

Finite State Machine based-control for a two-quadrant converter in current mode.

Luis Antonio Flores-Luna^A, Allan A. Flores-Fuentes^B, Erick Rojas-Ramírez^C, Everardo Efrén Granda-Gutiérrez^D, Juan F. García-Mejía^E, y Rosendo Peña-Eguiluz^F

^A Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Atlacomulco, Km 60 Carretera Toluca-Atlacomulco, C.P. 50450, lfloresl015@alumno.uaemex.mx Atlacomulco, Estado de México, México.

^B Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Atlacomulco, Km 60 Carretera Toluca-Atlacomulco, C.P. 50450, aafloresf@uaemex.mx, Atlacomulco, Estado de México, México.

^C Universidad Tecnológica del Valle de Toluca, Carretera del Departamento del D.F. km 7.5, Santa María Atarasquillo, Lerma C. P. 52044. erick.rojas@utvtol.edu.mx, Estado de México, México.

^D Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Atlacomulco, Km 60 Carretera Toluca-Atlacomulco, C.P. 50450, eegrandag@uaemex.mx, Atlacomulco, Estado de México, México.

^E Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Atlacomulco, Km 60 Carretera Toluca-Atlacomulco, C.P. 50450, fgarciam@uaemex.mx, Atlacomulco, Estado de México, México.

^F Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Laboratorio de Física de Plasmas, C.P. 52750, rosendo.eguizul@inin.gob.mx, Ocoyoacac, Estado de México, México.

Resumen

La gestión del consumo de energía, en sistemas basados en semiconductores como los convertidores estáticos de potencia (CEP), es un aspecto clave de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en México y a nivel mundial. Este trabajo presenta la simulación de un convertidor de dos cuadrantes controlado por una máquina de estados finitos (MEF). Se analizó el convertidor chopper para comprender su funcionamiento como fuente de corriente. A continuación, se realizó una simulación en MATLAB Simulink, que permitió observar el comportamiento de la tensión, la corriente y la frecuencia en lazo abierto. Se utilizó la herramienta *Stateflow* para desarrollar una máquina de estados finitos (FSM) diseñada para controlar la corriente de salida del convertidor con un error estimado del 1% respecto al punto de funcionamiento, para una potencia de salida de 300 W. Los resultados mostraron que la FSM, con un número finito de estados, mantiene la estabilidad de la corriente de salida del convertidor al tiempo que consigue una eficiencia eléctrica en lazo cerrado de aproximadamente el 90%.

Palabras clave— Convertidor Estático de Potencia, Eficiencia Eléctrica, Máquina de Estados Finitos, Objetivos de Desarrollo Sostenible, Simulink/MATLAB®.

Abstract

Energy consumption management, in semiconductor-based systems such as static power converters (SPCs), is a key aspect of the Sustainable Development Goals (SDGs) in Mexico and worldwide. This paper presents the simulation of a two-quadrant converter controlled by a finite state machine (FSM). The chopper converter was analyzed to understand its operation as a current source. A simulation was then performed in MATLAB Simulink, enabling the observation of open-loop voltage, current, and frequency behavior. The

Stateflow tool was used to develop a finite state machine (FSM) designed to control the converter's output current with an estimated error of 1% relative to the operating point, for an output power of 300 W. The results show that the FSM, with a finite number of states, maintains the stability of the converter's output current while achieving a closed-loop electrical efficiency of approximately 90%.

Keywords— Sustainable Development Goals, Static Power Converters, Finite State Machine, Simulink/MATLAB®, Electrical Efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia las energías renovables, clave para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, implica nuevos desafíos en la conversión de energía mediante convertidores estáticos de potencia (CEP) [1]. Estos son altamente demandados para gestionar energía mediante sistemas conmutados [2], algunas de las aplicaciones de los CEP incluyen sistemas industriales y domésticos, desde inversores de mediana y alta potencia para el manejo de motores trifásicos hasta baja potencia para refrigeradores [3].

Actualmente, la tendencia de las aplicaciones de los CEP se centra en la gestión de la potencia en fuentes de energía limpia y renovable, como la solar, eólica, hidroeléctrica, entre otros [4]. Este tipo de convertidores considera la mejora de la eficiencia de los sistemas de conversión de energía de, CA-CD, CD-CD y CD-CA. Los troceadores o *chopper* (por su nombre en inglés), también nombrados convertidores clase D, son convertidores de CD-CD que operan típicamente en dos cuadrantes dentro del plano de voltaje vs corriente (I, IV) funcionando con voltaje bipolar y corriente unipolar (de aquí su nombre como fuente de corriente) [4]. Su estructura está conformada por dos semiconductores que trabajan como interruptores, los cuales pueden estar conformados por BJT (Bipolar Junction Transistor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) o MOSFET (Metal-oxide-semiconductor Field Effect Transistor por sus siglas en inglés), y dos diodos semiconductores auxiliares [5]. Algunas de las aplicaciones de los *chopper* son en conversión de energía solar [6], sistemas de propulsión para vehículos de tránsito rápido [7], sistemas de calentamiento por inducción [8], y otras más específicas como etapa intermedia para suministrar corriente a otras etapas o fuentes de energía [9].

Los convertidores *chopper* son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se requiere un valor de corriente constante en sistemas con carga eléctrica dinámica y variante con el tiempo. En la literatura, es común encontrar convertidores que utilizan algunos sistemas de control clásico como los PID (Proporcional, integral y Derivativo), para mantener los parámetros de operación en estado estable, mediante el análisis del sistema [10] [11]. La óptima sintonización de estas ganancias permite un control preciso en la modulación por ancho de pulso (PWM) para cada interruptor [5] [12]. Otros trabajos implementan métodos heurísticos para sintonizar los parámetros de controladores PID, aplicando

algoritmos evolutivos, y lógica difusa para evaluar la optimización de los parámetros del controlador [13]. La principal ventaja de estos métodos es que no requieren un modelo del sistema, a diferencia de los enfoques típicos como los de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon [11] [12]. Basta con adquirir y analizar mediciones consistentes de voltaje, corriente y frecuencia para determinar los puntos de operación [14], [15]. Otra propuesta son sistemas más complejos como el Control Predictivo [16], y las máquinas de estados finitos (MEF) [17]. Estas últimas con un enfoque funcional, ya que ejecutan instrucciones específicas en paralelo, eliminando valores redundantes. No obstante, no se ha encontrado en la literatura aplicaciones de MEF para convertidores chopper de dos cuadrantes en modo corriente.

La implementación de los controladores es otra tarea requerida para integrar los sistemas de gestión de potencia eléctrica, algunas de las técnicas mencionadas anteriormente son programadas en sistemas electrónicos tales como, microcontroladores, sistemas en un chip (SoC) [18], arreglos de matrices de compuertas programables (FPGA) [19] o computadoras de placa reducida como Raspberry-Pi [20]. Cada uno de estos sistemas electrónicos poseen características diferentes que asocian, integración, velocidad de procesamiento, costo, recursos computacionales, eficiencia, rendimiento, entre otros [21], [22], [23].

En el presente trabajo se propone el diseño y simulación de un control automático, basado en una máquina de estados finitos utilizando *Stateflow* de MATLAB, aplicado a un convertidor *chopper* de dos cuadrantes en modo corriente. Las pruebas se llevan a cabo en lazo abierto y, posteriormente, en lazo cerrado. Finalmente, se presentan los resultados de eficiencia del convertidor.

2. METODOLOGÍA

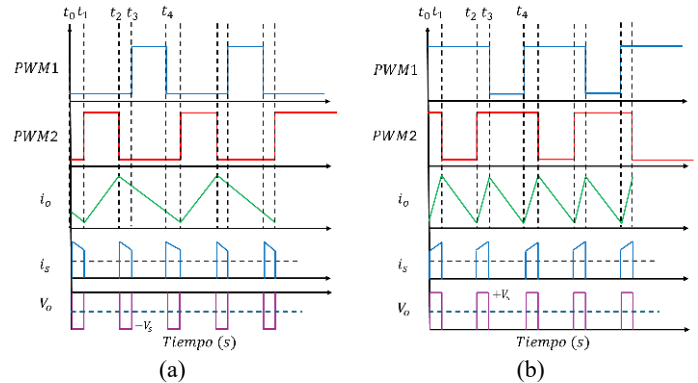
En esta sección se describe el procedimiento para el diseño e implementación del convertidor que consiste en el desarrollo de: a) Simulación del convertidor en Simulink/MATLAB para ajustar los parámetros y dimensionar componentes, b) Simulación del sistema a lazo abierto para fijar el punto de del controlador mediante la máxima eficiencia del convertidor, c) Diseño de la máquina de estados, e) Pruebas de simulación del del convertidor en lazo cerrado.

2.1 Modos de operación del chopper.

El *chopper* es un convertidor de energía que, bajo criterios específicos, cambia una tensión de entrada fija a una tensión de salida ajustable sin almacenamiento intermedio de energía mediante inductor o capacitor [5]. Su nombre se debe a la forma de la tensión de salida similar a un tren de pulsos cuasi rectangulares (troceados). Existen diferentes configuraciones de la carga, tales como, Resistencia-Capacitor (R-C), Inductor-Capacitor (L-C) o Resistencia-Inductor (R-L) siendo esta última configuración la implementada en este trabajo [5]. Este convertidor de corriente continua unidireccional de dos cuadrantes (I y IV) que se representa en la Fig. 2.1 funciona a partir de la secuencia de las señales PWM aplicadas que se

ilustran en la Fig. 2.2. El convertidor incorpora dos dispositivos semiconductores M1 y M2, comandados por las señales de conmutación PWM1 y PWM2 desfasadas 180° una con respecto a la otra respectivamente, además de dos diodos D1 y D2.

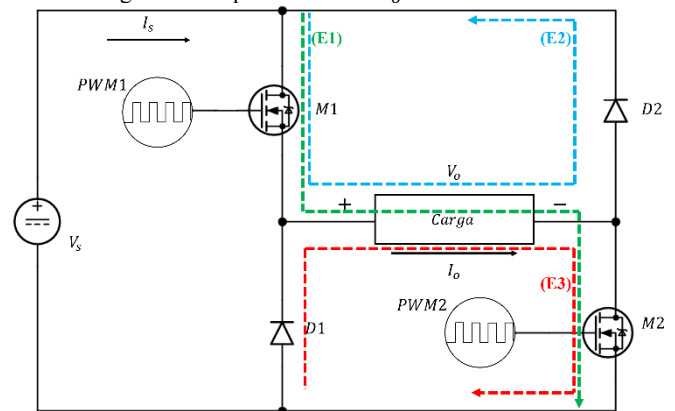
Fig. 2.1. (a) Cuadrante de operación IV, (b) cuadrante de operación I.



Fuente: elaboración propia a partir de [5].

Las variables asociadas al convertidor son; voltaje de entrada V_s , corriente de entrada I_s , voltaje de salida V_o y corriente salida I_o . El convertidor opera en tres modos que establecen el comportamiento de V_o e I_o en la carga, como se observa en la Fig. 2.1. Las condiciones del ciclo de trabajo para M1 y M2, son $D > 0.5$ para el cuadrante I, y $D < 0.5$ para el cuadrante IV.

Fig. 2.2. Comportamiento de I_o en el cuadrante I



Fuente: elaboración propia a partir de [5] utilizando KiCad v8.0.

Las líneas punteadas en la Fig. 2.2 en color verde (E1), azul (E2) y roja (E3) muestran los flujos de corriente a través del *chopper*, funcionando en el cuadrante I. Donde I_o es siempre positiva y está en función de la carga, y el V_o en función del encendido y apagado de los MOSFET como:

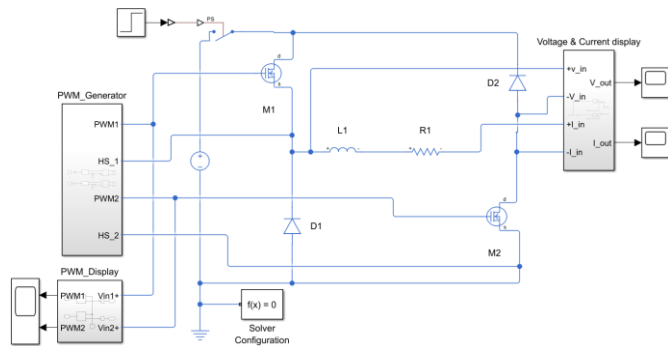
$$V_o = \begin{cases} V_s & t_0 < T < t_1 & M_{1,2} \rightarrow ON & (E1) \\ 0 & t_1 \leq T < t_2 & M_1 \rightarrow ON; M_2 \rightarrow OFF & (E2) \\ V_s & t_2 \leq T < t_3 & M_{1,2} \rightarrow ON & (E1) \\ 0 & t_3 \leq T < t_4 & M_{1,2} \rightarrow OFF; M_2 \rightarrow ON & (E3) \end{cases}$$

Cabe señalar que en este documento solo se trabajará en el cuadrante I, tanto V_o como I_o son positivas para suministrar potencia a la carga.

2.2 Simulación del convertidor.

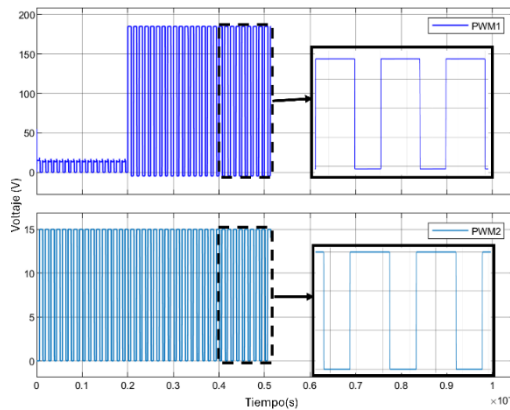
El modelo de simulación se desarrolló con elementos de la librería Simscape de Simulink/MATLAB v2024A [24], como se muestra en la Fig. 2.3. utilizando dispositivos MOSFET con parámetros: $R_{DS(on)} = 0.3 \Omega$, $I_{DS(on)} = 21 A$, $V_{GS(TH)} = 2.5V$ y diodos con el parámetro $V_F = 4.5v$. Posteriormente se utilizó una carga tipo R-L conectada en serie con valores 83.1Ω y $475 \mu H$ respectivamente y un capacitor conectado en paralelo a la resistencia de $0.1\mu F$, aplicando $V_s=180V$ calculados para obtener una corriente de salida $I_o = 2A$. Finalmente, la frecuencia de operación de las señales de conmutación PWM1 y PWM2 se fijó en 80 kHz [9].

Fig. 2.3 Simulación del chopper



Fuente: elaboración propia con Simulink/MATLAB® v2024A.

Fig. 2.4. Señales de conmutación PWM1 y PWM2.

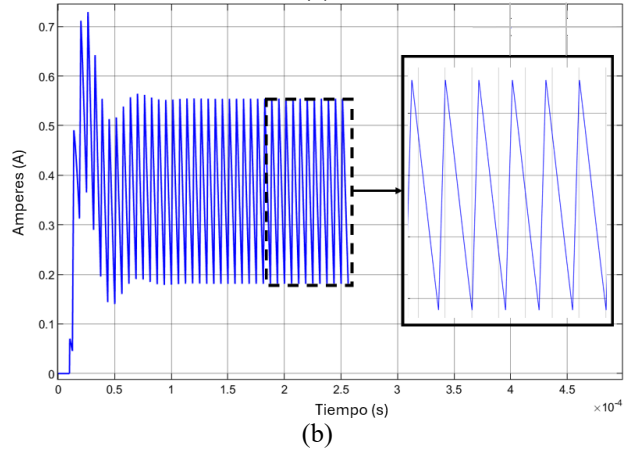
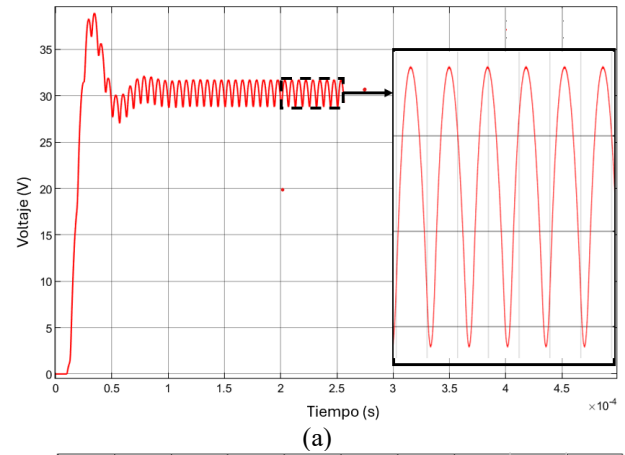


Fuente: Elaboración propia con Simulink/MATLAB, v2024A.

Otros elementos requeridos para completar el circuito de simulación son, PWM_Generator para producir las señales PWM1 y PWM2 desfasadas 180° una respecto a la otra y configuradas al 60 % del ciclo de trabajo (D), y el bloque PWM_Display que acopla las señales eléctricas a las terminales de compuerta y fuente de cada MOSFET. Los resultados de los pulsos obtenidos mediante la simulación se

observan en la Fig. 2.4. Para la adquisición del V_o e I_o se utilizó el bloque Voltage & Current Display como se observa en la Fig. 2.5.

Fig. 2.5. a) Voltaje de salida del convertidor, b) Corriente de salida del convertidor



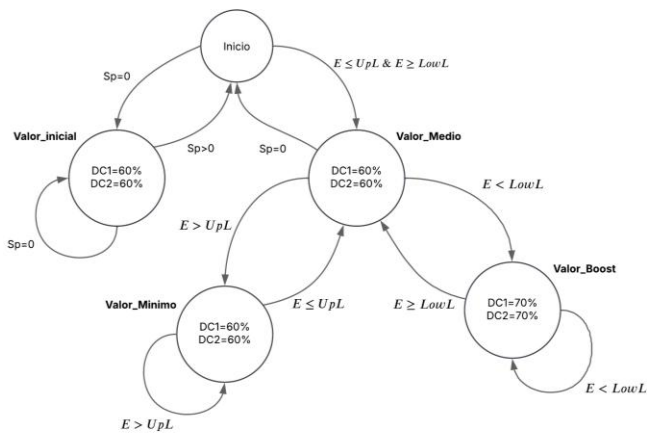
Fuente: elaboración propia con Simulink/MATLAB, v2024A

2.3 Diseño de la máquina de estados.

El sistema de control simulado mediante *Stateflow*/MATLAB se basa en una máquina de estados finitos. La variable por controlar es la corriente de salida I_o , mientras que la variable a manipular son los ciclos de trabajo para los PWM1 y PWM2. Se realizaron pruebas en lazo abierto del convertidor, a fin de determinar los porcentajes que contribuyen a incrementar o decrementar la corriente, de esta manera se establecieron tres estados transitorios. La MEF se muestra en la Fig. 2.6, el estado inicial evalúa si el Set Point (Sp) ha sido fijado, de lo contrario, se asigna un $D=60\%$, para $DC1$ ($M1$) y $DC2$ ($M2$). Por otra parte, si Sp está establecido, la MEF inicializa los estados mediante la comparación entre la corriente de entrada I_{in} y el valor del Sp , entonces si $I_{in} > Sp$ se asigna $D=60\%$ para ambos PWM. Sin embargo, dada la naturaleza del convertidor la corriente de salida presenta oscilaciones, por lo tanto, es necesario establecer un margen de tolerancia en donde la MEF no realizará ninguna acción. Así, el margen establecido se propone de 1.05 % y 0.95% del error en estado estable (E),

donde UpL (límite superior de corriente, 1.05%) y LowL (límite inferior de corriente, 0.95%).

Fig. 2.6 Maquina de estados finitos.

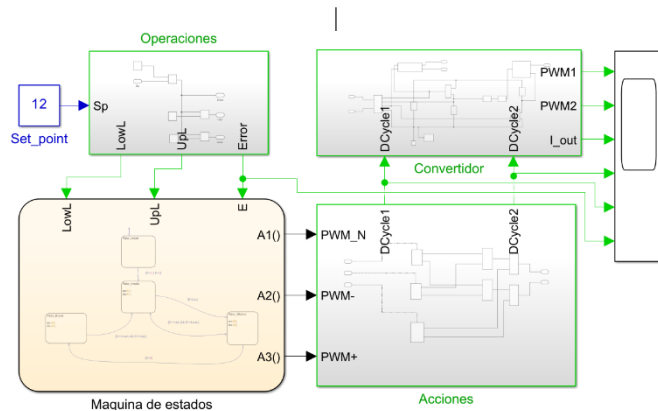


Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS

El diagrama general del sistema desarrollado con *Stateflow/MATLAB* se muestra en la Fig. 3.1.

Fig. 3.1 MEF desarrollada en *Stateflow/MATLAB*®

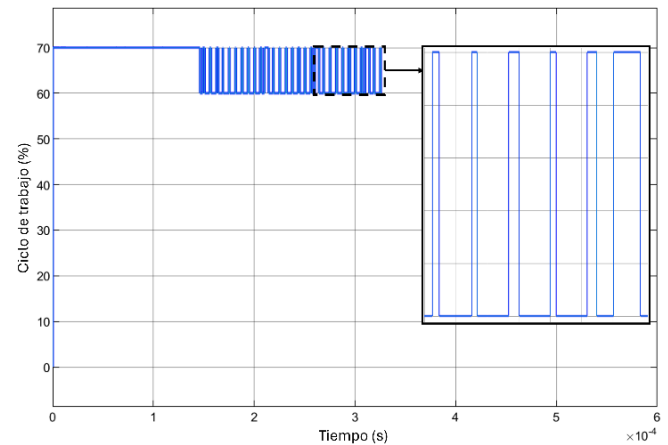


Fuente: Elaboración propia con *Stateflow/MATLAB*® v2024A

El primer bloque corresponde al Set_point (Sp) donde el valor es asignado al bloque de Operaciones. Este recibe el valor del Sp y establece los valores de error (E), límite superior de corriente UpL e inferior LowL. Cabe resaltar que el E resultante considera un margen de tolerancia del 1%. Estos valores ingresan a la MEF para llevar a cabo las acciones A1(), A2() y A3(), las cuales están en función del diagrama de la Fig. 2.6. Posteriormente, estos parámetros ingresan al bloque de Acciones para asignar los ciclos de trabajo DCycle1 y DCycle2 para los pulsos de conmutación del convertidor. El estado Valor_inicial asigna D=60% para ambos PWM, el Valor_Boost D=70%, y finalmente el Valor_Mínimo y Valor_Medio D=60%. Finalmente, el bloque Convertidor,

recibe los valores DCycle1 y DCycle2, para asignarlos a los drivers de cada MOSFET, además de mostrar la corriente de salida I_{out} . La variación de los ciclos de trabajo DCycle1 y DCycle2, para las señales PWM1 y PWM2 de los respectivos MOSFET se muestra en la Fig. 3.2., es importantes señalar que ambos tienen el mismo ciclo de trabajo, motivo por el cual ambas señales se observan traslapadas y en color en azul. Estas señales se obtienen del bloque de Acciones de la Fig. 3.1.

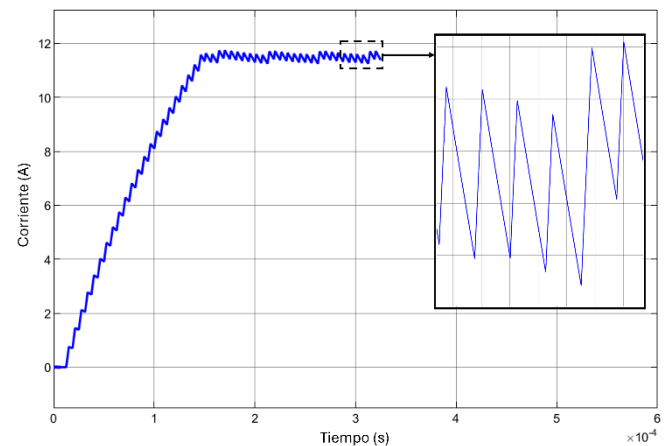
Fig. 3.2 Señal de control



Fuente: Elaboración propia con *Stateflow/MATLAB*® v2024A

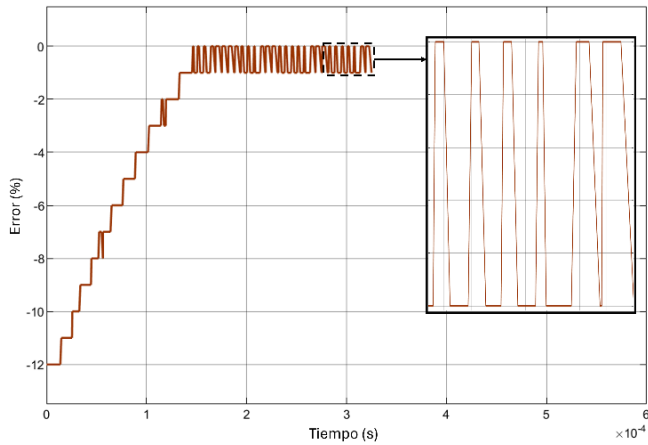
Los resultados de la Fig. 3.3 muestran una corriente de salida del convertidor variante en el tiempo con valor de ~11.5 A. Inicialmente este valor de Set point se fijó a 12 A, por lo tanto, los resultados muestran un error aproximadamente entre el 1.05 y el 0.95 %. Por otra parte, los resultados del comportamiento del % de error (E) a través del tiempo, obtenido a partir de la diferencia resultante entre la corriente con $Sp = 12$ A e I_{in} se muestra en la Fig. 3.4.

Fig. 3.3 Corriente de salida del convertidor



Fuente: elaboración propia con *Simulink/MATLAB*® v2024A

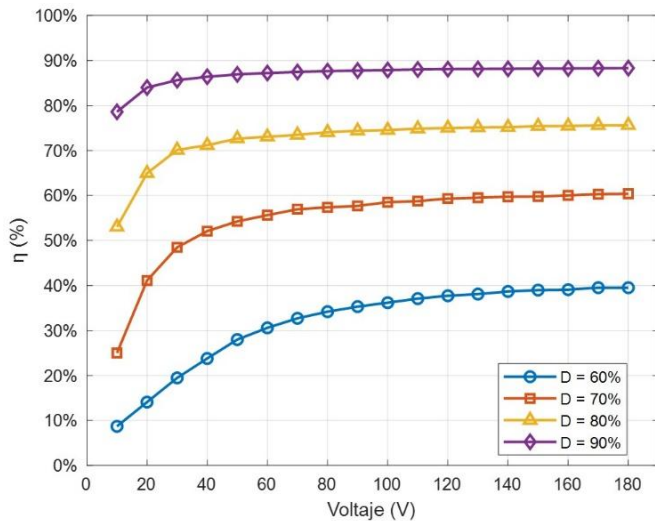
Fig. 3.4 Comportamiento del error



Fuente: elaboración propia con Simulink/MATLAB® v2024A

Los resultados de eficiencia eléctrica (η) en lazo abierto del convertidor se simularon con ciclos de trabajo, $D=60, 70, 80$ y 90% , y para voltajes de entrada $10 \leq V_s \leq 180$ con variaciones de 10 V , ver Fig. 3.5.

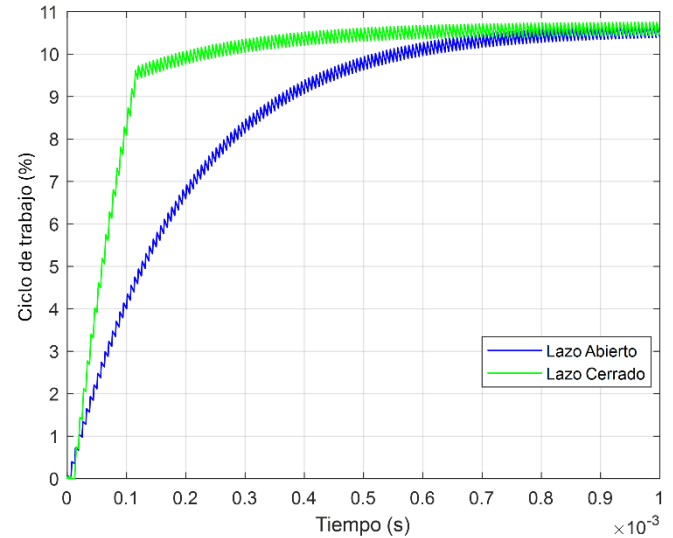
Fig. 3.5 Eficiencia eléctrica del convertidor



Fuente: Elaboración propia con Simulink/MATLAB® v2024A.

Se observa que el porcentaje de η más alto se obtiene para un ciclo de operación $D = 90\%$. Finalmente, la corriente de salida a lazo abierto y lazo cerrado se simuló con un voltaje de alimentación de 180V y un set-point de 10 Amperes , en la figura 3.6 se puede apreciar de forma gráfica la diferencia en el tiempo de ascenso de la corriente a lazo abierto y cerrado, la MEF reduce considerablemente el tiempo de subida y se encarga de mantener la estabilidad de la corriente en estado estacionario (Fig.3.6).

Fig. 3.6 Corriente de salida del convertidor a lazo abierto y cerrado



Fuente: Elaboración propia con Stateflow/MATLAB® v2024A

CONCLUSIONES

En este trabajo se describen los resultados de simulación de un convertidor en modo corriente, se comenzó con la simulación a lazo abierto del sistema y se determinaron una serie de condiciones de operación, las cuales permitieron establecer los parámetros de ajuste de los ciclos de trabajo para cada interruptor de convertidor, de esta manera fue posible establecer una máquina de estados finita, la cual realiza la toma de decisiones para mantener la estabilidad en estado estable del sistema en términos de la corriente de salida. La simulación del convertidor permitió determinar el punto óptimo de operación en función de la eficiencia eléctrica (η). La MEF propuesta en este trabajo permite que el convertidor llegue al punto de operación de 10 A , con un error de tolerancia del $\pm 5\%$.

REFERENCIAS

- [1] M. Hemeida, A. Hemeida, T. Senjyu and D. Osheba, "Renewable Energy Resources Technologies and Life Cycle Assessment: Review," *Energies*, vol. 15, no 24, pp. 9417, 2022. doi: [10.3390/en15249417](https://doi.org/10.3390/en15249417)
- [2] D. Noriega-Pineda, "Control de convertidores Estáticos de Potencia desde una Perspectiva de Sistemas de Conmutados," Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, 2006.
- [3] A. Vega y M. Pozo, "Estudio e implementación de plataformas de desarrollo digital modernas para ser utilizados en aplicaciones con convertidores estáticos de energía", *XXIX Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica*, vol. 29, no 27, pp. 205-210, 2019.
- [4] M. S. Salah Alatai *et al.*, "A review on State-of-the-Art Power Converters: Bidirectional, Resonant, Multilevel

- Converters and Their Derivatives," *Applied Science*, vol. 11, no 7, pp. 3-43, 2021. doi: [10.3390/app112110172](https://doi.org/10.3390/app112110172).
- [5] B. Williams, *Power Electronics*. Disponible en: <https://personal.eee.strath.ac.uk/barry.williams/book.html>. Accedido: 10-feb-2025.
- [6] M. Taleb, N. Mansour and K. Zehar, "Performance of a grid-connected solar PV system using class D chopper," *6th Smart Cities Symposium (SCS 2022)*, Hybrid Conference, Bahrain, 2022, pp. 180-186, doi: [10.1049/icp.2023.0396](https://doi.org/10.1049/icp.2023.0396).
- [7] R. B. Bailey, D. F. Williamson and T. D. Stitt, "A Modern Chopper Propulsion System or Rapid Transit Application with High Regeneration Capability," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-14, no. 6, pp. 573-580, 1978, doi: [10.1109/TIA.1978.4503594](https://doi.org/10.1109/TIA.1978.4503594).
- [8] C. Won-Suk *et al.*, "A New Control Scheme for a Class-D Inverter with Induction Heating Jar Application by Constant Switching Frequency," *Korea Science*, vol. 5, no 4, pp. 272-281, 2005.
- [9] V. Rueda, A. Wiesner, R. Diez and H. Piquet, "Power Estimation of a Current Supplied DBD Considering the Transformer Parasitic Elements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 6567-6575, 2019, doi: [10.1109/TIA.2019.2933519](https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2933519).
- [10] K. Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Naucalpan, Edo. Méx: Prentice Hall, 1998.
- [11] M. N. Mamat and D. Ishak, "Analysis of SEPIC-Boost Converter Using Several PID Feedback Tuning Methods for Renewable Energy Applications," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 26, no 1, pp. 105-117, 2022.
- [12] N. Naajihah Ab Rahman and N. Mat Yahya, "System Identification for a Mathematical Model of DC Motor System," *2022 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, Shah Alam, Malaysia, 2022, pp. 30-35, doi: [10.1109/I2CACIS54679.2022.9815461](https://doi.org/10.1109/I2CACIS54679.2022.9815461).
- [13] N. S. Kumar, V. Sadasivam, and H. M. Asan Sukriya, "A Comparative Study of PI, Fuzzy, and ANN Controllers for Chopper-fed DC Drive with Embedded Systems Approach," *Electric Power Components and Systems*, vol. 36, no 7, pp. 680-695, 2008. doi: [10.1080/15325000701881944](https://doi.org/10.1080/15325000701881944).
- [14] U. Yolac and T. Yalcinoz, "Comparison of fuzzy logic and PID controllers for TCSC using Matlab," *39th International Universities Power Engineering Conference*, 2004. UPEC 2004., Bristol, UK, 2004, pp. 438-442 Vol. 1.
- [15] M. Saleh, Y. Esa and A. Mohamed, "Centralized control for DC microgrid using finite state machine," *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Washington, DC, USA, 2017, pp. 1-5, doi: [10.1109/ISGT.2017.8086062](https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8086062).
- [16] M. Khalilzadeh, S. Vaez-Zadeh, J. Rodriguez and R. Heydari, "Model-Free Predictive Control of Motor Drives and Power Converters: A Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 105733-105747, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3098946](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3098946).
- [17] W. E. Bachouti Khalil. Implementación de Máquina de estados finita en microcontrolador para optimizar el control del sistema de energía de un dron híbrido pila de combustible-batería, Tesis de Licenciatura. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2023.
- [18] M. Cirstea, *et al.*, "Digital Electronic System-on-Chip Design: Methodologies, Tools, Evolution, and Trends," *Micromachines*, vol. 247, no 15, pp. 180-187, 2024. doi: [10.3390/mi15020247](https://doi.org/10.3390/mi15020247).
- [19] J. Nethaji and J. Kathirvelan, "Performance comparison between PID and fuzzy logic controllers for the hardware implementation of traditional high voltage DC-DC boost converter," *Heliyon*, vol. 10, no 3, pp. 23-43, 2024, 2024. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e36750](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36750).
- [20] M. Hermassi *et al.*, Adaptive neuro fuzzy technology to enhance PID performances within VCA for grid-connected wind system under nonlinear behaviors: FPGA hardware implementation," *Computer and Electrical Engineering*, vol. 117, no 109264, 2024. doi: [10.1016/j.compeleceng.2024.109264](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109264).
- [21] A. Ali, *et al.*, "A review on FPGA implementation of fractional-order systems and PID controllers," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 177, no 5, pp. 176-189, 2024. doi: [10.1016/j.aeue.2024.155218](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155218).
- [22] S. E. Mathe, A. C. Pamarthy, H. K. Kondaveeti and S. Vappangi, "A Review on Raspberry Pi and its Robotic Applications," *2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, Vijayawada, India, 2022, pp. 1-6, doi: [10.1109/AISP53593.2022.9760590](https://doi.org/10.1109/AISP53593.2022.9760590).
- [23] N. M. A. Mohamed, *et al.*, "Implementation of a PID control system on microcontroller (DC motor case study)," *2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE)*, Khartoum, Sudan, 2017, pp. 1-5, doi: [10.1109/ICCCCEE.2017.7866088](https://doi.org/10.1109/ICCCCEE.2017.7866088).
- [24] C. Mathworks, "Mathworks," MATLAB Inc, 2 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com>. [Último acceso: 2025 Enero 10].