

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING
OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

2026

ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD



Vol. 10 Núm. 2 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2026-050410175100-102. ISSN: 2448-8186



DIRECTORIO

L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO

Rector

DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA

Secretario de Servicios Académicos

LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO

Encargado del Despacho de la Secretaría de
Servicios Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.1atindex.unam.mx/> JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 2, Año 2026, es una publicación continua editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2026-050410175100-102, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 31 de agosto 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores
EDITORIA EN JEFE

M.A. Pauly González Mayo
GESTORÍA Y ASISTENCIA EDITORIAL

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano
MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez
ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO

Dra. Sulma Guadalupe Gómez Jiménez
Dra. Margarita del Carmen Noguera Miceli
ASISTENCIA EN TRADUCCIÓN Y MAQUETADO

EDITORES ASOCIADOS INVITADOS

Dr. Darío Colorado Garrido. **Universidad Veracruzana**
Dra. Linda Viviana García Quiñonez. **Universidad Veracruzana**
Dr. Cristian Gómez. **Universidad Veracruzana**
Dra. Deysi Carmina Peña Ortiz. **Universidad Veracruzana**
Dr. Roberto Agustín Conde Gutiérrez. **Universidad Veracruzana**
Dr. Gerardo Alcalá Perea. **Universidad Veracruzana**
Dra. Zaira Ruth Zuviría López. **Universidad Autónoma de Guadalajara**
Dra. Karen Rodríguez Rosales. **Universidad Autónoma de Querétaro**
Dra. Laura López Díaz. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**
Dr. Erik Ramírez Morales. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, **Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luís Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

Índice Vol. 10 Núm. 2 (2026)

Carta editorial

Zuviría-López Z.R.

i-ii

Integración de calor en la purificación de ciclohexano grado textil utilizando etilenglicol como solvente

1-16

Cruz-Valdez J.A.^{1*}, Álvarez-Alor B.², Montalvo-Salinas D.³, Garzón-Pérez A.S.⁴, Alvarado-Méndez P.E.⁵

Fotosíntesis artificial efecto sinérgico de Ti^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+} en los mecanismos de activación, acoplamiento c-c hacia la producción de isopropanol

17-30

Pérez- de la Cruz A.Y.¹, Montalvo-Salinas D.^{2*}, Cruz-Valdez J.A.¹, Pérez- Francisco J.M.¹, Jiménez- Castillo U.¹, Álvarez-Alor B.³

Predicción de la potencia en una turbina vestas v52 mediante regresión polinomial y una red neuronal

31-46

Olan-Barroso A.A.^{1*}, Alaffita-Hernández F.A.², Escobedo-Trujillo B.A.¹, Colorado-Garrido D.²

Estrategias de ingeniería de software verde para aplicaciones energéticamente eficientes

47-54

Morales-Reyes E.^{1*}, Pacheco-Reyes J.N.¹, Vázquez-Hernández R.¹, Gilbón-Aburto A.¹, Gómez-Manuel E.¹

Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico en Coatzacoalcos, México

55-70

Rodríguez-Flores E.¹, González-Martínez M.I.², Fuentes-Orozco S.², Garrido-Meléndez J.³, Márquez-Nolasco A.⁴, Conde-Gutiérrez R.A.^{4*}

Determinación de la acumulación de metales en *eichhornia crassipes* para valorización de biomasa

71-80

Benítez-Martínez X. S.¹, Domínguez-Villate W. A.¹, Núñez-Correa S.¹, Morales-Salas L.^{2,3*}

Restricciones de sostenibilidad y riesgo de cola en portafolios accionarios de México

81-96

Villada-Medina H.D.^{1*}, Rendón-García J.F.¹, Alcalá-Perea G.²

Análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada con reducción del rizo de corriente de entrada para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno

97-114

Hidalgo-Leal H.D.¹, Cruz-Gutiérrez F.^{1*}, May-Burgos L.D.¹, Sarao-Cruz L.D.J.¹, Pérez-Aguilar A.¹

Análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada con reducción del rizo de corriente de entrada para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno**Closed-loop analysis of a cascade boost converter with input current ripple reduction for hydrogen fuel cell applications**Hidalgo-Leal H.D.¹, Cruz-Gutiérrez F.^{1*}, May-Burgos L.D.¹, Sarao-Cruz L.D.J.¹, Pérez-Aguilar A.¹¹TecNM/ Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta

* Circuito Tecnológico No.1, Col. El Cuatro, C.P. 86418, La Venta Huimanguillo

Tabasco México

* faby.cg@laventa.tecnm.mx

Artículo Científico**Publicado: 31 de agosto 2026****RESUMEN**

En este trabajo se presenta el análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada modificado para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno. La propuesta se enfoca en la reducción del rizo de corriente de entrada mediante la selección adecuada de los parámetros del convertidor y su operación en una región específica. Se desarrolla el modelo matemático de la celda de combustible considerando sus características electroquímicas, el cual se implementa mediante una curva de polarización. Asimismo, se obtiene el modelo dinámico del convertidor en espacio de estados, el cual es posteriormente linealizado alrededor de un punto de operación para el diseño del controlador. El control del sistema se realiza mediante un compensador proporcional–integral (PI), diseñado en el dominio de la frecuencia utilizando criterios de estabilidad relativa a partir del diagrama de Bode. Los resultados de simulación muestran que el convertidor es capaz de operar en una condición cercana a la cancelación del rizo de corriente de entrada, así como mantener la regulación del voltaje de salida ante variaciones en la carga. Los resultados obtenidos validan la viabilidad de la topología propuesta para aplicaciones con celdas de combustible de hidrógeno.

Palabras clave: Convertidor elevador, celda de combustible, control PI, rizo de corriente, alta ganancia.

ABSTRACT

This paper presents the closed-loop analysis of a modified cascade boost converter for hydrogen fuel cell applications. The proposed approach focuses on reducing the input current ripple by properly selecting the converter parameters and operating within a specific region. A mathematical model of the fuel cell is developed considering its electrochemical characteristics and implemented through a polarization curve. Additionally, the dynamic model of the converter is obtained in state-space form and linearized around an operating point for control design purposes. The system is regulated using a proportional–integral (PI) controller designed in the frequency domain based on relative stability criteria through Bode analysis. Simulation results demonstrate that the converter operates near the input current ripple cancellation condition while maintaining output voltage

regulation under load variations. These results validate the feasibility of the proposed topology for hydrogen fuel cell applications.

Keywords: boost converter, fuel cell, PI control, current ripple, high gain.

INTRODUCCION

El uso de celdas de combustible de hidrógeno en sistemas de conversión de energía ha recibido una atención creciente debido a su alta eficiencia, baja emisión de contaminantes y viabilidad en aplicaciones estacionarias y de transporte. En particular, las celdas de combustible tipo PEM (Proton Exchange Membrane, por sus siglas en inglés) presentan características atractivas para sistemas eléctricos de potencia; sin embargo, su voltaje de salida suele ser bajo y depende fuertemente de la corriente demandada, por lo que resulta necesario emplear convertidores DC–DC que permitan elevar y regular el voltaje entregado a la carga [1]–[3].

Dentro de las topologías elevadoras, el convertidor Boost convencional y sus variantes han sido ampliamente utilizados por su simplicidad estructural y facilidad de implementación. No obstante, cuando se requieren altas relaciones de conversión, estas estructuras presentan desventajas asociadas a la operación con ciclos de trabajo elevados, mayores esfuerzos en los dispositivos semiconductores y reducción de la eficiencia [4], [5]. Por esta razón, en la literatura se han propuesto distintas configuraciones de convertidores de alta ganancia, entre las que destacan estructuras en cascada, arreglos con capacitores conmutados, inductores acoplados y convertidores entrelazados, las cuales permiten mejorar la relación de conversión sin operar en condiciones extremas [6]–[8].

En aplicaciones alimentadas por celdas de combustible PEM, el convertidor Boost convencional representa una de las soluciones más utilizadas debido a su estructura simple y facilidad de implementación. Sin embargo, cuando se requieren altas relaciones de elevación de voltaje, el convertidor debe operar con ciclos de trabajo cercanos a la unidad, lo que incrementa los esfuerzos eléctricos sobre los dispositivos semiconductores, reduce la eficiencia y deteriora el desempeño dinámico del sistema. Adicionalmente, la corriente absorbida desde la celda de combustible presenta un rizo significativo debido al proceso de conmutación del inductor de entrada, condición poco deseable en este tipo de fuentes electroquímicas, las cuales son sensibles a variaciones rápidas de corriente. La **Figura 1** ilustra de manera conceptual el comportamiento de un convertidor Boost convencional alimentado por una celda de combustible, resaltando tanto la presencia del rizo de corriente de entrada como las limitaciones asociadas a la obtención de altas ganancias de voltaje. En aplicaciones alimentadas por celdas de combustible, además de la ganancia de voltaje, un aspecto de especial interés es el rizo de corriente en la entrada del convertidor. A diferencia de otras fuentes, las celdas de combustible son sensibles a variaciones rápidas de corriente, las cuales pueden degradar su desempeño y afectar la vida útil del sistema. En consecuencia, diversos trabajos han abordado la reducción del rizo de corriente de entrada mediante técnicas como la conexión

entrelazada, el uso de inductores acoplados y configuraciones con corriente de entrada casi continua [9]–[12].

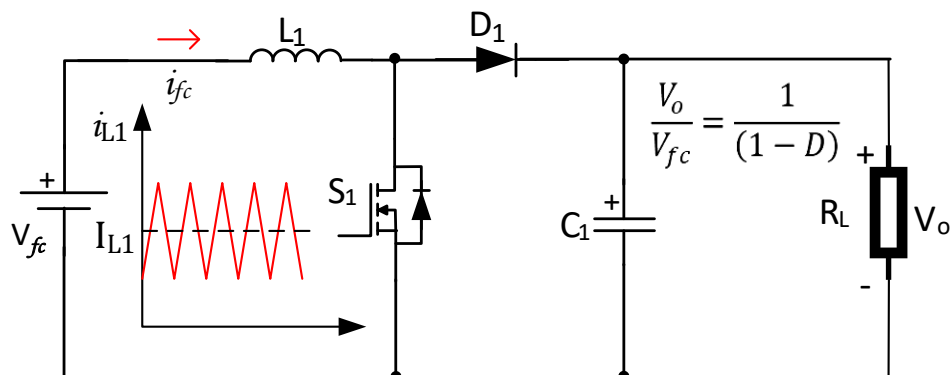


Figura 1 Representación conceptual de un convertidor Boost convencional alimentado por una celda de combustible PEM, mostrando el rizo de corriente de entrada y las limitaciones asociadas a la obtención de altas ganancias de voltaje.

Asimismo, se han reportado configuraciones elevadoras de alta ganancia que permiten obtener corrientes de entrada con rizo muy reducido o incluso nulo, evidenciando que la estructura del convertidor y la selección de sus parámetros influyen directamente en el comportamiento de la corriente de la fuente. Este aspecto resulta particularmente relevante en aplicaciones con fuentes electroquímicas, donde la calidad de la corriente de entrada impacta directamente en el desempeño del sistema [11], [12].

Por otra parte, los convertidores elevadores en cascada han sido ampliamente estudiados debido a su capacidad para lograr altas relaciones de conversión con esfuerzos moderados en los dispositivos. Sin embargo, en la mayoría de los trabajos, el análisis de estas topologías se centra en la ganancia estática, la eficiencia y la regulación del voltaje de salida, sin considerar de manera específica condiciones de operación orientadas a la reducción o cancelación del rizo de corriente de entrada. Asimismo, el estudio del comportamiento en lazo cerrado bajo dichas condiciones es limitado en la literatura [13].

Además del desarrollo de nuevas topologías, en la literatura reciente se han propuesto diversas estrategias de control para convertidores DC-DC con el propósito de mejorar la respuesta dinámica, incrementar la robustez frente a perturbaciones y reducir la sensibilidad a variaciones paramétricas. Entre las técnicas más empleadas se encuentran el control predictivo basado en modelos, el control por modos deslizantes y diversas variantes del controlador proporcional-integral (PI), las cuales han demostrado un desempeño satisfactorio en aplicaciones de conversión de potencia [14]–[16]. Si bien los métodos de control avanzados pueden ofrecer ventajas en términos de velocidad de respuesta y robustez, generalmente implican una mayor complejidad de implementación y un incremento en los requerimientos computacionales. En contraste, el controlador PI continúa siendo una de las estrategias más utilizadas en aplicaciones industriales debido a su simplicidad, facilidad de sintonización y desempeño confiable; además, investigaciones recientes han demostrado que

este esquema puede mejorarse mediante técnicas modernas de diseño para incrementar su desempeño sin perder sus ventajas de implementación [17]. Considerando que el objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento en lazo cerrado del convertidor elevador en cascada y evaluar la reducción del rizo de corriente de entrada en una aplicación con celda de combustible PEM, se seleccionó un controlador PI como estrategia de regulación, permitiendo que el análisis se centre en el desempeño de la topología propuesta y no en la complejidad del algoritmo de control.

Adicionalmente, en el modelado de sistemas basados en celdas de combustible es común emplear representaciones simplificadas de la fuente mediante curvas de polarización implementadas a través de funciones algebraicas o tablas de consulta. Este enfoque permite capturar la naturaleza no lineal de la celda sin incrementar significativamente la complejidad del modelo dinámico, siendo adecuado para el análisis y validación de convertidores de potencia en entornos de simulación [3], [13].

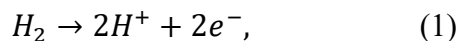
Aunque diversas topologías elevadoras con mecanismos de cancelación del rizo han sido reportadas previamente, la mayoría de los estudios se enfocan en el análisis del convertidor en lazo abierto o consideran fuentes ideales de tensión para evaluar su desempeño. En aplicaciones con celdas de combustible PEM, la calidad de la corriente demandada por el convertidor adquiere especial relevancia debido a la sensibilidad de estas fuentes a las variaciones rápidas de corriente.

En este contexto, la principal contribución de este trabajo consiste en analizar el comportamiento en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada alimentado por un modelo de celda de combustible basado en su curva de polarización, evaluando simultáneamente la regulación del voltaje de salida y la reducción del rizo de corriente de entrada bajo diferentes condiciones de operación.

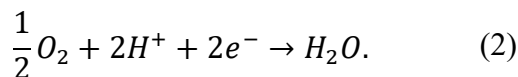
El objetivo de este trabajo es demostrar que la topología propuesta, operada en una región adecuada y bajo control en lazo cerrado, permite alcanzar una alta ganancia de voltaje con un rizo de corriente de entrada reducido en aplicaciones con celdas de combustible de hidrógeno, validando su desempeño mediante simulaciones.

MODELO MATEMÁTICO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible tipo son dispositivos electroquímicos capaces de convertir directamente la energía química del hidrógeno en energía eléctrica. Su operación se basa en reacciones electroquímicas que ocurren en dos electrodos separados por una membrana intercambiadora de protones, como se muestra en la **Figura 2**. En el ánodo, el hidrógeno se disocia en protones y electrones según



mientras que en el cátodo el oxígeno reacciona con los protones y electrones para formar agua, de acuerdo con



Como resultado, los electrones fluyen a través de un circuito externo generando corriente eléctrica. La reacción global del proceso puede expresarse como

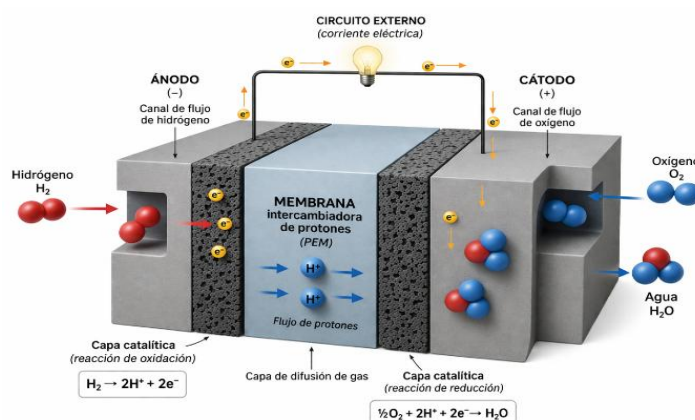
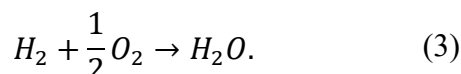


Figura 2 Esquema de una celda de combustible PEM

Desde el punto de vista eléctrico, el voltaje de salida de la celda de combustible está determinado por un valor ideal asociado a la energía libre de Gibbs, el cual puede calcularse mediante la ecuación de Nernst. Este voltaje ideal, denotado como E , depende de la temperatura de operación T y de las presiones parciales de los reactivos, y puede expresarse como:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (4)$$

donde E_0 es el potencial estándar de la celda, R es la constante universal de los gases, F es la constante de Faraday, y P_{H_2} , P_{O_2} y P_{H_2O} representan las presiones parciales del hidrógeno, oxígeno y agua, respectivamente. Sin embargo, en condiciones reales el voltaje de salida se reduce debido a diversos fenómenos irreversibles asociados a la cinética de reacción, las resistencias internas y las limitaciones en el transporte de masa.

En consecuencia, el voltaje real de la celda de combustible, denotado como V_{fc} , puede modelarse como la diferencia entre el voltaje ideal y las pérdidas internas:

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (5)$$

Las pérdidas por activación, asociadas a la energía requerida para iniciar las reacciones electroquímicas, pueden modelarse mediante una relación logarítmica en función de la corriente de la celda i_{fc} , dada por:

$$V_{act} = A \ln(i_{fc} + i_o) \quad (6)$$

donde A es una constante dependiente de la temperatura y del material del electrodo, e i_o es la corriente de intercambio. Por otro lado, las pérdidas óhmicas están relacionadas con la resistencia interna de la membrana y los contactos eléctricos, y pueden representarse como una caída de voltaje proporcional a la corriente:

$$V_{ohmic} = R_{int} i_{fc} \quad (7)$$

donde R_{int} es la resistencia interna equivalente de la celda. Finalmente, las pérdidas por concentración, debidas a limitaciones en el transporte de reactivos hacia las zonas activas, pueden modelarse como:

$$V_{conc} = B \ln\left(1 - \frac{i_{fc}}{i_{lim}}\right) \quad (8)$$

donde B es una constante empírica e i_{lim} representa el corriente límite de la celda.

ANÁLISIS DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA

Análisis en estado estable. El convertidor analizado en este trabajo corresponde a una topología elevadora de alta ganancia formada por una fuente de entrada V_{fc} , dos inductores L_1 y L_2 , dos interruptores activos S_1 y S_2 , dos diodos D_1 y D_2 , un capacitor de entrada C_1 , un capacitor de salida C_2 y una carga resistiva R_L . Esta estructura, reportada en [14], puede operar bajo dos estrategias de conmutación distintas: operación simultánea de los interruptores y operación complementaria. La **Figura 3** muestra la topología del convertidor considerada en este trabajo.

En una primera forma de operación, ambos interruptores conducen simultáneamente durante el intervalo de encendido. Bajo esta condición, el convertidor presenta un comportamiento equivalente al de un convertidor Boost en cascada.

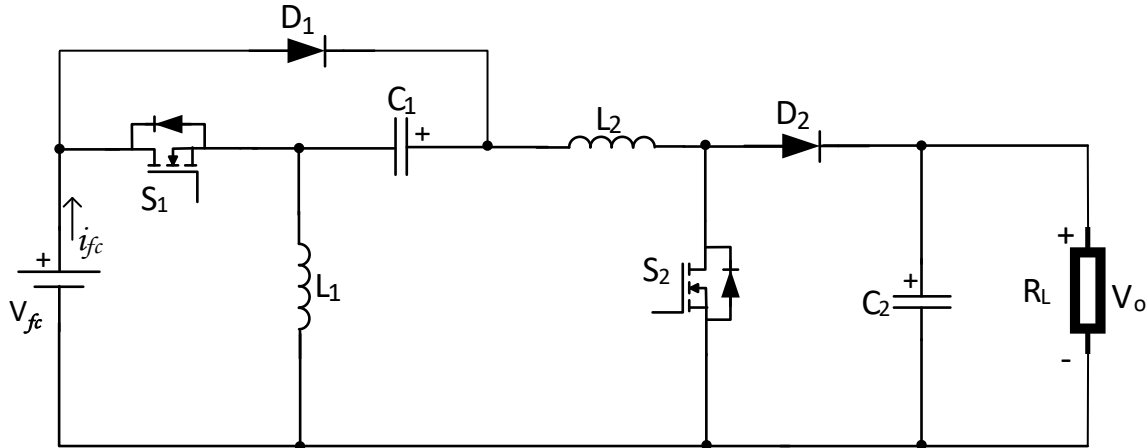


Figura 3 Topología del convertidor

Al aplicar el balance volt-segundo en los inductores, es decir, imponiendo que el valor promedio del voltaje en cada inductor durante un periodo de conmutación sea cero, se obtiene la ganancia estática

$$\frac{V_o}{V_{fc}} = \frac{1}{(1 - D)^2} \quad (9)$$

donde V_o es el voltaje de salida y V_{fc} es el voltaje de entrada. Esta expresión indica que la relación de conversión depende del cuadrado del término $(1 - D)$, por lo que el convertidor puede alcanzar elevados niveles de voltaje de salida usando valores moderados de ciclo de trabajo.

En la segunda forma de operación, los interruptores S_1 y S_2 conducen de manera complementaria, es decir, cuando uno está encendido el otro permanece apagado. En este caso, el intercambio de energía entre los elementos pasivos cambia y, al aplicar nuevamente balance volt-segundo, la ganancia en conducción continua resulta

$$\frac{V_o}{V_{fc}} = \frac{1}{D(1 - D)} \quad (10)$$

En esta ecuación, el término $D(1 - D)$ muestra que la ganancia depende de manera simétrica del ciclo de trabajo. De hecho, para $D = 0.5$ se obtiene la mínima ganancia, igual a 4, y para valores por encima o por debajo de ese punto la ganancia aumenta.

La corriente de entrada del convertidor, denotada como i_{fc} , está formada por la suma de las corrientes de los inductores i_{L1} e i_{L2} , es decir,

$$i_{fc} = i_{L1} + i_{L2} \quad (11)$$

donde i_{L1} es la corriente que circula por el inductor L_1 e i_{L2} es la corriente del inductor L_2 . Por tanto, el rizo de corriente de entrada depende directamente de la forma en que se superponen los rizados de ambas corrientes inductivas.

En operación complementaria, el rizo total de la corriente de entrada puede expresarse como

$$\Delta i_{fc} = -\frac{DV_{fc}}{2L_1}T_s + \frac{(1-D)V_{fc}}{2L_2}T_s \quad (12)$$

donde Δi_{fc} representa el rizo pico a pico de la corriente de entrada, L_1 y L_2 son los valores de los inductores y T_s es el periodo de conmutación. El primer término corresponde a la contribución del rizo del inductor L_1 , mientras que el segundo término representa la contribución del inductor L_2 . El signo negativo en el primer término y positivo en el segundo muestran que ambas contribuciones pueden oponerse entre sí.

Para imponer la condición de cancelación de rizo, se hace $\Delta i_{fc} = 0$, lo que conduce a la relación de diseño

$$L_2 = L_1 \frac{(1-D)}{D} \quad (13)$$

Esta ecuación establece que el valor de L_2 debe seleccionarse en función de L_1 y del ciclo de trabajo D para lograr que las pendientes de corriente de ambos inductores se compensen. En otras palabras, la cancelación del rizo de corriente de entrada no depende únicamente de la estrategia de control, sino también de la relación entre los elementos pasivos y del punto de operación seleccionado.

La importancia de esta condición radica en que permite definir una región de operación de muy bajo rizo, e incluso un punto específico de rizo nulo, lo cual es especialmente útil en aplicaciones con celdas de combustible de hidrógeno, ya que este tipo de fuente es sensible a las oscilaciones rápidas de corriente.

Modelo dinámico. Para obtener el modelo dinámico se considera la operación en modo de conducción continua (CCM), dispositivos ideales y capacitores con voltajes continuos dentro de un periodo de conmutación. Se define como variable de entrada el ciclo de trabajo u , con $0 < u < 1$, y como variable de salida el voltaje del capacitor de salida V_o . Los estados se eligen como: $x_1 = i_{L1}$, $x_2 = i_{L2}$, $x_3 = v_1$, $x_4 = v_o$, donde

v_1 es el voltaje del capacitor de entrada C_1 , y v_o es el voltaje del capacitor de salida C_2 . La fuente de entrada se denota como V_{fc} , ya que en este trabajo el convertidor es alimentado por la celda de combustible.

En la condición de operación complementaria, durante el intervalo en que S_1 conduce y S_2 permanece apagado, el convertidor queda descrito por:

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{di_{L1}}{dt} &= V_{fc} \\
 L_2 \frac{di_{L2}}{dt} &= -v_o + v_1 + V_{fc} \\
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= -i_{L2} \\
 C_2 \frac{dv_o}{dt} &= i_{L2} - \frac{v_o}{R_L}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Durante el intervalo complementario, cuando S_1 está apagado y S_2 conduce, las ecuaciones quedan:

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{di_{L1}}{dt} &= -v_1 + V_{fc} \\
 L_2 \frac{di_{L2}}{dt} &= V_{fc} \\
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= i_{L1} \\
 C_2 \frac{dv_o}{dt} &= -\frac{v_o}{R_L}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Estas ecuaciones muestran que la dinámica del convertidor depende del estado de conmutación y que el capacitor de entrada participa directamente en el intercambio de energía entre ambas etapas.

Definiendo u como la variable de control asociada al ciclo de trabajo, con $0 < u \ll 1$, y promediando sobre un periodo de conmutación, se obtiene el siguiente modelo no lineal:

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{di_{L1}}{dt} &= -(1-u)v_1 + V_{fc} \\
 L_2 \frac{di_{L2}}{dt} &= (v_1 - v_o)u + V_{fc} \\
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= (1-u)i_{L1} - i_{L2}u \\
 C_2 \frac{dv_o}{dt} &= i_{L2}u - \frac{v_o}{R_L}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Este modelo promedio es bilineal, ya que la variable de control u multiplica a variables de estado. La salida del sistema se define como $y = v_o$.

Para linealizar el sistema alrededor del punto de operación x_0 definido por $(I_{L1}, I_{L2}, V_1, V_2, D)$, se introducen pequeñas perturbaciones:

$$x = x_0 + \hat{x}, u = D + \hat{u}, V_{fc} = V_{fc0} + \hat{v}_{fc}$$

donde

$$\hat{x} = [\hat{i}_{L1} \quad \hat{i}_{L2} \quad \hat{v}_1 \quad \hat{v}_o]^T.$$

Despreciando términos de segundo orden, se obtiene el modelo linealizado:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B\hat{u} + E\hat{v}_{fc} \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (17)$$

con

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1-D}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & -\frac{D}{L_2} \\ \frac{1-D}{C_1} & -\frac{D}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R_L C_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} V_1/L_1 \\ (V_1 - V_o)/L_2 \\ -(I_{L1} + I_{L2})/C_1 \\ I_{L2}/C_2 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1/L_1 \\ 1/L_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

y

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Como la variable regulada es el voltaje de salida, la salida linealizada es simplemente:

$$\hat{y} = \hat{v}_o.$$

DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para obtener el punto de equilibrio, se impone la condición de estado estacionario:

$$\dot{\hat{i}}_{L1} = \dot{\hat{i}}_{L2} = \dot{\hat{v}}_1 = \dot{\hat{v}}_o = 0. \quad (18)$$

De (16) se pueden establecer los valores de las corrientes y voltajes requeridos para completar las matrices linealizadas del sistema en (17). Las corrientes de equilibrio quedan dadas por:

$$I_{L1} = \frac{V_o}{R_L(1-D)}, \quad (19)$$

$$I_{L2} = \frac{V_o}{R_LD}. \quad (20)$$

El voltaje del capacitor intermedio se puede calcular como:

$$V_1 = \frac{V_{fc}}{(1-D)}. \quad (21)$$

Con el fin de regular el voltaje de salida del convertidor, se emplea un controlador proporcional–integral (PI) diseñado a partir del modelo linealizado del sistema alrededor del punto de operación seleccionado. La variable controlada es el voltaje de salida v_o , mientras que la variable manipulada corresponde al ciclo de trabajo u . En este contexto, el diseño del controlador se basa en la función de transferencia control–salida del convertidor, definida como:

$$G_{vu}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{u}} = C(sI - A)^{-1}B. \quad (22)$$

donde $\hat{v}_o$ y $\hat{u}$ representan las perturbaciones del voltaje de salida y del ciclo de trabajo, respectivamente.

El controlador PI se define como

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (23)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y K_i es la ganancia integral.

El diseño se realiza en el dominio de la frecuencia mediante el análisis del diagrama de Bode, empleando un criterio de estabilidad relativa. Para ello, se considera la función de transferencia en lazo abierto del sistema compensado:

$$G_L(s) = G_c(s)G_{vu}(s). \quad (24)$$

A partir de la respuesta en frecuencia de la planta $G_{vu}(s)$, se selecciona una frecuencia de cruce ω_c adecuada, de modo que el sistema presente un compromiso entre rapidez de respuesta y robustez.

Posteriormente, el cero del controlador PI se ubica en una frecuencia inferior a ω_c , con el objetivo de mejorar el margen de fase del sistema. Finalmente, la ganancia del controlador se ajusta para que el módulo del lazo abierto cumpla la condición:

$$|G_L(j\omega_c)| = 1. \quad (25)$$

Antes del diseño del controlador, se establecen los valores nominales del convertidor, los cuales se resumen en la **Tabla 1**. La selección de estos parámetros se realiza considerando una aplicación con celda de combustible de hidrógeno, cuyo voltaje máximo de entrada es de 35 V, una potencia nominal de salida de 500 W y un voltaje de salida deseado de 150 V.

Tabla 1. Parámetros nominales del convertidor

Parámetro	Valor
Voltaje máximo V_{fc}	35 V
Voltaje de salida V_o	150 V
Potencia de salida	500 W
Capacitor C_1, C_2	47 μ F
Inductor L_1	500 μ H
Inductor L_2	295 μ H

Dado que el convertidor opera en el modo de cancelación de rizo, su ganancia estática viene dada por (10). Sustituyendo $V_o = 150$ V y $V_{fc} = 35$ V, se obtiene un ciclo de trabajo de $D \approx 0.63$.

Una vez determinado el ciclo de trabajo, el valor del inductor L_2 se calcula a partir de la condición de cancelación del rizo de corriente de entrada (13). Tomando $L_1 = 500$ μ H y $D=0.63$, resulta $L_2 = 295$ μ H. De esta manera, la relación entre inductores queda establecida de forma consistente con el punto de operación nominal seleccionado. Por otra parte, considerando una potencia nominal de 500W y un voltaje de salida de 150 V, la resistencia equivalente de carga es $R_L = 45$ Ω .

El comportamiento del sistema compensado se evalúa mediante el diagrama de Bode de la función de transferencia en lazo abierto $G_L(s)$, mostrado en la **Figura 4**, el cual permite determinar directamente los márgenes de estabilidad del sistema.

A partir de dicho diagrama, se verifican el margen de fase M_f y el margen de ganancia M_g , asegurando que el sistema cumpla con los criterios de estabilidad relativa establecidos. En particular, el margen de fase proporciona una medida del amortiguamiento del sistema, mientras que el margen de ganancia indica la robustez frente a variaciones en la ganancia del lazo.

Con base en el procedimiento descrito, los parámetros del controlador PI se determinan de manera que se satisfagan las especificaciones de frecuencia de cruce y margen de fase. En consecuencia, se obtienen:

$$K_p = 8.143e - 05$$

$$K_i = 0.3257$$

por lo que el controlador final queda definido como:

$$G_c(s) = \frac{8.143e - 05s + 0.3257}{s}$$

El controlador diseñado se implementa en una estructura de retroalimentación unitaria, donde el error de seguimiento está dado por:

$$e(t) = v_{ref} - v_o$$

Siendo v_{ref} la referencia de voltaje. La acción de control generada por el compensador PI ajusta el ciclo de trabajo del convertidor, permitiendo mantener el voltaje de salida regulado ante variaciones en la carga y en el voltaje de la celda de combustible.

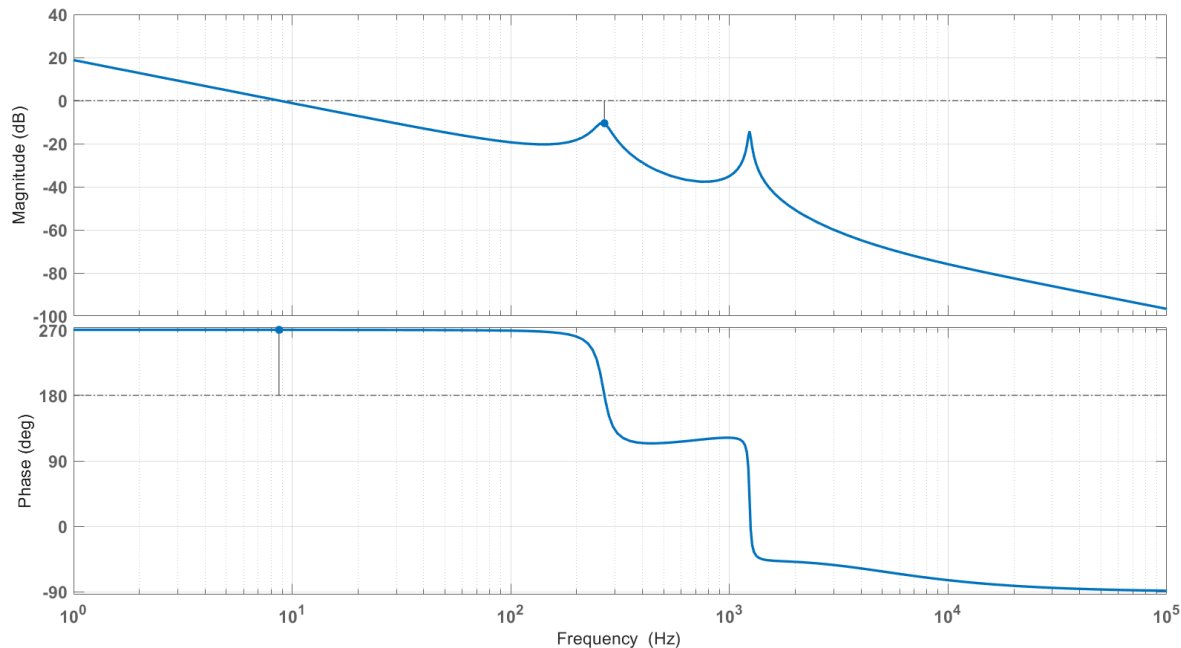


Figura 4. Diagrama de Bode del sistema en lazo abierto compensado

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el objetivo de validar el desempeño del convertidor propuesto y del esquema de control implementado, se realizaron diversas simulaciones en entorno MATLAB/Simulink considerando el modelo de la celda de combustible y los parámetros nominales previamente definidos.

Se presentan dos pruebas principales orientadas a evaluar, por un lado, el comportamiento del rizo de corriente de entrada en función del punto de operación y, por otro, la capacidad de regulación

del sistema en lazo cerrado ante variaciones de carga. Adicionalmente, se incluye la curva de polarización de la celda de combustible utilizada en la simulación.

En la primera prueba, se analizó el efecto del ciclo de trabajo sobre el rizo de corriente de entrada del convertidor. Para ello, se consideraron dos valores cercanos al punto de operación nominal, específicamente $D=0.63$ y $D=0.65$ a los 0.3 s, como se muestra en la **Figura 5**.

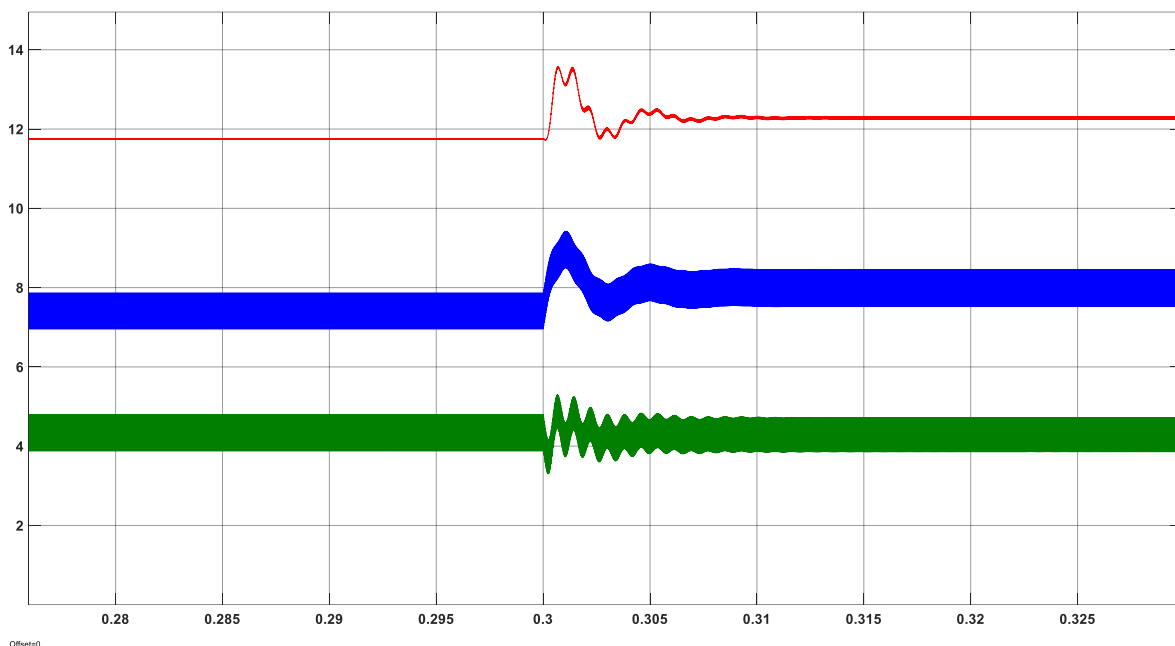


Figura 5. Corriente de entrada para diferentes ciclos de trabajo, línea roja corriente de entrada, línea azul corriente del inductor L_1 y línea verde corriente del inductor L_2 .

La figura correspondiente muestra la forma de onda de la corriente de entrada bajo ambas condiciones. Se observa que, para un valor específico del ciclo de trabajo, el rizo de corriente se reduce notablemente, evidenciando la existencia de un punto de operación donde ocurre la cancelación del rizo. Sin embargo, al alejarse de dicho punto, el rizo reaparece, lo cual confirma la dependencia directa de este fenómeno con el ciclo de trabajo y la relación entre los inductores.

Este comportamiento es consistente con el análisis teórico presentado, donde se establece que la anulación del rizo de corriente de entrada se logra únicamente bajo una condición específica de operación.

La **Tabla 2** presenta la comparación del rizo de corriente de entrada para tres ciclos de trabajo representativos. En todos los casos, el convertidor propuesto exhibe una reducción significativa del rizo respecto al convertidor Boost convencional, manteniendo la misma potencia de salida y utilizando el mismo valor de inductancia y capacitancia, L_1 y C_1 , respectivamente. Estos resultados confirman que la disminución del rizo es consecuencia de la estrategia de cancelación implementada y no de un aumento en la capacidad de almacenamiento de energía del inductor.

Tabla 2. Comparación del rizo de corriente de entrada para diferentes ciclos de trabajo

D	Boost convencional Δi_{fc} (A)	Convertidor del estudio Δi_{fc} (A)	Boost convencional V_o (V)	Convertidor del estudio V_o (V)	Potencia de salida (W)	Reducción (%)
0.60	1.733	0.259	147	246	300	85
0.63	1.836	0.023	160	254	300	98
0.66	1.944	0.217	174	263	300	88

En la segunda prueba, se evaluó el desempeño del sistema en lazo cerrado ante un cambio en la carga. En particular, se consideró una variación del 50% al 100% de la carga nominal, es decir, de $R_L = 90 \Omega$ a $R_L = 45 \Omega$, como se aprecia en la **Figura 6**.

La figura muestra la respuesta del voltaje de salida ante esta perturbación. Se puede observar que el sistema presenta una desviación transitoria seguida de una recuperación hacia el valor de referencia, evidenciando la capacidad del controlador para mantener la regulación del voltaje.

En general, el comportamiento observado indica que el sistema es capaz de adaptarse a cambios en la carga sin perder estabilidad, lo cual valida el diseño del controlador en lazo cerrado.

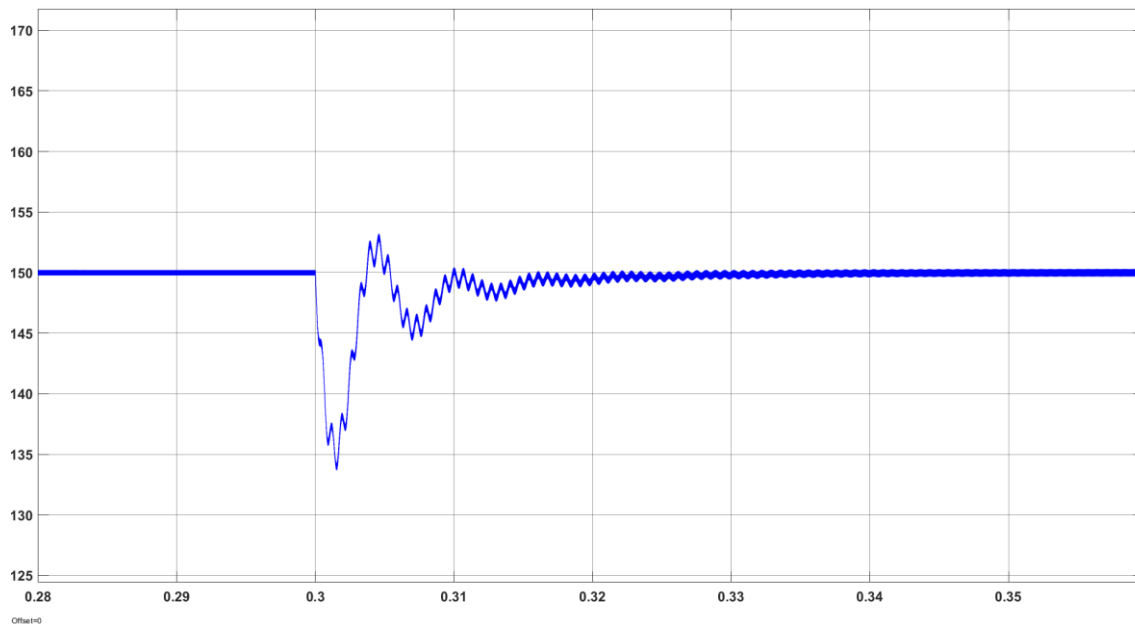


Figura 6 Respuesta del voltaje de salida ante cambio de carga

Finalmente, se incluye la curva de polarización (**Figura 7**) de la celda de combustible utilizada en la simulación, la cual describe la relación entre el voltaje y la corriente de la fuente.

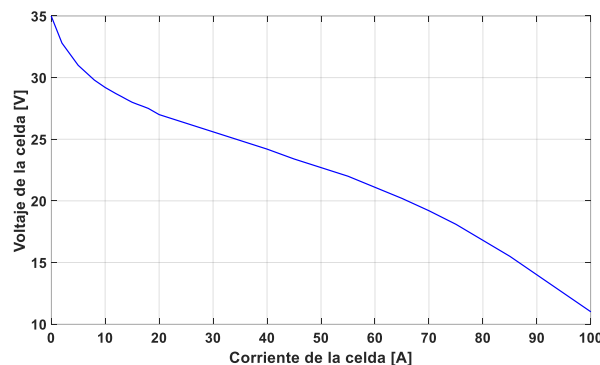


Figura 7 Curva de polarización de la celda de combustible

En esta curva se identifican las tres regiones características de operación: la región de activación, la región óhmica y la región de concentración. Esta representación permite modelar de manera adecuada el comportamiento no lineal de la celda de combustible dentro del sistema de simulación.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que el convertidor elevador en cascada propuesto es capaz de operar en una condición específica, donde el rizo de corriente de entrada se reduce significativamente e incluso puede anularse, lo cual concuerda con el análisis teórico planteado. Este comportamiento confirma que la cancelación del rizo depende directamente de la relación entre los inductores y del ciclo de trabajo.

En comparación con otros enfoques reportados en la literatura, donde la reducción del rizo se logra mediante técnicas como el entrelazado o el uso de inductores acoplados [9], [10], la propuesta presentada permite alcanzar resultados similares mediante una configuración más simple basada en la selección adecuada de parámetros. De igual forma, los resultados presentados son consistentes con trabajos recientes sobre convertidores de alta ganancia con bajo rizo de entrada [11], [12], destacando que en este caso se incorpora además el análisis en lazo cerrado.

Cabe destacar que el controlador PI diseñado mostró un desempeño adecuado, permitiendo regular el voltaje de salida ante variaciones en la carga sin comprometer la estabilidad del sistema.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó el análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada modificado aplicado a sistemas alimentados por celdas de combustible de hidrógeno. A partir del análisis en estado estable, se identificó una condición de operación en la cual es posible reducir

significativamente el rizo de corriente de entrada, e incluso anularlo, mediante una adecuada selección de los parámetros del convertidor, particularmente la relación entre los inductores.

Se desarrolló el modelo dinámico del convertidor considerando la interacción con la celda de combustible, representada mediante una curva de polarización, lo cual permitió capturar su comportamiento no lineal sin incrementar excesivamente la complejidad del modelo. A partir de este modelo, se diseñó un controlador PI en el dominio de la frecuencia utilizando criterios de estabilidad relativa, garantizando un compromiso adecuado entre robustez y desempeño dinámico.

Los resultados de simulación demostraron que el convertidor opera efectivamente en una región de bajo rizo de corriente de entrada y que el sistema en lazo cerrado es capaz de mantener la regulación del voltaje de salida ante variaciones en la carga. Estos resultados evidencian que la topología propuesta, en conjunto con el esquema de control implementado, presenta un desempeño favorable para aplicaciones con celdas de combustible, donde la calidad de la corriente de entrada constituye un aspecto de especial importancia.

Si bien los resultados obtenidos respaldan el desempeño del convertidor propuesto bajo las condiciones de simulación consideradas, la implementación de un prototipo experimental constituye una etapa futura de esta investigación. Dicha validación permitirá corroborar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación, así como evaluar el efecto de las pérdidas parásitas, las tolerancias de los componentes y otros fenómenos no considerados en el modelo de simulación.

En este sentido, el presente estudio establece una base para el análisis e implementación futura de convertidores elevadores con reducción del rizo de corriente de entrada en aplicaciones alimentadas por celdas de combustible PEM.

REFERENCIAS

- [1] Belhaj F. Z., et al. (2019). Cascade boost converter for fuel cell systems. Springer.
- [2] Dawidziuk J. (2011). Review of high efficiency boost converters. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 59(4), 499–506.
- [3] Eberle U., Müller B., von Helmolt R. (2012). Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure. Energy & Environmental Science, 5(10), 8780–8798.
- [4] Erickson R. W., Maksimovic D. (2001). Fundamentals of Power Electronics. Springer.
- [5] Garraín D., Lechón Y., de la Rúa C. (2011). Polymer electrolyte membrane fuel cells in automotive applications. Smart Grid and Renewable Energy, 2(2), 68–74.
- [6] Hidalgo H., et al. (2023). High-gain boost converter with zero-ripple input current. Energies, 16(13), 4860.

- [7] Hidalgo H., et al. (2023). Zero-ripple input current boost converter. *Technologies*, 11(1), 21.
- [8] Hidalgo H., Estrada L., Vázquez N., Mejía D., Huerta H. and González-Durán J. E. E. (2026). Voltage regulation of a DC–DC boost converter using a vertex-based convex PI controller. *Technologies*, 14(1), 30.
- [9] Jin G. G., Mengesha K. A. and Son Y. D. (2025). Integral sliding mode control of a DC–DC boost converter with uncertainties. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20.
- [10] Li W., He X. (2011). Review of non-isolated high step-up DC/DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1239–1250.
- [11] Lotfi Nejad M., et al. (2016). New cascade boost converter with reduced losses. *IET Power Electronics*.
- [12] A. Naderi and K. Abbaszadeh (2016). High step-up DC–DC converter with input current ripple cancellation. *IET Power Electronics*, 9(12), 2394–2403.
- [13] Niu R., Zhang H. and Song J. (2023). Model predictive control of DC–DC boost converter based on generalized proportional integral observer. *Energies*, 16(3), 1245.
- [14] Pirpoor S., et al. (2022). High-gain DC/DC converter with low input current ripple. *IEEE Access*.
- [15] Puranik S. V., Keyhani+ A., Khorrami F. (2010). State-space modeling of proton exchange membrane fuel cell. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 804–813.
- [16] Rosas-Caro J. C., et al. (2013). Interleaved converter with ripple cancellation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [17] Villarreal-Hernandez C. A., et al. (2020). Double dual boost converter with ripple cancellation for PEMFC. *Electronics*, 9(10), 1592.