

SINTONIZACIÓN ÓPTIMA DE UN CONTROLADOR PID PARA UN CONVERTIDOR RECORTADOR-ELEVADOR CC-CC UTILIZANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE MANADA DE LOBO GRIS

OPTIMAL PID CONTROLLER TUNNING FOR A BOOST DC-DC CONVERTER USING GREY WOLF OPTIMIZATION ALGORITHM

Jesus Aguila-Leon ^{*1,3}, Cristian Chiñas-Palacios^{1,3}, Carlos Vargas-Salgado^{2,3}, Julián Sotelo¹, Elías Hurtado-Perez^{2,3}, Edith X. M. García¹

¹Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Av. Nuevo Periférico 555, 45425 Tonalá, México.

²Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

³Instituto Universitario de Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

*jesus.aguila@ieee.org

Recibido: octubre 15, 2019 / Aceptado: marzo 7, 2020 / Publicado: noviembre 10, 2020

Resumen. Los convertidores de potencia son dispositivos electrónicos que permiten regular niveles de voltaje y, por lo tanto, sus aplicaciones en el ámbito de las energías renovables son importantes. Una de las principales problemáticas de los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es que deben ser sintonizados correctamente para reducir el error entre la señal de salida y la señal de referencia. En este trabajo se presenta la sintonización de un controlador PID para un convertidor CC-CC tipo recortador-elevador empleando un algoritmo de *Grey Wolf Optimizer* (GWO). El sistema se simula mediante MATLAB/Simulink. Los resultados de la sintonización del controlador PID con el GWO es comparado contra un método clásico de sintonización midiendo el error cuadrático medio y tiempos de respuesta. El desempeño del controlador PID sintonizado a través del GWO mostró tener mejor tiempo de respuesta y menor raíz de error cuadrático medio (RMSE, *root mean square error*) que el controlador sintonizado por el método clásico.

Palabras clave: convertidor elevador, sintonización de PID, optimización, algoritmo de lobo gris, GWO.

Abstract. Power converters are electronic devices that regulate voltage levels and therefore their applications in the field of renewable energies are important. One of the main problems of PID controllers is that they must be tuned correctly to reduce the error between output and reference signal. This work presents the tuning of a PID controller for a DC-DC converter using a GWO Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm. The system is simulated through MATLAB/Simulink. The results of the TUNING of the PID controller with the GWO is compared against a classic tuning method by measuring the mean quadratic error and response times. The performance of the PID controller tuned through the GWO showed better response time and lower root mean square error (RMSE) than the controller tuned by the classic method.

Key Words: boost converter, PID tuning, optimization, grey wolf optimizer, GWO.

1. Introducción

Los controladores PID son ampliamente utilizados en la industria. Un controlador PID trata de reducir el error entre la señal de salida y de referencia, poseen una acción proporcional, integradora y derivativa para reducir dicho error [1]. La sintonización de los controladores puede efectuarse por medio de auto sintonizadores proveídos por los fabricantes de los equipos [2], por métodos clásicos como los métodos de Ziegler-Nichols [3], o por los operadores de manera empírica. Las energías renovables [4] requieren de convertidores de potencia regular niveles de tensión; dichos convertidores requieren de un controlador PID y de su sintonización. De la sintonización del controlador PID dependerá la velocidad de respuesta con que el convertidor de potencia será capaz de regular los niveles de tensión de línea fluctuantes antes condiciones variantes, como por ejemplo los cambios de generación en sistemas fotovoltaicos debido a que, en función de la nubosidad, la irradiación que percibe el panel no es constante. Una respuesta rápida y con poco margen

de error asegurará una mayor calidad de energía a la salida del convertidor. Se han hecho esfuerzos por desarrollar métodos modernos de sintonización de controladores, los autores de [5], [6] presentan métodos de control basados en lógica difusa y redes neuronales, mientras que en [7] se presentan algoritmos de optimización para convertidores de potencia, al igual que en [8]. Dentro de los algoritmos de optimización bio inspirados se encuentra el algoritmo de optimización de lobo gris (GWO, *Grey Wolf Optimizer*) [9], basado en las técnicas de cacería de dichos animales. El algoritmo de GWO ha sido investigado en diversas áreas de la ingeniería, por ejemplo en [10] los autores utilizaron el algoritmo para optimizar los parámetros de un controlador PI para un sistema de control de presión de vapor, mientras que los autores de [11] aplicaron el algoritmo GWO para un sistema de levitación magnética. Para evaluar el desempeño de modelos de sistemas se puede emplear el RMSE, siendo una medida del error existente entre una señal de referencia y la respuesta de un sistema. En el trabajo de [12] los autores emplean un algoritmo de controlador basado en modos deslizantes contra un algoritmo PI comparando su desempeño a través del RMSE, mientras que en [13] se muestra una evaluación de una red neuronal para la reducción de las pérdidas de energía en un convertidor de potencia, comparando diferentes redes neuronales en función del desempeño del sistema empleando el RMSE.

El principal objetivo de este trabajo de investigación es la sintonización de un controlador PID de un convertidor de potencia del tipo recortador-elevador empleando el algoritmo GWO, y comparar los resultados obtenidos con los métodos clásicos de sintonización, como el de respuesta oscilante de Ziegler-Nichols.

2. Metodología

Para la realización de este trabajo primero se desarrolló el modelo de aproximación eléctrica del convertidor de potencia elevador-recortador utilizando MATLAB/Simulink con controlador PID. Luego, se programó el algoritmo del GWO. Para efectos de comparación se sintonizó el sistema por el segundo método de Ziegler-Nichols. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de la metodología seguida.

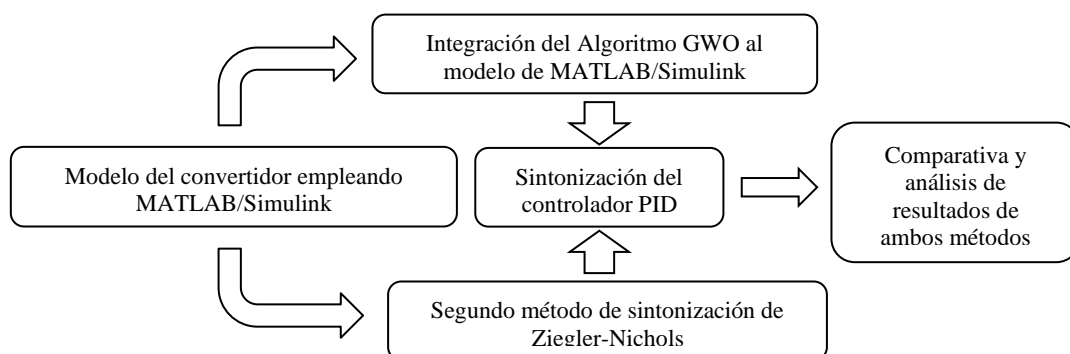


Figura 1. Metodología utilizada para realizar la comparación de cuestionarios

Modelo del convertidor CC-CC recortador-elevador

Un recortador-elevador es un circuito que permite obtener un voltaje de salida superior al voltaje de entrada del circuito [14]. Se realizó el modelo en espacio de estados del convertidor y se simuló en MATLAB/Simulink. En (1) define su modelo en espacio de estados. L, C y R son respectivamente el inductor, el capacitor y la carga del sistema.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-d) \\ (1-d) & -1 \\ C & CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} V_i \tag{1}$$

La Figura 2 muestra el esquema eléctrico del sistema.

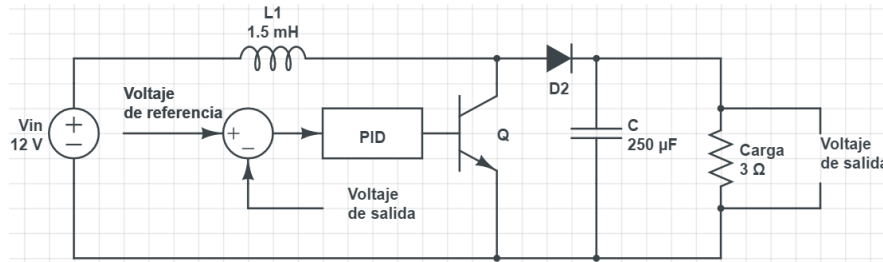


Figura 2. Esquema eléctrico de un convertidor recortador elevador con PID.

Los controladores PID ejercen una acción de control sobre una variable del sistema, llamada variable manipulada, para lograr mantener dentro de ciertos límites de operación deseables a la variable de salida, llamada variable controlada [15]. Los controladores PID evalúan el error $e(t)$ existente entre la señal de salida y una señal de referencia; y en función de cuán grande es ese error efectúan una acción de control con una componente proporcional K_p , integral K_i y derivativa K_d para modificar la señal de salida del sistema mediante una señal de control $c(t)$, según (2), y así reducir el error [16].

$$c(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2}$$

Algoritmo GWO

En el modelo se programa el algoritmo de GWO para la optimización de las constantes K_p , K_i y K_d del controlador. El GWO emplea cuatro tipos de lobo para simular los rangos de jerarquía en las manadas de lobos grises: lobo alfa, beta, delta y omega; la optimización se lleva a cabo mediante el modelado del mecanismo de casa de los lobos, el cual comprende tres etapas principales: búsqueda, acorralamiento y ataque a la presa.

A. Búsqueda

En esta etapa los lobos buscan su presa actualizando su posición con respecto al nivel más alto de la jerarquía de lobos establecida para el espacio de búsqueda, según (3), (4), (5) y (6).

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \tag{3}$$

$$A = 2ar_1 - a \tag{4}$$

$$C = 2r_2 \tag{5}$$

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \tag{6}$$

Donde A y C son vectores de coeficientes, X_p es la posición vectorial de la presa, X es el vector de posición del lobo gris, t es la iteración actual, r_1 y r_2 son valores aleatorios generados entre cero y uno, y a es un vector cuyo valor decrece linealmente.

B. Acorralamiento

Aquellos lobos que obtuvieron mejores resultados son considerados como lobos líderes alfa, beta y delta. Los lobos omegas son los seguidores, los cuales son reorganizados con respecto a los lobos líderes según (7), (8) y (9).

$$X_i(t+1) = \frac{X_{i1} + X_{i2} + X_{i3}}{3} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} X_{i1} &= X_\alpha(t) - A_1 D_\alpha \\ X_{i2} &= X_\beta(t) - A_2 D_\beta \\ X_{i3} &= X_\delta(t) - A_3 D_\delta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 X_\alpha(t) - X_i(t)| \\ D_\beta &= |C_2 X_\beta(t) - X_i(t)| \\ D_\delta &= |C_3 X_\delta(t) - X_i(t)| \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

C. Ataque

El ataque a la presa se da cuando la posición de los lobos, las partículas, se aproximan a su presa, la solución global candidata. Para esto se ha de reducir la distancia entre los lobos y la presa, haciendo un decremento en el vector A de (4) a través del coeficiente a , según (10), siendo T el número máximo de iteraciones.

$$a = 2 - t \left(\frac{2}{T} \right) \quad (10)$$

Segundo método de Ziegler-Nichols

Se basa en encontrar un valor de constante proporcional crítico K_{cr} que origine una oscilación sostenida de la respuesta del sistema. Al tiempo que transcurre entre cresta y cresta de las oscilaciones se le denomina periodo crítico P_{cr} . Conociendo el valor de K_{cr} y de P_{cr} se determinan los valores para las constantes K_p , T_i y T_d del controlador PID sintonizado según la Tabla 1. Donde K_p es la constante proporcional, T_i es el tiempo de integración y T_d es el tiempo de derivación. Los valores de estas constantes modifican la acción de control del controlador, y, por tanto, la estabilidad de la respuesta del sistema.

3. Resultados y Discusiones

Para evaluar el desempeño del sistema con el controlador sintonizado por el algoritmo GWO se ha empleado el RMSE, según (11), el cual evalúa el error a lo largo del tiempo T , expresando el error como

un número, que valora cuán lejos se encuentra la respuesta de un sistema $y(t)$ respecto de una referencia $y(t)_{ref}$.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (y(t)_{ref} - y(t))^2}{T}} \tag{11}$$

Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia y periodo críticos (segundo método)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering. (Prentice Hall, Ed.) (5th ed.). Prentice Hall.

Para la simulación del sistema se emplearon los siguientes valores de $L=1.5mH$, $C=250\mu F$, $R=3\ \Omega$, $V_{entrada}=12V$, $V_{referencia}=24V$; para el GWO se emplearon 12 lobos y 10 iteraciones máximas. La Figura 3a muestra la respuesta del sistema, donde se aprecia un tiempo de asentamiento de 0.14 segundos, y en la Figura 3b se muestra la gráfica de convergencia obtenida por el algoritmo para la minimización del RMSE entre el voltaje de salida y referencia, para 10 iteraciones. Como se observa en la Figura 3(b), el RMSE desciende drásticamente entre la primera y la cuarta iteración del algoritmo, sin embargo, de la cuarta a la novena lo hace más suavemente. Cabe señalar que el RMSE, pese a que a un mayor número de iteraciones tenderá a un valor cada vez más pequeño, su valor nunca será igual a cero. Esto se debe a que la señal de referencia es una consigna de valor invariante en el tiempo, mientras que la respuesta del sistema obedece a no linealidades inherentes al modelado del convertidor de potencia, debido tanto a su diseño como a su funcionamiento.

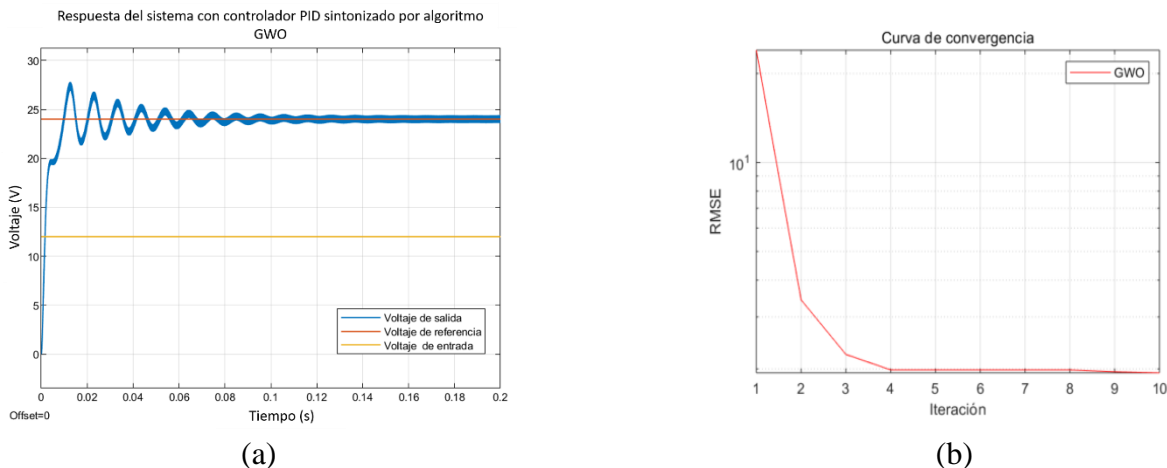


Figura 3. (a) Respuesta del sistema luego de sintonizar el controlador empleando el algoritmo de GWO, (b) curva de convergencia de la optimización.

Para la sintonización por el segundo método de Ziegler-Nichols el valor de la constante proporcional crítica es $K_{cr} = 0.0035$, con la cual se obtuvo la respuesta oscilante. Empleando las reglas de sintonía para el segundo método de Ziegler-Nichols se determinaron los valores de las constantes, siendo $K_p = 0.003500$, $K_i = 0.002706$ y $K_d = 0$. En la Figura 4(a) se muestra la respuesta del sistema con el controlador

sintonizado por el segundo método de Ziegler-Nichols, se aprecia un asentamiento en 0.45 segundos, y en la Figura 4(b) se muestran las oscilaciones sostenidas empleadas para la sintonización del controlador.

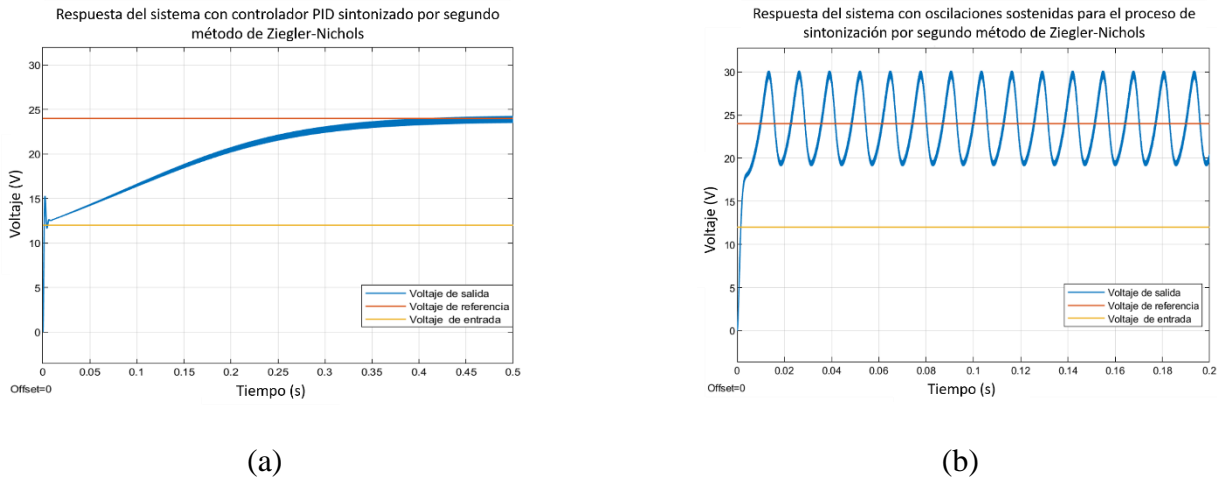


Figura 4. (a) Respuesta del sistema luego de sintonizar el controlador empleando el segundo método de sintonización de Ziegler-Nichols. (b) Respuesta oscilante obtenida para la sintonización por el segundo método de Ziegler-Nichols.

La Tabla 2 compara la respuesta en voltaje de salida del convertidor recortar-elevador obtenida por el algoritmo de GWO propuesto y el método clásico de respuesta oscilante de Ziegler-Nichols. Como se puede apreciar en la Tabla 4 de las comparativas, el método de sintonización basado en el algoritmo GWO tiene un tiempo de respuesta de subida un 87.5% más veloz que el controlador sintonizado por el método clásico de Ziegler-Nichols, por su parte el tiempo de asentamiento es notablemente más corto en el GWO, siendo un 72.22% más rápido que el método clásico, además el método de sintonización de GWO tiene un RMSE de 1.503, contra un 4.7501 del método de Ziegler-Nichols.

Tabla 2. Comparativa de parámetros de respuesta obtenidos por el algoritmo de GWO y el segundo método de Ziegler-Nichols

Método de sintonización	Tiempo de subida [s]	Tiempo de asentamiento [s]	RMSE	K_p	K_i	K_d
Ziegler-Nichols	0.4	0.45	4.7501	0.0016	1.2180	0
GWO	0.05	0.125	1.503	0.0007	8.6352	0

Fuente: elaboración propia.

Normalmente cuando se evalúa el diseño de un controlador PID en la teoría de control se suele emplear el error en estado estable del sistema, especialmente en sistemas de los cuales se conoce su función de transferencia. Emplear el RMSE como función objetivo a minimizar y para evaluar el desempeño de un sistema con controlador sintonizado por medio de algoritmos metaheurísticos tiene por ventaja que, al considerar el error a lo largo de todo el tiempo y no solo durante el estado estable del sistema, se tiende a mejorar también la respuesta transitoria del sistema, ya sea reduciendo el sobre impulso o reduciendo el tiempo de asentamiento. Esto se puede apreciar al comparar la Figura 3(a) y la Figura 4(a), donde el tiempo

de asentamiento es de cerca de 0.15 segundos con el controlador sintonizado por el algoritmo GWO contra los cerca de los 0.5 segundos con el controlador sintonizado por el método de Ziegler- Nichols.

4. Conclusiones

En este trabajo se modeló y simuló un convertidor de potencia CC-CC del tipo recortador elevador, los cuales son de importancia para aplicaciones en energía renovables, al permitir regular niveles de tensión. Se empleó MATLAB/Simulink para validar el sistema. Se propuso como alternativa a los métodos clásicos de sintonización de controladores PID un algoritmo de GWO para encontrar valores óptimos de las constantes K_p , K_i y K_d del controlador, para valores fijos del capacitor e inductor del convertidor. La función objetivo que se consideró fue la minimización del error cuadrático medio, entre los voltajes de referencia y de salida del convertidor. Para comparar el desempeño del sistema con controlador sintonizado por GWO se sintonizó el controlador por el método clásico de la respuesta oscilante de Ziegler-Nichols. Los resultados muestran que el controlador sintonizado por el GWO tiene mejor respuesta en cuanto a tiempo de subida siendo un 87.5% más rápida, un mejor tiempo de asentamiento siendo 72.2% más corto y un error cuadrático medio 68.36% menor en comparación al desempeño del sistema con controlador sintonizado por el método de Ziegler-Nichols.

5. Referencias

- [1] H. Unbehauen, *VOLUME I Control Systems, Robotics, and Automation 1*. .
- [2] J. Berner, K. Soltesz, T. Hägglund, and K. J. Åström, “An experimental comparison of PID autotuners,” *Control Eng. Pract.*, vol. 73, pp. 124–133, Apr. 2018.
- [3] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Prentice Hall, 2010.
- [4] S. Sivakumar, M. J. Sathik, P. S. Manoj, and G. Sundararajan, “An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1475–1485, May 2016.
- [5] R.-J. Wai, M.-W. Chen, and Y.-K. Liu, “Design of Adaptive Control and Fuzzy Neural Network Control for Single-Stage Boost Inverter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5434–5445, Sep. 2015.
- [6] K. Bendaoud *et al.*, “Implementation of fuzzy logic controller (FLC) for DC-DC boost converter using Matlab/Simulink,” *Int. J. Sensors Sens. Networks, Spec. Issue Smart Cities Using a Wirel. Sens. Networks*, vol. 5, no. 5–1, pp. 1–5, 2017.
- [7] S. E. De Leon-Aldaco, H. Calleja, and J. Aguayo Alquicira, “Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 12, pp. 6791–6803, Dec. 2015.
- [8] A. Mamizadeh, N. Genc, and R. Rajabioun, “Optimal Tuning of PI Controller for Boost DC-DC Converters Based on Cuckoo Optimization Algorithm,” *7th Int. IEEE Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2018*, vol. 5, pp. 677–680, 2018.
- [9] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–

61, 2014.

- [10] S.-X. Li and J.-S. Wang, “Dynamic Modeling of Steam Condenser and Design of PI Controller Based on Grey Wolf Optimizer,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–9, Dec. 2015.
- [11] S. Yadav, S. K. Verma, and S. K. Nagar, “Optimized PID Controller for Magnetic Levitation System,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 1, pp. 778–782, Jan. 2016.
- [12] M. Prist *et al.*, “Energy Saving in Industrial Wireless Power Recharge System: Simulation of a PI-Sliding Mode Control for a Non-Inverting Buck-Boost Converter,” *2018 IEEE PELS Work. Emerg. Technol. Wirel. Power Transf. Wow 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [13] S. Balci, K. Sabanci, and M. F. Aslan, “ANN ESTIMATION OF THE SWITCHING LOSSES IN DC-DC BOOST ANN ESTIMATION OF THE SWITCHING LOSSES IN DC-DC,” no. June, 2019.
- [14] R. H. G. Tan and L. Y. H. Hoo, “DC-DC converter modeling and simulation using state space approach,” *2015 IEEE Conf. Energy Convers.*, no. 2, pp. 42–47, 2015.
- [15] R. Hernandez, *Introduccion a los sistemas de control*, 1a ed. México: Pearson, 2010.
- [16] D. Xue, Y. Chen, D. P. Atherton, and G. Gu, *Linear Feedback Control—Analysis and Design with Matlab*, vol. 29, no. 1. 2009.