



CONTROL DIFUSO PARA UN SISTEMA ELEVADOR DE VOLTAJE EN DOS ETAPAS

FUZZY CONTROL FOR A TWO-STAGE STEP-UP VOLTAGE SYSTEM

Fecha de Recepción : 30/11/2021
Fecha de Aprobación : 10/12/2021
Fecha de Publicación : 06/06/2022

DOI: <https://doi.org/10.26495/icti.v9i1.2169>

 Luis Antonio Mier Quiroga¹

 Benito Rodríguez Nava²

 Karla Brenda Robles Piña³

 José Manuel Cárdenas Cruz⁴



Resumen

Este artículo presenta el diseño, desarrollo y simulación de un sistema de control difuso tipo mamdani para un circuito elevador de voltaje de corriente directa, en dos etapas, tipo boost. El objetivo sistema elevador es acondicionar la magnitud del voltaje generado por un alternador acoplado al eje del motor principal de un torno industrial. Una vez que el voltaje tiene la magnitud adecuada es convertido en alterno mediante un inversor, con el propósito de adquirir las características adecuadas para ser introducido a la red eléctrica de la empresa y obtener una bonificación en la factura de energía eléctrica. Los resultados de las simulaciones realizadas muestran que la magnitud del voltaje requerido en la salida del sistema elevador, controlado por el sistema propuesto, se mantiene aún ante perturbaciones. Esto debido a la información que se le provee y programa, en una base de reglas if-then, al sistema de control difuso. La base de reglas, es una forma de transmitir al controlador la forma en que una persona experta tomaría decisiones y llevaría a cabo la acción de control. Para tal propósito, se considera la desviación existente entre el voltaje de salida actual y el voltaje requerido, en las dos etapas que involucran al sistema elevador de voltaje. Con esa información se evalúan las reglas, para determinar el valor que debe de tener el ciclo de trabajo y, por ende, la magnitud del voltaje de cada etapa del sistema elevador.

Palabras Clave: control difuso, convertidor boost, convertidores cd-cd.

Abstract

This paper presents the design, development and simulation of a mamdani type fuzzy control system for a two-stage, boost-type, direct current voltage step-up converter circuit. The objective of step-up system is to prepare the magnitude of the generated voltage by an alternator coupled to the main motor shaft of an industrial lathe. Once the voltage has the appropriate magnitude, it is converted into alternating current by means of an inverter, with the purpose of acquiring the appropriate characteristics to be introduced to the company's electrical network and obtain a reduction in the electrical energy bill. The results of the simulations carried out show that the magnitude of the required voltage at the output of the elevator system, controlled by the proposed system, is preserved even in the

¹ Escuela de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, México, luis.mier@tesjo.edu.mx

² Escuela de Ingeniería Química, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, México, benito.rodriguez@tesjo.edu.mx

³ Escuela de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, México, karlarobles0520@gmail.com

⁴ Escuela de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, México, manuel.cardenas9828@gmail.com

presence of disturbances. This is due to the information provided and programmed in an if-then rule base to the fuzzy control system. The rule base is a manner of transmitting to the controller the method in which an expert person would make decisions and carry out the control action. For this purpose, it considers the deviation between the current output voltage and the required voltage in the two stages involving the booster system voltage. With that information the rules are evaluated to determine the value that should have the duty cycle and, therefore, the magnitude of the voltage of each stage of the step-up system.

Keywords: fuzz control, boost converter, cd-cd converters.

1. Introducción

En la actualidad, con el fin de mitigar los efectos y daños ambientales debidos a la generación de energía eléctrica mediante el uso de combustibles fósiles, se han desarrollado formas alternas de³ producirla. De forma general, se pueden mencionar diversos tipos de sistemas de generación de energía, como aquellos basados en generadores eólicos, paneles fotovoltaicos, celdas de combustible, etcétera (Cheng et al., 2020; Charaabi et al., 2020). En gran parte de estas alternativas, sin importar la fuente principal de energía, se requiere ajustar ciertas características del voltaje y corriente obtenidos, con el fin de proveer de energía a una carga específica o para acoplarlos a las redes eléctricas existentes. Para tal propósito, los circuitos convertidores de potencia, en específico, aquellos que realizan conversión entre diferentes magnitudes de voltaje en corriente directa son ampliamente utilizados (Charaabi et al., 2020; Khosroshahi et al., 2019). En general, en toda aquella aplicación, industrial o doméstica, que involucre conversión de potencia, los convertidores cd-cd juegan un rol significativo y son ampliamente utilizados debido a su diseño simple y generalmente su costo de implementación es bajo, comparado con otro tipo de sistemas (Charaabi et al., 2020). Algunos ejemplos de dichas aplicaciones, diferentes a los sistemas de generación de energía, son en las etapas de alimentación de equipos médicos, de telecomunicaciones, sistemas de iluminación (Doubabi & Salhi, 2021; El Aroudi et al., 2016) y reactores de plasma (Tepale et al., 2015). Recientemente destacan en aquellas que involucren almacenamiento de energía, tales como vehículos híbridos y eléctricos, computadoras portátiles, teléfonos celulares, entre otros (Adnan et al., 2017; Tie & Tan, 2013). El uso de transformadores de ca para el incremento o reducción de la magnitud del voltaje o corriente, involucra aumentar el número de etapas a las fuentes de energía y sistemas de almacenamiento, volviéndolos más complejos y caros, además de pesados y menos eficientes (Elnaghi et al., 2020).

De los diferentes convertidores cd-cd existentes, tales como el buck, cuk, sepic, buck-boost, entre otros, destaca el uso del convertidor boost en los sistemas de generación de energía (Adnan et al., 2017; Sharma et al., 2018; Ganthia et al., 2017; Boujelben et al., 2017). Su incorporación en estos sistemas se debe a su principal característica de poder incrementar la magnitud de su voltaje de entrada, considerando que también es altamente eficiente, simple y fácil de implementar (Charaabi et al., 2020; Bellinaso et al., 2018; Meza et al., 2018). Destaca su capacidad de generar una baja distorsión armónica de corriente hacia la red eléctrica y su capacidad natural de autocorrección del factor de potencia, mejorándolo significativamente (Adnan et al., 2017; Paipa et al., 2020).

En ciertas aplicaciones, se requiere que el convertidor boost lleve a cabo un gran incremento de la magnitud del voltaje, lo cual involucra una alta ganancia. Si se usa un solo convertidor en estas circunstancias, se presentan ciertos inconvenientes. El estrés de los componentes se incrementa, disminuye la eficiencia por el incremento en las pérdidas en dispositivos semiconductores y se ve afectada la generación de armónicos (Charaabi et al., 2020; Elnaghi et al., 2020; El Aroudi et al., 2016). Para evitar estas desventajas, se han propuesto diversas modificaciones al convertidor boost, enfocadas principalmente a dividir el funcionamiento y capacidad de elevación en dos etapas que operen con valores de ganancia bajos. La configuración que implica la conexión de dos convertidores en serie o cascada tiene alta eficiencia (Boujelben et al., 2017; Elnaghi et al., 2020; El Aroudi et al., 2016) y acompañados de diferentes esquemas de control, presenta robustez, exactitud y respuestas transitorias rápidas (Chen et al., 2014).

Existe un extenso número de trabajos publicados donde se discute y analiza la respuesta del convertidor boost bajo diferentes esquemas de control. Esto es debido a que la eficiencia de un convertidor depende críticamente del controlador (Doubabi & Salhi, 2021). Destacan investigaciones basadas en el sistema de control PID (El Aroudi et al., 2016), optimizados mediante técnicas como algoritmos genéticos y enjambre de partículas, mejorando el desempeño del convertidor al reducir su tiempo de elevación, tiempo de establecimiento y la magnitud de máximo sobre impulso (Meena, 2014). Otros controladores como los que se basan en modos deslizantes, redes neuronales artificiales y lógica difusa han demostrado también mejorar significativamente la respuesta transitoria y estabilidad del convertidor boost (Adnan et al., 2017; Sharma et al., 2018; Murillo-Yarce et al., 2020). Algunas de estas técnicas se han implementado en convertidores boost en cascada, logrando resultados semejantes a los mencionados con otras técnicas (Chen et al., 2014).

El control difuso tiene su origen en los sistemas basados en reglas para la toma de decisiones y en la lógica difusa para la evaluación de ellas. Proporciona un método práctico para realizar controladores no lineales mediante el uso de información obtenida por la experiencia. Esta información puede proceder de un operador o experto que ha trabajado como “el controlador” de un proceso. En el diseño del controlador, se establecen un conjunto de reglas sobre el control del proceso. Las reglas pueden ser establecidas mediante las decisiones tomadas y acciones realizadas por el operador que controla el proceso. También, la base de reglas puede ser construida a partir de la experiencia de un ingeniero en control que ha realizado el modelo matemático, un amplio análisis y algoritmos de control del proceso a controlar. Tal conocimiento es cargado en el controlador difuso para automatizar el proceso en cuestión. El control difuso proporciona un método para representar e implementar las ideas sobre cómo lograr un control de alto desempeño (Passino et al., 1998).

En este trabajo se presenta el diseño de un controlador difuso tipo mamdani, para un sistema elevador de voltaje en dos etapas. Este sistema, basado en dos convertidores boost conectados en cascada, es parte de un proyecto de recuperación de energía de un torno industrial. La máquina se encuentra en el taller de mantenimiento de una empresa de maquinados industriales y gran parte del día se encuentra funcionando, pero no necesariamente maquinando. Se recurre al torno en momentos que se requieren hacer trabajos urgentes, principalmente ajustes, modificaciones o correcciones a piezas. Un alternador se encuentra acoplado al eje del torno, por lo que el sistema elevador toma el voltaje de salida con una magnitud de 14 V y la ajusta a una magnitud de 180 V. Esto es con el objetivo de que un inversor comercial de 1000 W, lo convierta en alterno e integre la energía a la red eléctrica, con la finalidad de que se bonifique y se reduzca la factura de energía eléctrica.

2. Material y métodos

Inicialmente, se propuso que el sistema elevador estuviera integrado por un convertidor tipo boost. El diagrama del convertidor se muestra en la Figura 1 y su voltaje de salida está determinado por la ecuación:

$$V_{out} = \frac{V_d}{1 - D} \quad Ec. (1)$$

Donde D , es el ciclo de trabajo y corresponde a una serie de pulsos con periodo constante, que conmutan el transistor mosfet. Su valor sólo puede estar entre 0 y 1, ya que es la relación del tiempo que la señal permanece en alto, respecto al valor del periodo. El valor del ciclo de trabajo establece la magnitud del voltaje de salida.

Los valores considerados para el diseño, así como de los componentes fueron determinados acorde a (Erickson & Maksimovic, 2007) y se pueden ver en la Tabla 1.

Analizando el circuito y calculando los valores de las magnitudes de voltajes y corrientes en algunos dispositivos se encontró que la corriente pico, a través del inductor, sería de alrededor de 127 A. Este valor implicaba trabajar con dispositivos, tales como el diodo y transistor mosfet, de uso industrial y no tan comunes, además de involucrar grandes pérdidas, es decir, baja eficiencia, además de los inconvenientes ya mencionados en la sección anterior.

Figura 1

Covertidor boost.

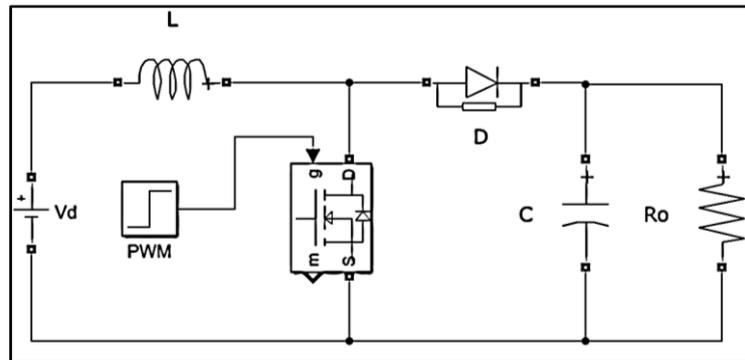


Tabla 1

Valores de parámetros del convertidor boost

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada V_d	14 V
Voltaje de salida	180 V
Capacitor	388 μF
Inductor	1.8 μH
Frecuencia de conmutación	50 kHz

Con base en los artículos encontrados, donde se mencionan las ventajas de trabajar un sistema de elevación de voltaje con dos convertidores boost en cascada, se decidió realizar el diseño de un circuito como el que se muestra en la Figura 2. En la tabla 2, se puede ver el valor de los voltajes considerados, así como de los componentes calculados acorde a (Erickson & Maksimovic, 2007).

Figura 2

Sistema elevador de voltaje con dos convertidores boost en cascada

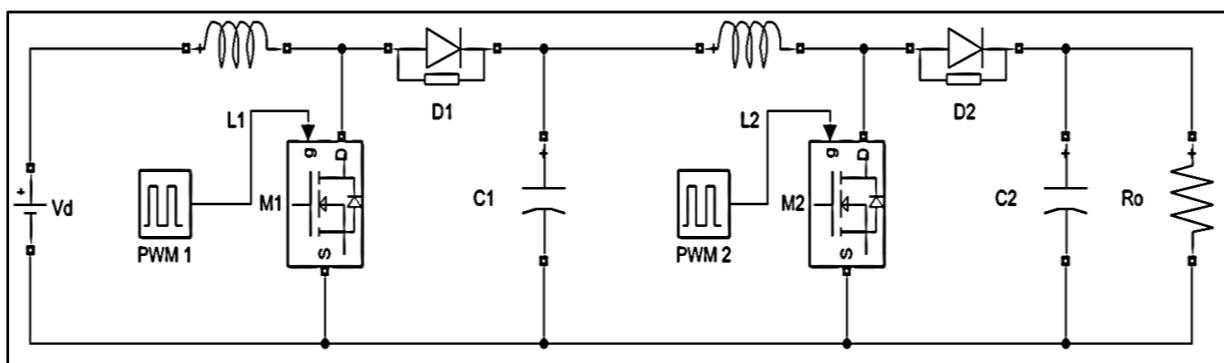


Tabla 2

Valores de parámetros de los convertidores boost en cascada.

Parámetro	Convertidor 1	Convertidor 2
Voltaje de entrada Vd	14 V	35 V
Voltaje de salida	35 V	180 V
Capacitor	245 μ F	15 μ F
Inductor	5.8 μ H	47 μ H
Frecuencia de conmutación	50 kHz	50 kHz

Con estos valores, la corriente pico en los inductores disminuye considerablemente. En el convertidor 1 no excede los 32 A y en el segundo convertidor es menor a 13 A.

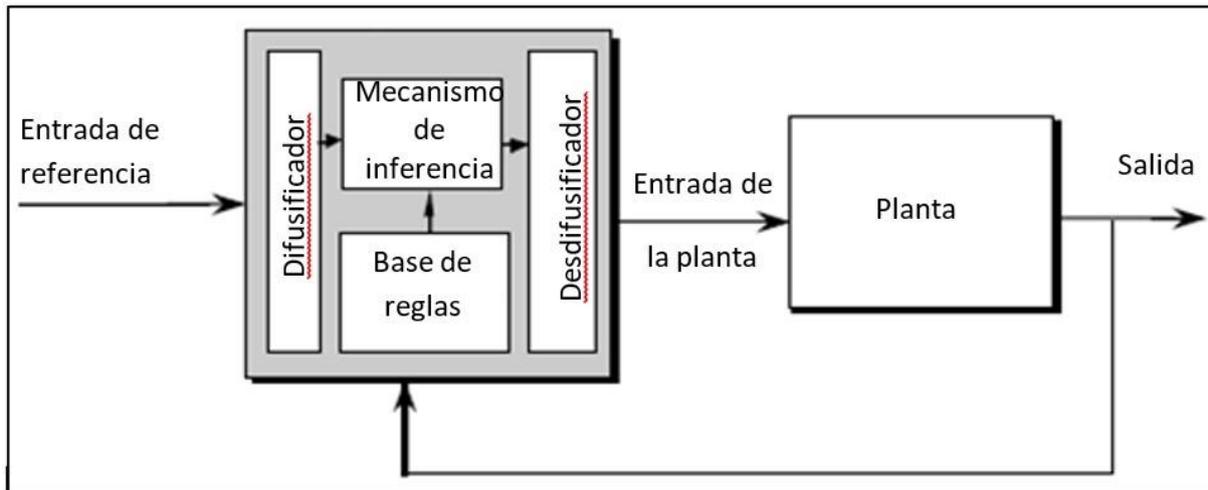
Analizando el funcionamiento de ambos convertidores en cascada se encontró que presentaba variaciones en la magnitud del voltaje de salida. Lo cual podría dañar la siguiente etapa involucrada en el sistema de recuperación de energía, el inversor de voltaje. Se determinó diseñar un sistema de control difuso, con el propósito de mantener constante, en el nivel adecuado, el voltaje entregado por el sistema elevador.

Los controladores difusos, al igual que los “controladores clásicos”, toman los valores de las variables de entrada, realizan algún procedimiento con ellas, deciden como modificar las variables de salida y lo realizan, afectando estas últimas a la planta o sistema controlado. La diferencia esencial es que no procesan ecuaciones ni tablas, sino reglas para decidir cómo cambiar las salidas. En la figura 3 se muestra el diagrama de un sistema de control difuso que está compuesto de los siguientes elementos (Passino et al., 1998):

- Base de reglas (conjunto de reglas Si-Entonces). Contiene una cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística del operador experto sobre cómo lograr un buen control.
- Interfaz de difusificación. Convierte las entradas del controlador en información que el mecanismo de inferencia puede usar fácilmente para activar y aplicar reglas.
- Mecanismo de inferencia (también llamado máquina de inferencia o módulo de inferencia difusa). Emula la decisión del experto. Interpreta y aplica el conocimiento adquirido sobre cómo realizar el mejor control de la planta.
- Interfaz de desdifusificación. Convierte las conclusiones del mecanismo de inferencia en las correspondientes entradas de la planta.

Figura 3

Estructura del controlador difuso



Para el diseño del controlador se consideraron dos entradas, “Error 1” y “Error 2”. Que corresponden a la diferencia entre la magnitud del voltaje de salida requerido en el convertidor correspondiente y su valor actual en la salida. La Figura 4, muestra las funciones de pertenencia consideradas para cada entrada.

Las salidas del controlador son el ciclo de trabajo de cada convertidor boost (D1 y D2), mediante los cuales el controlador ajustará los niveles de voltaje de salida de cada uno. Las funciones de pertenencia de las salidas se muestran en la Figura 5.

Figura 4

Funciones de pertenencia de las variables de entrada de controlador

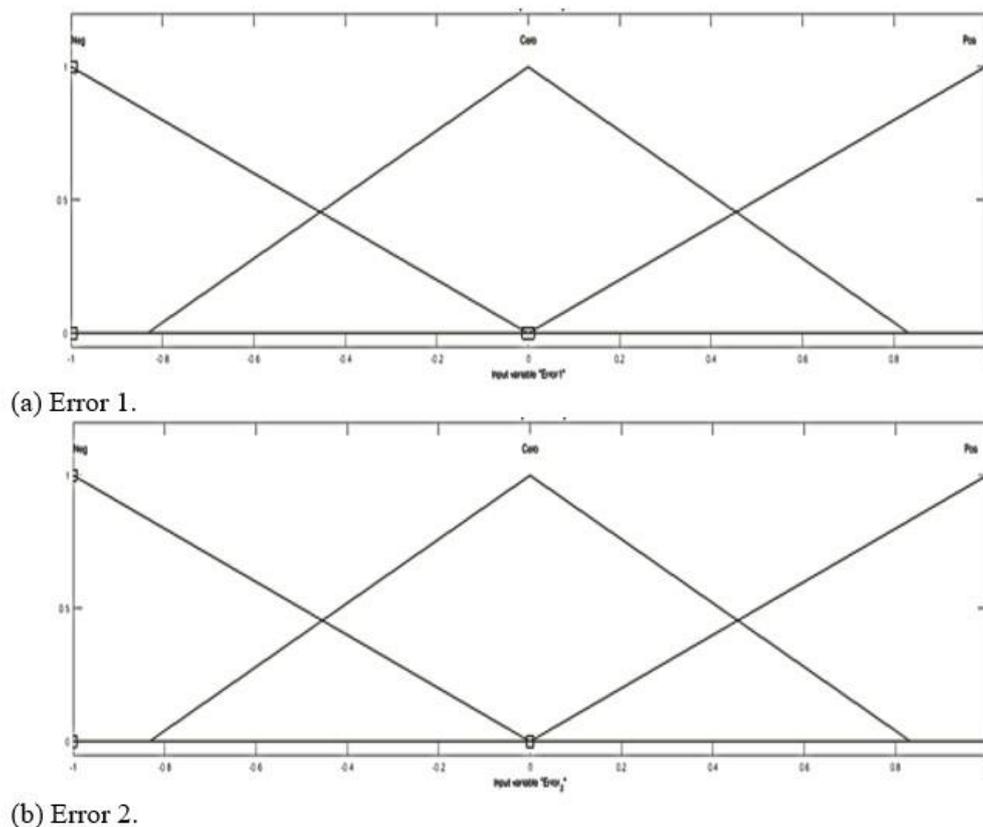
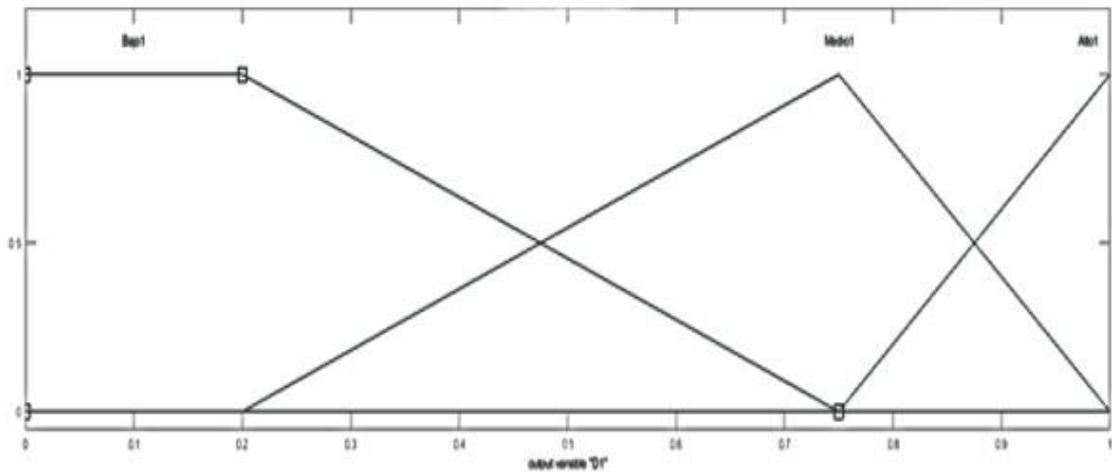
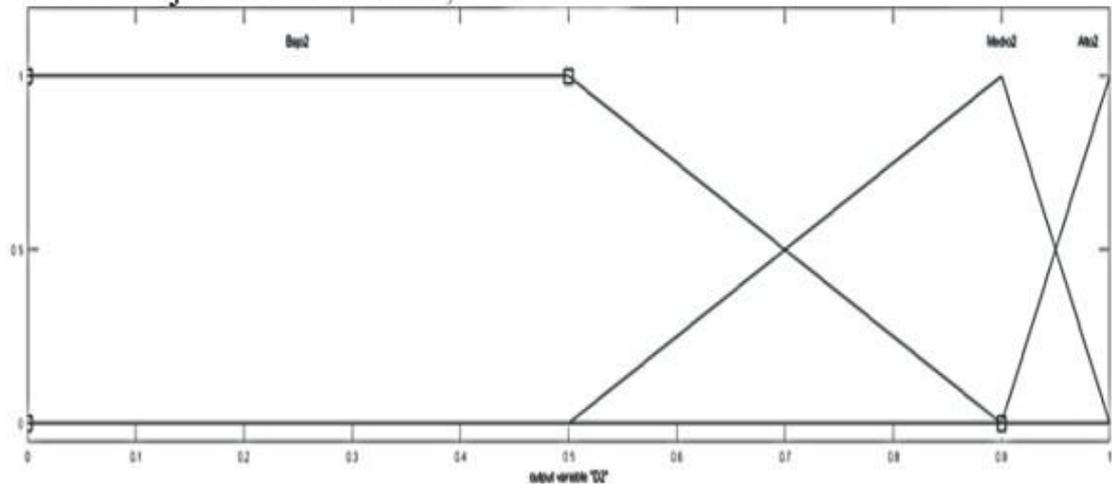


Figura 5

Funciones de pertenencia de las variables de entrada de controlador.



(a) Ciclo de trabajo del convertidor 1, D1.



(b) Ciclo de trabajo del convertidor 2, D2.

La base de reglas que considera el mecanismo de inferencia, para tomar las decisiones sobre la mejor forma de realizar el control del sistema elevador se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Base de reglas del controlador difuso

```

If (Error1 is Neg) and (Error_2 is Neg) then (D1 is Bajo1)(D2 is Bajo2) (1)
If (Error1 is Cero) and (Error_2 is Neg) then (D1 is Medio1)(D2 is Bajo2) (1)
If (Error1 is Pos) and (Error_2 is Neg) then (D1 is Alto1)(D2 is Bajo2) (1)
If (Error1 is Neg) and (Error_2 is Cero) then (D1 is Bajo1)(D2 is Medio2) (1)
If (Error1 is Cero) and (Error_2 is Cero) then (D1 is Medio1)(D2 is Medio2) (1)
If (Error1 is Pos) and (Error_2 is Cero) then (D1 is Alto1)(D2 is Medio2) (1)
If (Error1 is Neg) and (Error_2 is Pos) then (D1 is Bajo1)(D2 is Alto2) (1)
If (Error1 is Cero) and (Error_2 is Pos) then (D1 is Medio1)(D2 is Alto2) (1)
If (Error1 is Pos) and (Error_2 is Pos) then (D1 is Alto1)(D2 is Alto2) (1)
    
```

3. Resultados

La figura 7 muestra el sistema elevador en dos etapas desarrollado, en el inciso (a) se puede ver la etapa de potencia (dos convertidores boost). La imagen del inciso (b) muestra la etapa de potencia con los circuitos de control (generación de señal PWM) y protección.

Figura 7

Sistema elevador de voltaje desarrollado

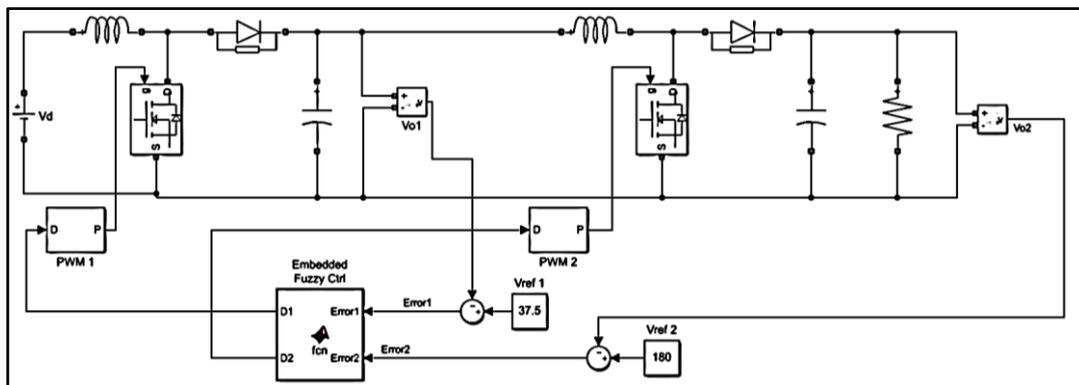


En el análisis del funcionamiento del circuito desarrollado se observó que, al no tener un sistema de control de lazo cerrado, en el encendido, así como ante cualquier variación en el voltaje de entrada o la carga, modifica el voltaje de salida del sistema elevador. Este voltaje será convertidor a alterno por el inversor y, por lo tanto, la magnitud del voltaje de salida del inversor presentará dichas variaciones.

El diagrama completo del sistema elevador de voltaje con la etapa de control se muestra en la figura 8.

Figura 8

Sistema elevador de voltaje en dos etapas con control difuso.

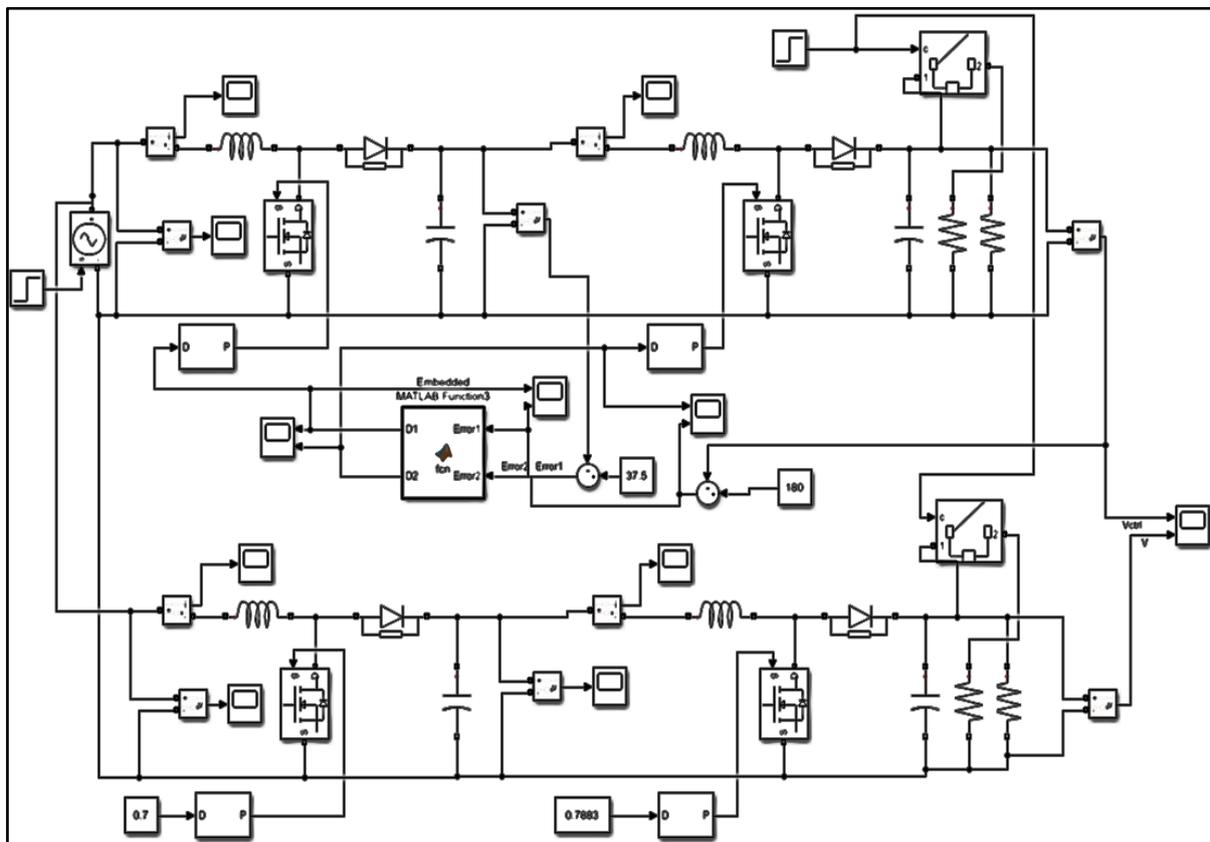


El sistema tiene dos medidores de voltaje, uno para la salida de cada convertidor boost. Los valores obtenidos se comparan con los valores de referencia, es decir, los valores requeridos en la salida de cada uno, obteniendo así su respectiva desviación o error. Ambos valores son considerados por el bloque que corresponde al controlador difuso, el cuál entrega un valor escalar que corresponde a la magnitud del ciclo de trabajo con el que deben ser conmutados los transistores de cada convertidor, con el fin de mantener constantes los voltajes de salida, específicamente el del segundo convertidor.

Para analizar el comportamiento del sistema elevador, con el controlador propuesto, se simuló el sistema que se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Simulación del sistema elevador con control y sin control.

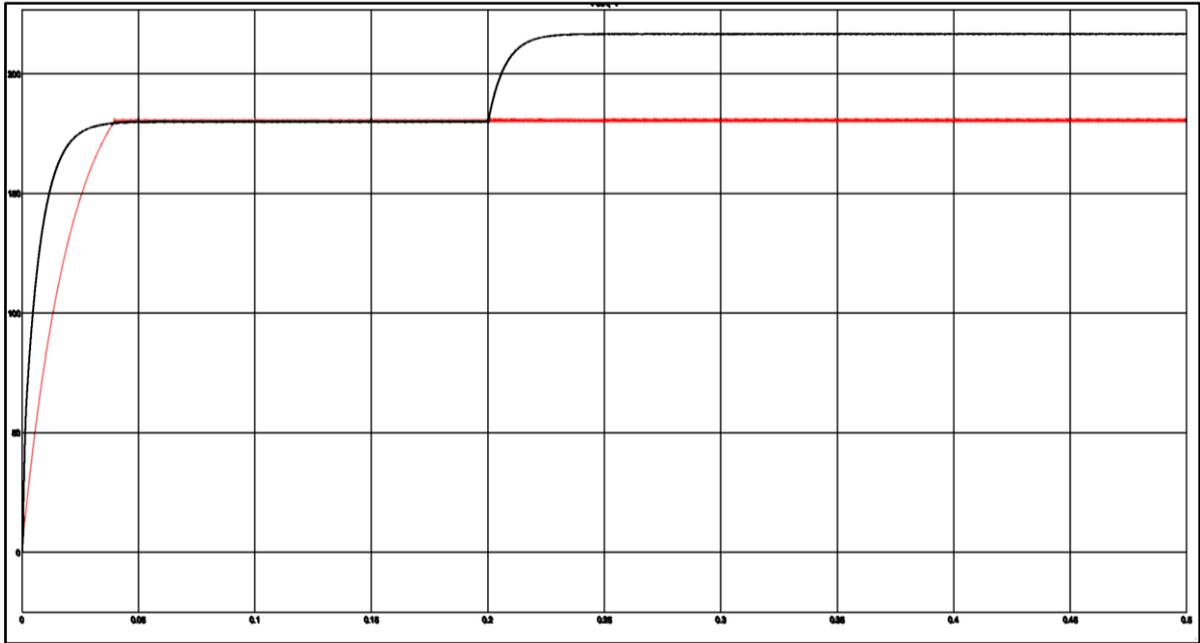


Se puede observar que en la imagen anterior se tienen dos sistemas elevadores, el de la parte superior con el sistema de control difuso propuesto y el de la parte inferior sin control de lazo cerrado. Se realizó la simulación de esta forma con el fin de analizar y comparar la respuesta de la salida, con y sin control.

El primer análisis realizado fue para conocer la respuesta del sistema elevador ante cambios en el voltaje de entrada, comienza la simulación con un voltaje de entrada de 14 V y después de 0.2 segundo es modificado. En la Figura 9, se muestra la respuesta del voltaje de salida con control (color rojo) y sin control (color negro), ante un incremento del voltaje de entrada del 15%.

Figura 10

Respuesta del sistema ante incremento del voltaje de entrada.



En la Figura 10, es posible ver la respuesta del mismo sistema elevador cuando se reduce, en el mismo porcentaje, el voltaje de entrada. Posteriormente, con el fin de determinar la respuesta del sistema elevador ante incrementos de carga, comienza la simulación con un determinado valor de resistencia de carga y después de 0.2 segundos se modifica su valor. La Figura 11 muestra la respuesta del sistema ante un incremento del 25% de la corriente de salida.

Figura 11

Respuesta del sistema ante incremento del voltaje de entrada.

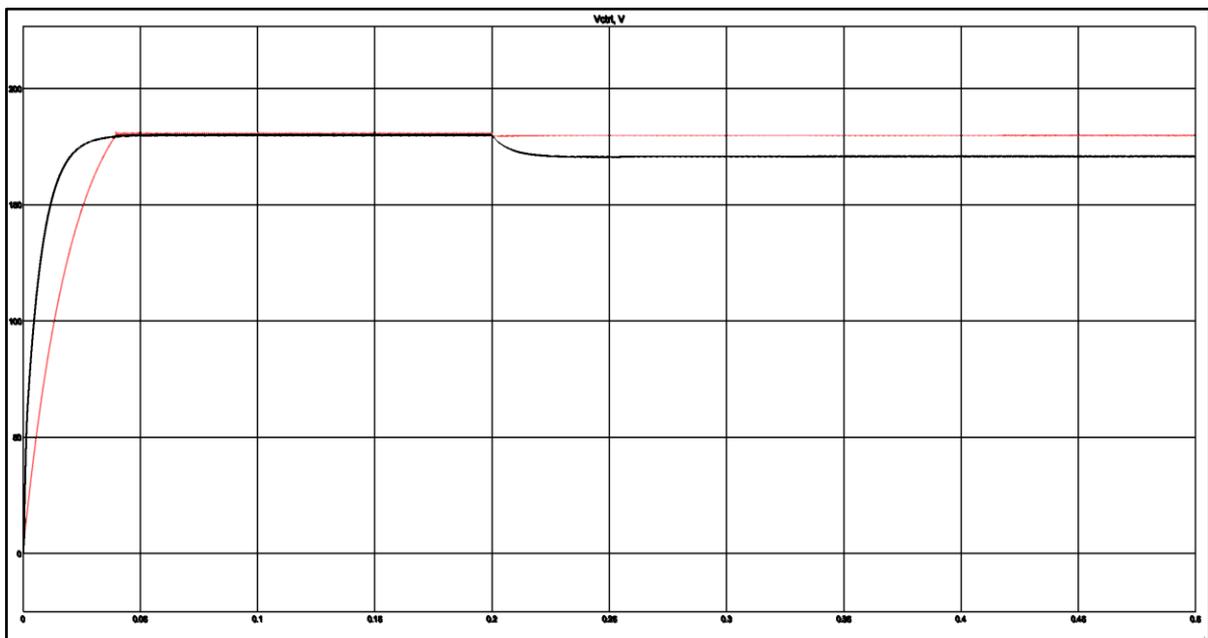
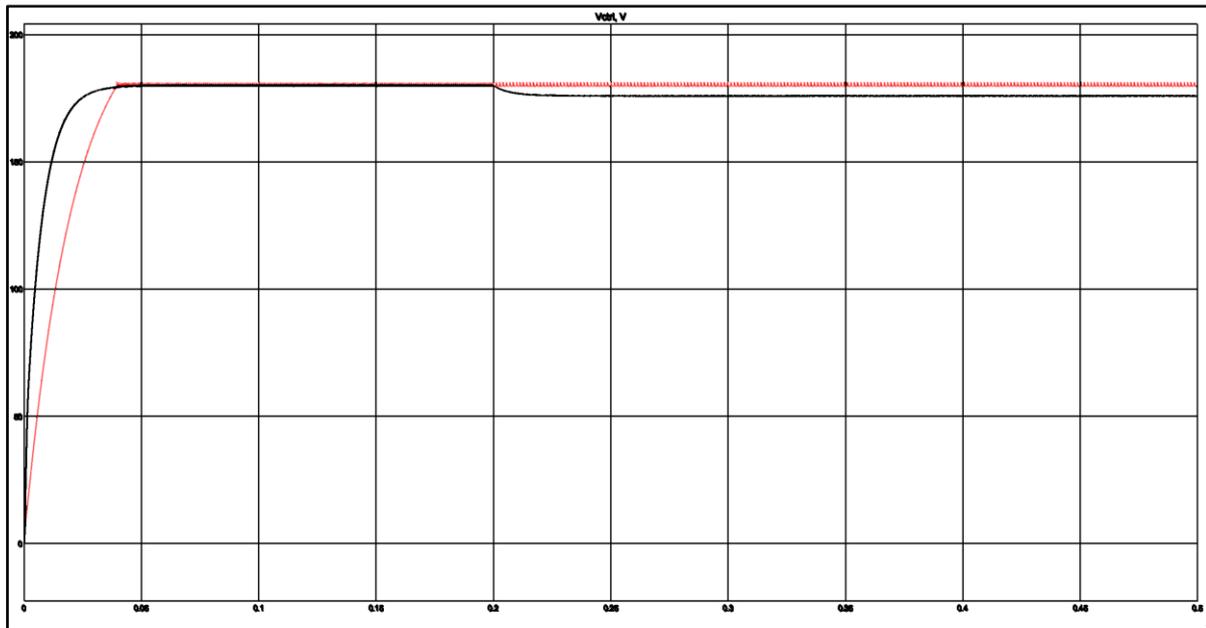


Figura 12

Respuesta del sistema ante cambio en la carga.



4. Discusión

Las señales de voltaje mostradas en la Figura 9 indican que ante un incremento del 15% en la magnitud del voltaje de entrada, el sistema elevador sin control refleja en la salida un incremento de alrededor del 16%. Lo anterior implica que podría dañarse el circuito inversor, cuya entrada es el voltaje mostrado. También es posible observar que cuando el sistema elevador tiene el sistema de control difuso propuesto en este trabajo, la magnitud del voltaje de salida no muestra cambios en su magnitud.

En la Figura 10 se puede observar que ante una disminución del 15% de la magnitud del voltaje de entrada, la magnitud del voltaje de salida decrementa alrededor del 8% para el caso del sistema elevador sin sistema de control. Con el sistema de control difuso, la magnitud del voltaje de salida no presenta cambios, asegurando entonces, que el circuito inversor que convertirá este voltaje en alterno lo lleva a cabo con los valores adecuados para su incorporación en la red eléctrica.

El resultado de la prueba realizada donde se incrementa la corriente de salida, al modificar el valor de la resistencia de carga, se puede ver en la Figura 11. La señal de color negro, que corresponde al sistema sin control, disminuye su magnitud en alrededor del 5%, lo cual no sucede con la señal de color rojo.

La Tabla 3 muestra un resumen de los valores obtenidos, en las pruebas realizadas, respecto al error en estado estable y tiempo de establecimiento de las señales mostradas en las Figuras 9, 10 y 11. Los valores de la tabla indican que el sistema de control difuso logra mantener la magnitud del voltaje de salida del sistema elevador constante ante cambios en el voltaje de entrada y carga.

Tabla 3

Valores de respuesta del sistema elevador.

Parámetro	Error en estado estable		Tiempo Establecido	
	Sin Control	Con control	Sin control	Con control
Incremento Vi	+16%	0%	40 ms	0 ms
Decremento Vi	-8%	0%	40 ms	0 ms
Incremento Io	-5%	0%	40 ms	0 ms

5. Conclusiones

Se muestran las consideraciones y desarrollo de un sistema elevador de voltaje integrado por dos convertidores boost, conectados en cascada. Este tipo de arreglo permite reducir la corriente en los dispositivos semiconductores involucrados en el circuito, así como en los inductores, obteniendo un circuito eficiente, económico y fácil de desarrollar. Se diseñó un sistema de control difuso tipo mamdani para el sistema elevador desarrollado. El controlador decide el valor que deben tener los ciclos de trabajo de los convertidores involucrados, acorde a la diferencia que existe entre la magnitud del valor de referencia o voltaje requerido y el valor del voltaje de salida. Es posible diseñar y desarrollar un sistema de control difuso sin conocer el modelo matemático de la planta, en este caso los convertidores boost en cascada. Los resultados de las simulaciones muestran que el controlador mantiene la magnitud del voltaje de salida en el valor establecido en la referencia, aún ante cambios del 15% en el voltaje de entrada e incrementos del 25% en la corriente demandada al sistema.

6. Referencias

- Adnan, M. F., Oninda, M. A. M., Nishat, M. M., & Islam, N. (2017). Design and simulation of a dc-dc boost converter with pid controller for enhanced performance. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6(09), 27-32.
- Bellinaso, L. V., Figueira, H. H., Basquera, M. F., Vieira, R. P., Gründling, H. A., & Michels, L. (2018). Cascade control with adaptive voltage controller applied to photovoltaic boost converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(2), 1903-1912. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2884904>
- Boujelben, N., Masmoudi, F., Djemel, M., & Derbel, N. (2017, March). Design and comparison of quadratic boost and double cascade boost converters with boost converter. In *2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 245-252. doi: <https://doi.org/10.1109/SSD.2017.8167022>
- Charaabi, A., Barambones, O., Zaidi, A., & Zanzouri, N. (2020, June). A novel two stage controller for a DC-DC boost converter to harvest maximum energy from the PV power generation. *Actuators, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 9(2), 29-47. doi: <https://doi.org/10.3390/act9020029>.
- Chen, Z., Yong, W., & Gao, W. (2014). PI and Sliding Mode Control of a Multi-Input-Multi-Output Boost-Boost Converter. *E-ISSN, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, 9(2014), 87-102.
- Cheng, Z., Li, Z., Li, S., Gao, J., Si, J., Das, H. S., & Dong, W. (2020). A novel cascaded control to improve stability and inertia of parallel buck-boost converters in DC microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, 105950. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105950>
- Doubabi, H., & Salhi, I. (2021). Design and dSPACE Implementation of a Simplified Fuzzy Control of a DC-DC Three-Level Converter. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021. doi: <https://doi.org/10.1155/2021/5593572>.
- El Aroudi, A., Mandal, K., Giaouris, D., Banerjee, S., Abusorrah, A., Al Hindawi, M., & Al-Turki, Y. (2016). Fast-scale stability limits of a two-stage boost power converter. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 44(5), 1127-1141. doi: <https://doi.org/10.1002/cta.2153>

- Elnaghi, B. E., Dessouki, M. E., Abd-Alwahab, M. N., & Elkholy, E. E. (2020). Development and implementation of two-stage boost converter for single-phase inverter without transformer for PV systems. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 10(1), 660-669. doi: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i1>
- Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2007). *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media.
- Ganthia, B. P., Pradhan, R., Das, S., & Ganthia, S. (2017, August). Analytical study of MPPT based PV system using fuzzy logic controller. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, 3266-3269. doi: <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8390063>
- Khosroshahi, A. E., Wang, L., Dadashzadeh, H., Ardi, H., Farakhor, A., & Shotorbani, A. M. (2019). A two-stage coupled-inductor-based cascaded DC-DC converter with a high voltage gain. *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861768>.
- Meena, R. (2014). Simulation study of boost converter with various control techniques. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(9), 74-79.
- Meza, H. A., García, J. L. M., & Mora, S. S. (2018). Estrategias de control mppt aplicadas en un convertidor dc/dc tipo boost para sistemas fotovoltaicos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(30), 102-108. doi: <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2751>
- Murillo-Yarce, D., Munoz, J., & Restrepo, C. (2020, February). Mamdani type PI-fuzzy controller in a boost converter. In *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 487-492. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067257>
- Paipa, C. C., Ramirez, J. C., Trujillo, C. L., Alarcón, J. A., & Jaramillo, A. A. (2020). Diseño de cargador de baterías con baja distorsión armónica de corriente para aplicación en vehículos eléctricos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(4), 706-717. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000400706>
- Passino, K. M., Yurkovich, S., & Reinfrank, M. (1998). *Fuzzy control* (Vol. 42, pp. 15-21). Reading, MA: Addison-wesley.
- Sharma, P., Kumar, P., & Pal, N. (2018). Design and implementation of closed loop controlled boost converter for solar power installation system using fuzzy logic controller. In *2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/RAIT.2018.8389012>
- Tepale, A., Moreno, H., Torres, C., & Hernandez, C. (2015). Fuente de Alto Voltaje para Generación de Plasma en un Reactor Cilíndrico a Temperatura Ambiente y a Presión Atmosférica. *Ideas en Ciencia*. 24(44), 33-41.
- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>