17] R.H. McCuen, Z. Knight, and A.G. Cutter, “Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index,” *Journal of hydrologic engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 597-602, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597).
- [18] T. Mathevet, N. Le Moine, V. Andréassian, H. Gupta, and L. Oudin, “Multi-objective assessment of hydrological model performances using Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiencies on a worldwide large sample of watersheds”, *Comptes Rendus, Géoscience*, vol. 355 (S1), pp. 1-25, 2023, doi: 10.5802/crgeos.189.