

Switching Regulator Using a DC-DC Step-down Converter and an Electrolyzer to Generate Green Hydrogen

M. G. Ortiz-Lopez*, J. Leyva-Ramos**
 L. H. Diaz-Saldivar**

*Universidad Politécnica de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P., 78369

México (Tel: 444 870 2100; E-mail: guadalupe.ortiz@upsdp.edu.mx).

**Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, S.L.P., 78216,

Mexico (Tel: 444 834 2000, E-mail: jleyva@ipicyt.edu.mx, ldiaz@ipicyt.edu.mx)

Abstract: Among the main actions to inhibit greenhouse gases production is the replacement of fossil fuels by non-polluting alternatives, such as green hydrogen produced by an electrolyzer powered by a renewable energy source. This work develops a procedure to design and implement a switching regulator for the input current of a proton exchange membrane electrolyzer. The proposed scheme is based on a step-down converter. Starting from the linearized model of the combined converter-electrolyzer, a study of its dynamic behavior is carried out, establishing the controller scheme to be implemented as well as the most suitable feedback variables. The design procedure based on the parameters of the corresponding controller is described step by step. The improvements obtained in the dynamics of the input current of the electrolyzer by using the controller is shown by means of open and closed-loop simulation results.

Keywords: Modelling of power converters, renewable energy sources, electrolyzer, DC-DC converter, step-down converter

1. INTRODUCTION

En la actualidad, el hidrógeno es considerado como la principal alternativa para sustituir a los combustibles fósiles. La quema de estos combustibles ha generado grandes cantidades de gases de efecto invernadero que afectan de manera drástica a los sistemas climáticos y meteorológicos, International Energy Agency (2023).

Para evitar la contaminación al generar el hidrógeno, el método más adecuado es su obtención mediante la electrólisis del agua. Este proceso se lleva a cabo en un electrolizador que consiste de un ánodo y un cátodo separados por un electrolito. Existen cuatro tipos de tecnologías para su operación: agua alcalina (AWE), membrana de intercambio de protones (PEM), oxido sólido (SOE) y membrana de intercambio de aniones (AEM), Nasser, M., et al., (2022). La tecnología AWE ha sido utilizada para la obtención de hidrógeno desde inicio del siglo XX operándose en unidades de producción a gran escala en potencias entre 10 y 20 MW. En cuanto a la tecnología PEM, esta fue introducida de manera comercial por la compañía General Electric en 1960. Por esta razón, ambas tecnologías tienen gran madurez en el desarrollo de los procesos, mientras que la tecnología de SOE y la AEM están aún en etapas de investigación y desarrollo.

Un factor importante en la generación de hidrógeno, es el asegurar que el proceso de electrólisis utilizado produzca cero emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, su fuente de electricidad debe provenir de una fuente de energía renovable tal como el viento, el sol, el agua o la geotérmica. Para lograrlo, los diferentes tipos de fuentes renovables deben combinarse en una microrred para producir energía eléctrica sin intermitencias, y así evitar una de las características desfavorables de este tipo de tecnologías.

Analizando el tipo de electrolizador más conveniente para utilizarse con este tipo de fuentes, se encuentra que a pesar que los AWE tienen una expectativa de vida mas amplia y un costo de inversión bajo, presentan una reacción muy lenta ante fluctuaciones debido a que utilizan como catalizador un electrolito líquido basado en níquel con gran inercia, teniendo un arranque que tarda hasta 20 minutos. Por lo tanto, este tipo de electrolizador no es adecuado para su uso ante condiciones dinámicas cambiantes, en donde la energía generada por fuentes de energía renovable puede variar abruptamente ante cambios del clima, tales como variaciones por radiación solar o velocidad del viento, Mohammadi, A. and Mehrpooya, M., (2018).

En contraparte, el electrolizador tipo PEM, se utiliza para la producción de hidrógeno a pequeña escala, pudiendo conectarse en serie para formar un electrolizador de múltiples celdas para un sistema a gran escala. Tiene como ventaja el manejo de una alta densidad de corriente y una respuesta rápida ante cambios dinámicos por su delgada membrana polimérica, por lo que se considera la opción más adecuada.

Si bien el electrolizador tipo PEM tiene una buena respuesta dinámica ante variaciones, en la literatura técnica se ha documentado que los valores de la corriente que se alimenta al mismo, así como las intermitencias en la potencia que se le provee, impactan en su vida útil, Parache, F., et al., (2022), Weiβ, A., et al., (2019). Por lo tanto, es necesaria la implementación de una interfase que regule la corriente que se le suministra. Esta interfase estará basada en un convertidor de DC-DC con una relación de conversión mínima de 4:1 o 6:1 entre el voltaje de entrada proveniente de la fuente y el voltaje de salida que alimenta al electrolizador.

Existen dos esquemas de convertidores que se consideran adecuados para utilizarse con electrolizadores. En el primer esquema se encuentran los convertidores cuadráticos basados en estructuras en cascada. En Gorji, S. A. (2022), se utilizan convertidores cuadráticos reductores y semi-cuadráticos reductores-elevadores reconfigurables tolerantes a fallas, obteniéndose su modelo en espacio de estados, considerando al electrolizador como una carga puramente resistiva. Un convertidor cuadrático reductor con un interruptor activo puede ser utilizado el cual se incorpora como carga de salida un electrolizador tipo PEM representado por su modelo dinámico, el cual posteriormente es remplazado por una fuente de corriente controlada por modos deslizantes. Un segundo esquema, corresponde a convertidores reductores interconectados, tal como el propuesto por Estekim, M., et al., (2015), que incorpora en la entrada capacitores balanceados, el cual proporciona una corriente continua y un rizo bajo en el voltaje en la salida. En otro esquema propuesto, Guo, X., et al., (2022), se incorpora un control tolerante a fallas utilizando una rama auxiliar a las convencionalmente utilizadas. Igualmente, un convertidor interconectado con voltaje de entrada conectado mediante capacitores balanceados y controlado por modos deslizantes es presentado en Yodwong B., et al (2024).

El objetivo del presente trabajo es el diseño e implementación de un regulador CD-CD de la corriente de entrada para un electrolizador tipo PEM, basado en un convertidor cuadrático reductor con un interruptor activo, que garantice tanto la generación de un flujo constante de hidrógeno, como mantenga las expectativas de vida útil del mismo ante cambios en el voltaje de entrada. Los parámetros de diseño más adecuados para su funcionamiento y que provean robustez al controlador se seleccionarán a partir del modelo dinámico integrado convertidor-electrolizador dado en Ortiz et al., (2024).

2. ANALISIS DE LA DINAMICA DE LA COMBINACION CONVERTIDOR CUADRÁTICO REDUCTOR-PEMEL

En un electrolizador tipo PEM, cuya imagen se muestra en la Fig.1, el agua reacciona en el ánodo formando oxígeno y iones de hidrógeno positivamente cargados (protones), según indica el esquemático de la Fig. 2. Los electrones fluyen a través de un circuito externo y los iones de hidrógeno se mueven a través de la membrana polimérica hacia el cátodo. Al llegar a este, el hidrógeno se combina con electrones del circuito externo y forma hidrógeno en forma de gas.

Para representar eléctricamente el funcionamiento de un electrolizador tipo PEM, se ha propuesto tanto un modelo estático, que representa al electrolizador solo como una carga resistiva, como un modelo que considera su dinámica en caso de cambios en las condiciones de operación, Yodwong, B. et al. (2020). En la Fig. 3 se muestra el

modelo eléctrico integrado convertidor cuadrático reductor-PEMEL propuesto. En este diagrama E representa a la fuente de voltaje de CD, D_1 a D_3 a los diodos utilizados, L_1 , L_2 y C_1 , C_2 a los inductores y capacitores del convertidor cuadrático reductor. Sw representa al interruptor activo, D al ciclo de trabajo nominal del convertidor, R_{int} modela la resistencia de membrana polimérica, v_{act} al sobrevoltaje de activación del ánodo, V_{int} al voltaje de activación de cátodo y $R_a C_a$ a la rama en paralelo que emula las pérdidas en el ánodo y su dinámica. Esta última tiene un comportamiento muy cercano al de un sistema de primer orden, y muy similar al que presentan las celdas de combustible.

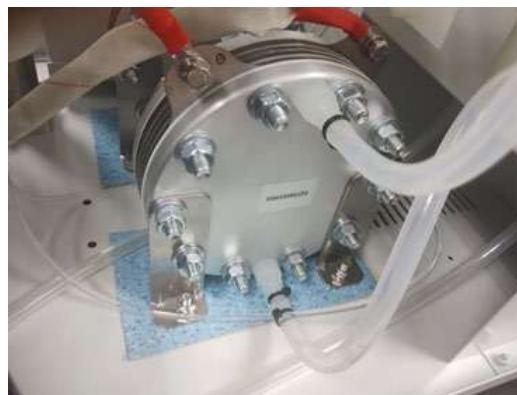


Figura 1. Electrolizador tipo PEM, Laboratorio de Procesamiento Eficiente de la Energía, IPICYT.

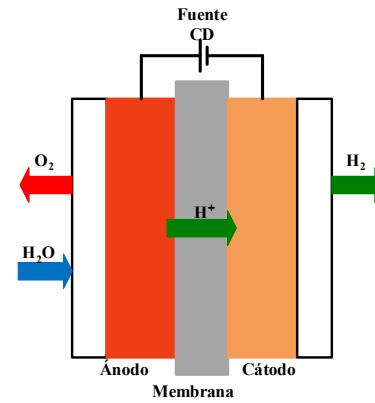


Figura 2. Esquema del funcionamiento de un electrolizador tipo PEM.

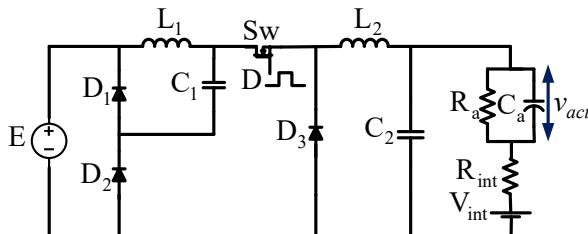


Figura 3. Diagrama eléctrico del modelo combinado convertidor cuadrático reductor-electrolizador tipo PEM.

A partir del modelo en espacio de estados conmutado presentado en Ortiz et al. (2024), es posible derivar el modelo en espacio de estados promedio linealizado. La linealización se realiza alrededor del punto de operación correspondientes a los valores de estado estables dados por:

$$I_{L_1} = DI_{L_2} \quad (1)$$

$$I_{L_2} = \frac{D^2 E}{R_a + R_{in}} - \frac{R_a V_{int}}{R_{int}(R_a + R_{in})} \quad (2)$$

$$V_{C_1} = DE \quad (3)$$

$$V_{C_2} = D^2 E = V_{el} \quad (4)$$

$$V_{ACT} = \frac{(D^2 E) R_a}{R_a + R_{in}} - \frac{R_{int} V_{int}}{(R_a + R_{in})} \quad (5)$$

En dicho modelo, los estados a considerar serán las corrientes de los inductores i_{L_1} e i_{L_2} , los voltajes de los capacitores v_{C_1} y $v_{C_2} = v_{el}$ y el sobrevoltaje de activación del ánodo v_{act} . Para obtener el modelo, la señal de control y los cinco estados se descomponen en dos partes: los valores promedio nominales que se representan mediante letras mayúsculas, y sus correspondientes variaciones, las cuales se representan por letras minúsculas con el símbolo “~”. El modelo resultante queda dado como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_{L_1} \\ \dot{\tilde{i}}_{L_2} \\ \dot{\tilde{v}}_{C_1} \\ \dot{\tilde{v}}_{C_2} \\ \dot{\tilde{v}}_{ACT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 \\ \frac{1}{C_1} & -\frac{D}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{R_{int}C_2} & \frac{1}{R_{int}C_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{int}C_a} & -\frac{k}{R_{int}C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{L_1} \\ \tilde{i}_{L_2} \\ \tilde{v}_{C_1} \\ \tilde{v}_{C_2} \\ \tilde{v}_{ACT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L_1} & \frac{D}{L_1} \\ V_{C_1} \\ \frac{I_{L_2}}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{d} \\ \tilde{e} \end{bmatrix} \quad \text{donde } k = \frac{(R_a + R_{int})}{R_a} \quad (6)$$

A partir de esta representación en espacio de estados es posible definir la variable de la corriente del electrolizador la cual queda dada por:

$$i_{el} = i_{L_2} - C_2 \frac{dv_{C_2}}{dt} \quad (7)$$

donde $v_{C_2} = v_{el}$. Basándose en el modelo lineal resultante del conjunto convertidor cuadrático reductor-electrolizador tipo PEM es posible aplicar las Transformadas de Laplace para analizar su comportamiento dinámico. Inicialmente se obtuvieron las funciones de transferencia que permiten obtener la relación de la corriente del electrolizador mediante la relación con el ciclo de trabajo, las cuales quedan dadas por:

$$\frac{\tilde{v}_{el}}{\tilde{d}} = \frac{-b_3 s^3 + -b_2 s^2 - b_1 s + b_0}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (8)$$

$$\frac{\tilde{i}_{L_2}}{\tilde{d}} = \frac{c_4 s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (9)$$

$$\frac{\tilde{i}_{el}}{\tilde{d}} = \frac{\tilde{i}_{L_2}}{\tilde{d}} - C_2 s \frac{v_{el}}{\tilde{d}} \quad (10)$$

en donde los coeficientes del polinomio del denominador y del numerador están representados por a_i , b_i y c con $i = 0, \dots, 5$ respectivamente. Debido a que cada una de las expresiones de los coeficientes constan de varios términos, se omiten aquí por cuestiones de espacio; sin embargo, se muestran en la sección de resultados de simulación. A partir de estas relaciones se encuentra que las tres funciones son estables, y que tanto la función de transferencia \tilde{v}_{el}/\tilde{d} como \tilde{i}_{el}/\tilde{d} son de fase no mínima. Considerando que para propósitos de control cuando se retroalimenta una función de fase no mínima pueden presentarse inestabilidades. Adicionalmente, se obtiene la función de transferencia $\tilde{i}_{L_1}/\tilde{d}$ que esta dada por:

$$\frac{\tilde{i}_{L_1}}{\tilde{d}} = \frac{d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (11)$$

Esta función de transferencia es estable al igual que las anteriores, y de fase mínima.

3. DISEÑO DEL CONTROLADOR

El modelo combinado convertidor cuadrático elevador-electrolizador tiene un comportamiento no lineal, sin embargo, en este trabajo se utilizará el modelo linealizado, debido a que un controlador no-lineal es complejo en su diseño, tiene un mayor costo de implementación y si no es correctamente diseñado se corre el riesgo de dañar al electrolizador. Los resultados obtenidos, servirán como referencia futura para medir las mejoras logradas con esquemas de control de tipo no lineal aplicados en la regulación de la corriente del electrolizador tipo PEM.

Una primera opción para el control de la corriente de entrada al electrolizador, pudiera ser la retroalimentación directa de dicha corriente utilizando un controlador; sin embargo, debido a que como ya se estableció, su función de transferencia respecto al ciclo de trabajo tiene un comportamiento de fase no mínima; y por lo tanto, no es la opción más adecuada. En este caso se propone un

controlador de dos lazos, similar al de un esquema en modo-corriente, según se muestra en la Fig. 4, en el cual el lazo interno proporciona una rápida respuesta transitoria, mientras que el lazo externo se implementa para regular la corriente de entrada al electrolizador. Como segunda variable a retroalimentar, se utilizará la corriente del primer inductor, ya que como se indicó es de fase mínima y además garantiza la protección del circuito ante sobre corriente en la entrada. Para el diseño del controlador se utilizará la técnica de moldeo de la ganancia de lazo. Adicionalmente, y con el objetivo de lograr estabilidad robusta, se tienen como requerimientos a cumplir: a) para estabilidad relativa, la pendiente en o cerca de la frecuencia de cruce por 0 dB no debe ser mayor que -20 dB/dec, b) para mejorar la exactitud de la respuesta en estado estable, la ganancia a baja frecuencia debe ser alta, y c) para estabilidad robusta se debe tener un margen apropiado de ganancia y fase, los cuales se establecen de 2 a 10 dB mínimo y 30 a 60 grados respectivamente.

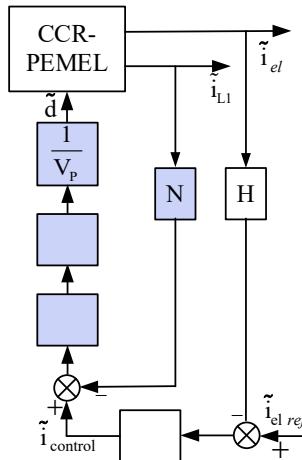


Figura 4. Diagrama de bloques del control propuesto.

En este diagrama V_p es el valor máximo de una señal tipo rampa la cual se compara con la señal de control. La función de transferencia $F(s)$ es un filtro pasa-baja con un polo a alta frecuencia, $G(s)$ es un compensador de alta ganancia que se añade al lazo interno de corriente, $i_{el\ ref}$ es el valor deseado de la corriente de entrada al electrolizador, N y H son las ganancias de los sensores de corriente del inductor de entrada y de entrada al electrolizador y $PI(s)$ es el controlador de la corriente de entrada al electrolizador.

El procedimiento para diseñar cada lazo y seleccionar apropiadamente los valores de los componentes eléctricos que permiten en una primera fase su implementación analógica se presenta a continuación.

3.1 Lazo interno.

Los polos y ceros del controlador quedan determinados principalmente por la frecuencia de operación del convertidor. Las funciones de transferencia del compensador de alta ganancia y el filtro pasa-bajadas son:

$$G(s) = \frac{G_P(s + \omega_z)}{s} \quad F(s) = \frac{1}{s/\omega_P + 1} \quad (12)$$

donde G_P es la ganancia del compensador, ω_z indica la localización del cero en el plano complejo, el cual debe colocarse al menos una década de la mitad de la frecuencia de conmutación y ω_P la localización del polo del filtro pasabajos, el cual se colocará al menos a una frecuencia de la mitad o mayor que esta con respecto a la frecuencia de conmutación.

La ley de control queda dada por:

$$\tilde{d} = \frac{1}{V_p} \left(\frac{1}{s/\omega_p + 1} \right) \left(\frac{G_p(s + \omega_z)}{s} \right) \left(\tilde{i}_{ref} - N \tilde{i}_{L_1} \right) \quad (13)$$

Los componentes eléctricos que la forman se determinan por la relación $\omega_z = 1/R_F C_{FZ}$. La ganancia G_P del compensador está determinada por la relación $G_P = R_F / R_I$, y debe satisfacer la siguiente desigualdad:

$$G_P < (5R_{\text{int}}V_P)/(3D^2V_{in}N)$$

(14)

Para proveer una reducción del efecto al ruido producido por la corriente del inductor, el polo de alta frecuencia de $F(s)$ se debe colocar a una frecuencia igual o mayor a la mitad de la frecuencia de commutación. La relación de los componentes eléctricos está dada por

$$\omega_p = (C_{FZ} + C_{Fp}) / R_F C_{FZ} C_{Fp}.$$

3.2. Lazo externo

Una vez que se sintonizó el lazo interno, se diseña el segundo lazo, el cual está formado por un sensor de corriente y un controlador PI cuya función de transferencia está dada por $PI(s) = K_C(1 + (1/T_i s))$, donde T_i y K_i son el tiempo de integración en segundos y la ganancia proporcional respectivamente. El propósito del controlador es proveer una alta ganancia a baja frecuencia, por lo que su frecuencia se selecciona de manera tal que $1/T_i$ este al menos una década debajo de la mitad de la frecuencia del convertidor. Los elementos eléctricos que las forman quedan determinados por la relación en segundos dada por $T_i = R_{FC}C_{FC}$ y la ganancia proporcional dada por $K_C = R_{FC}/R_{IC}$, respectivamente, la cual se ajusta el controlador por medio de la relación de estos valores y se selecciona de acuerdo a la siguiente desigualdad:

$$K_C < \frac{2ND}{HR_{\text{int}}(1-D)} \quad (15)$$

La ley de control de este lazo queda dada por:

$$\tilde{i}_{control} = K_C \left(1 + \frac{1}{T_S} \right) \left(\tilde{i}_{elref} - H \tilde{i}_{el} \right) \quad (16)$$

4. REGULADOR PROPUESTO Y RESULTADOS DE SIMULACION

Para la propuesta del regulador a implementar, a partir de las condiciones de operación y valores de los componentes del electrolizador dadas en la Tabla 1 basadas en Yodwong, B. et al, (2020), se calcularon los valores de los elementos eléctricos del convertidor cuadrático reductor con un solo interruptor activo de la Tabla 2. En base a estos valores, mediante el software Matlab, se calcularon numéricamente las funciones de transferencia dadas de (8) a (11), encontrando que los polos de las cuatro funciones están localizados en $\{-286860, -3750 \pm j33310, -1920 \pm j14310\}$ por lo que estas funciones son estables. En el caso de la localización de los ceros estos se muestran en la Tabla 3. Estos valores confirman la característica de fase no mínima de la función de transferencia tanto del voltaje de entrada al electrolizador como de su corriente con respecto al ciclo de trabajo.

Tabla 1. Parámetros del convertidor-electrolizador.

Parámetro	Valor
E	48 V
V_{el}	8 V
V_{int}	1.233 V
R_{int}	1.7 Ω
R_a	0.1 Ω
C_a	37 F
D	0.3535
f_S	100 kHz.
Rizo L_i	25%
Rizo C_i	1%

Tabla 2. Valores de los elementos eléctricos del convertidor.

Elemento	Valor
Inductor L_1	167.4 μ H
Inductor L_2	24.2 μ H
Capacitor C_1	21.5 μ F
Capacitor C_2	48.9 μ F

Posteriormente en base al procedimiento descrito en la sección 3, se diseñó el regulador conmutado mostrado en la Figura 5, utilizando como variables de retroalimentación la corriente del primer inductor y la corriente de entrada al electrolizador. En la Tabla 4 se muestran los valores de diseño de los elementos del regulador.

Para observar el efecto del controlador sobre la función de transferencia $\tilde{i}_{el} / \tilde{d}$ se obtuvo su diagrama de Bode en lazo abierto, el cual se muestra en la Fig. 6. Finalmente, se implementó el esquema en lazo cerrado propuesto,

obteniéndose la característica mostrada en el diagrama de Bode de la Fig. 7. Al implementar el controlador se obtiene un margen de ganancia del pico más alto de la ganancia de lazo al eje 0dB de -16.3 dB y un margen de fase de 89°, por lo cual se obtiene robustez ante cambios en el voltaje de entrada. Un margen adecuado proporciona permitirá la regulación ante variaciones en la potencia de entrada de entre un 10%-20% con respecto a su valor nominal.

Tabla 3. Localización de ceros e funciones de transferencia.

Función	Localización ceros
$\tilde{i}_{L_1} / \tilde{d}$	$\{-4355 \pm j36022, -6425, -0.275\}$
$\tilde{i}_{L_2} / \tilde{d}$	$\{1550.8 \pm j23500, -0.2703\}$
$\tilde{v}_{el} / \tilde{d}$	$\{1551 \pm j23525, -0.2861\}$
$\tilde{i}_{el} / \tilde{d}$	$\{1332.7 \pm j23500, -0.2703\}$

Tabla 4. Valores de los parámetros del controlador.

Componente	Valor	Parámetro	Valor
R_{FZ}	10 k Ω	ω_Z	1.5 kHz
R_1	15 k Ω	G_P	0.66
C_{FP}	150 pF	ω_P	50 kHz
C_{FZ}	10 η F	N	0.5
C_{FC}	33 nF	K_C	0.22
R_{FC}	2.2 k Ω	ω_C	2.1 kH
R_{1C}	10 k Ω	H	0.08

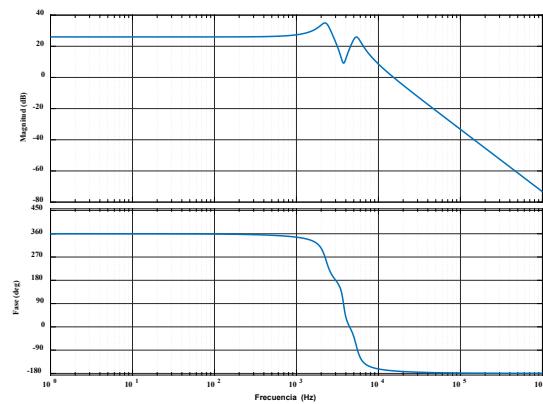


Figura 6. Respuesta en frecuencia de $\tilde{i}_{el} / \tilde{d}$ en lazo abierto.

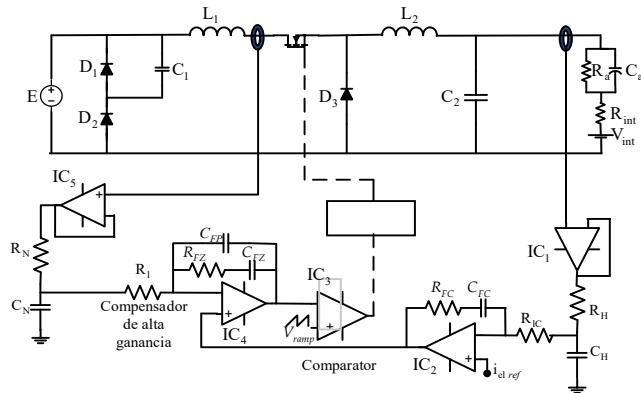


Figura 5. Regulador conmutado para un electrolizador tipo PEMEL

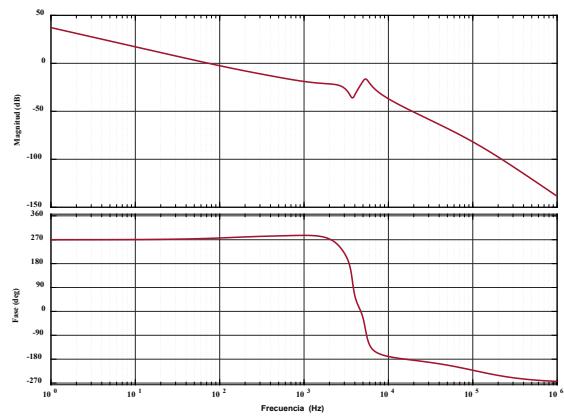


Figura 7. Respuesta en frecuencia de $\tilde{i}_{el} / \tilde{d}$ al cerrar el lazo de control.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se discute el procedimiento para el diseño de un controlador para un convertidor cuadrático reductor. Este puede ser utilizado como interfase entre una fuente de energía renovable y un electrolizador tipo PEM. El prototipo obtenido presenta buena respuesta en el dominio de la frecuencia, por lo que el esquema de dos lazos de retroalimentación basado en el modelo lineal del conjunto convertidor cuadrático reductor-electrolizador es un buen candidato. El diseño propone la construcción de un regulador implementado con elementos analógicos, pero puede llevarse a cabo de manera digital por medio de un microprocesador.

REFERENCIAS

Esteki, M., Poorali, B., Adib E., and Farzanehfard H., (2015). Interleaved Buck Converter with Continuous Input Current, Extremely Low Output Current Ripple, Low Switching Losses, and Improved Step-Down Conversion Ratio. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 4769-4776.

Guo, X., et al. (2022). A new multi-mode fault-tolerant operation control strategy of multiphase stacked interleaved Buck converter for green hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 71, pp. 30359-30370.

Gorji, S. A. (2022). Reconfigurable Quadratic Converters for Electrolyzers Utilized in DC Microgrids. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 109677-109687.

International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2023, In support of the G8 Plan of Action, France Head of Communication and Information Office, 2023.

Mohammadi, A. and Mehrpooya, M., (2018) A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources. *Energy*, vol. 158, pp. 632-655.

Ortiz-Lopez M.G., Leyva-Ramos J., Diaz-Saldivar L. H., (2024), Dynamical Analysis of a DC-DC Step-down Converter used as an interface with a Electrolyzer for Generation of Green Hydrogen, Memorias Congreso AMCA 2024, CD MX, México.

Nasser, M., et al., (2022), "A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 86994-87018.

Parache, F., et al., (2022), Impact of power converter current ripple on the degradation of PEM electrolyzer performances Membranes, vol. 12, no. 2.

Weiβ, A., et al., (2019), "Impact of intermittent operation on lifetime and performance of a PEM water electrolyzer," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 166, no. 8, pp. F487-F497.

Yodwong, B., et al., (2020), Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power electronics Control: A Short Review, C 6, vol. 29, no. 2.

Yodwong, B., et al., (2024) High Voltage Ratio DC-DC for Electrolyzers Supplied by Renewable Energy, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 8, pp. 8831-8839.