

Análisis comparativo de modelos de AVR en la Regulación de Tensión del Sistema Eléctrico de Potencia

Comparative Analysis of AVR models in the Voltage Regulation of the Power System

Isaac Natanael Alcivar Heredia¹, Edison Javier Velesaca Zambrano²

RESUMEN:

El control automático del voltaje en la generación eléctrica desempeña un papel crucial en garantizar la estabilidad de los sistemas eléctricos. El propósito de este estudio fue realizar un análisis comparativo de los reguladores automáticos de voltaje, centrándose en modelos teóricos de un sistema básico con estabilizador por retroalimentación y un controlador PID, utilizando la herramienta Matlab-Simulink. Las simulaciones correspondientes se llevaron a cabo para comparar el comportamiento de los distintos modelos de sistemas AVR estudiados. Durante el proceso, se evaluaron los tiempos de respuesta y la capacidad de amortiguación de la señal de salida de cada modelo de AVR en un tiempo estimado para la simulación, con el objetivo de determinar la eficacia de cada sistema en la estabilización de la magnitud de la tensión. En la sección final del documento, se presentaron los resultados obtenidos de los modelos analizados.

Palabras claves: PID, AVR, estabilizador, amortiguar, estabilidad.

Recibido 12 de octubre de 2023; revisión aceptada 20 de febrero de 2024

ABSTRACT:

Automatic Voltage control in electrical generation plays a crucial role in ensuring the stability of electrical systems. The purpose of this study was to conduct a comparative analysis of Automatic Voltage Regulators (AVR), focusing on theoretical models of a basic system with feedback stabilizer and a PID controller, utilizing the Matlab-Simulink tool. Corresponding simulations were executed to compare the behavior of different studied AVR system models. Throughout the process, response times and damping capacity of the output signal for each AVR model were assessed within an estimated simulation time, with the objective of determining the effectiveness of each system in stabilizing voltage magnitude. In the final section of the document, the obtained results from the analyzed models were presented.

Keywords: PID, AVR, stabilizer, damping, stability.

¹ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador, e1314773977@live.uleam.edu.ec

² Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador, e1315337343@live.uleam.edu.ec

1. INTRODUCCIÓN

El control del voltaje en sistemas eléctricos de potencia es crucial para garantizar la estabilidad y eficiencia. La regulación en los generadores síncronos se logra a través de dispositivos como los reguladores automáticos de tensión (AVR). El sistema AVR desempeña un papel crítico al regular el voltaje de salida de un generador eléctrico, asegurando que se mantenga dentro de límites aceptables [1].

Este proceso implica una interacción compleja entre el amplificador, que recibe la señal de referencia; la excitatriz, encargada de modular la excitación del generador; el generador en sí mismo, productor de la energía eléctrica; y el sensor, que proporciona información en tiempo real sobre el estado del sistema. A través de este conjunto coordinado de componentes, el sistema AVR permite ajustar dinámicamente la excitación del generador [2].

La excitatriz de los generadores síncronos puede encontrarse en distintos estados, que son: subexcitados, sobreexcitados y en estado normal, dependiendo del estado de excitación controlado por el AVR. Este dispositivo entregará o absorberá potencia reactiva del sistema según sea necesario [3]. La finalidad de esta investigación es realizar un análisis comparativo de los modelos de Reguladores Automáticos de Voltaje (AVRs, por sus siglas en inglés), con el objetivo de comparar su eficiencia y capacidades de respuesta para optimizar la estabilidad del suministro eléctrico.

2. FUNDAMENTOS

Un AVR es un dispositivo utilizado para mantener la magnitud de la tensión en los terminales de un generador síncrono a un nivel especificado. Cualquier cambio en la tensión de los terminales con respecto al valor deseado se detecta y se utiliza como señal de actuación para controlar la excitación [4]. Un sistema AVR simple consta de cuatro componentes principales, a saber: amplificador, excitador, generador y sensor. Para la modelización matemática y la determinación de las funciones de transferencia de los cuatro componentes, es necesario linealizar estos componentes, teniendo en cuenta las constantes de tiempo principales e ignorando la saturación u otras no linealidades.

2.1. Modelo base del sistema de excitación para generadores síncronos

2.1.1. Modelo Amplificador

El sistema de amplificación de excitación puede ser un amplificador magnético, un amplificador rotativo o un amplificador electrónico moderno. El amplificador se representa por una ganancia K_A y una constante de tiempo τ_A , y la función de transferencia es [5]:

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \quad (1)$$

Donde:

K_A : Ganancia del sistema amplificador, generalmente se encuentra en un rango de 10 – 40.

τ_A : Constante de tiempo del sistema amplificador, se encuentra en un rango de 0.02 a 0.1 segundos.

2.1.2. Modelo Excitatriz

Hay una variedad de diferentes tipos de excitación. Sin embargo, los sistemas de excitación modernos utilizan una fuente de energía de corriente alterna a través de rectificadores de estado sólido como el SCR. La tensión de salida del excitador es una función no lineal de la tensión de campo debido a los efectos de saturación en el circuito magnético [6]. Por lo tanto, no hay una relación simple entre la tensión terminal y la tensión de campo del excitador. Un modelo razonable de un excitador moderno es un modelo linealizado, que tiene en cuenta las principales constantes de tiempo e ignora la saturación u otras no linealidades. En su forma más simple, la función de transferencia de un excitador moderno puede representarse mediante una sola constante de tiempo τ_E y una ganancia K_E .

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (2)$$

La constante de tiempo de los excitadores modernos es muy pequeña. La ganancia K_E , va en un rango de valores de 1 a 10 segundos, mientras que la constante de tiempo τ_E puede tomar valores de 0,4 a 1 segundo.

2.1.3. Modelo Generador

La f.e.m. generada por la máquina síncrona es una función de la curva de magnetización de la máquina, y su tensión en los terminales depende de la carga del generador [7]. En el modelo linealizado, la función de transferencia que relaciona la tensión en los terminales del generador

con su tensión de campo puede representarse mediante una ganancia K_g y una constante de tiempo τ_g , y la función de transferencia es:

$$\frac{V_t(s)}{V_f(s)} = \frac{K_g}{1 + \tau_g s} \quad (3)$$

Estas constantes dependen de la carga: $K_g K_g$ puede variar entre 0.7 y 1; τ_g entre 1 y 2 segundos desde carga completa hasta sin carga.

2.1.4. Modelo Sensor

El voltaje se detecta a través de un transformador de potencial y se rectifica a través de un puente rectificador. El sensor se modela mediante una simple función de transferencia de primer orden, dada por [8]:

$$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s} \quad (4)$$

τ_R es muy pequeño, y se puede asumir un rango de 0.01 a 0.06 segundos.

Utilizar los modelos mencionados da como resultado el diagrama de bloques del AVR mostrado en la Figura 1 el cual es el sistema base.

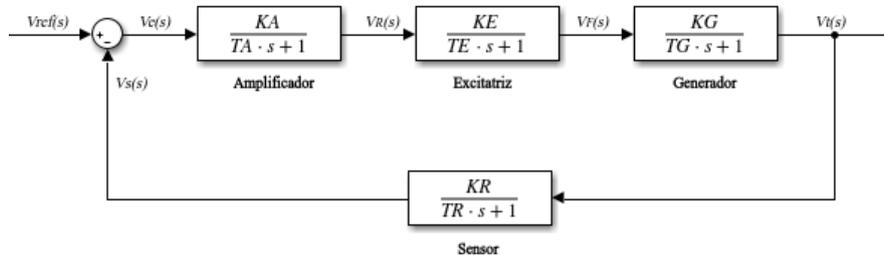


Figura 1. Sistema de excitación base

2.2. Sistema de excitación con Estabilizador

En los sistemas eléctricos de potencia, la presencia de perturbaciones, ya sean de pequeña o gran magnitud, genera oscilaciones de baja frecuencia que pueden tener consecuencias negativas en los alternadores conectados. En algunos casos, estos alternadores pueden perder el sincronismo cuando la inercia inherente o el amortiguamiento del sistema resultan insuficientes [9]. Con el propósito de prevenir tales situaciones, se implementa el Sistema de Estabilización del Poder (PSS, por sus siglas en inglés) en el generador síncrono. Este actúa como un amortiguador artificial que complementa los mecanismos naturales para mantener la máquina en sincronismo [10].

Desde una perspectiva matemática, es posible analizar el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) a través de sus autovalores, construyendo el lugar de las raíces. Si alguno de estos autovalores tiene una parte real positiva, el sistema se considera inestable. La contribución del PSS consiste en desplazar hacia la izquierda los autovalores (hacia valores más negativos en el eje real), mejorando así la estabilidad y reduciendo las sobre oscilaciones [11].

El estabilizador del sistema de potencia se incorpora al sistema de excitación con el fin de introducir un componente de par de amortiguación que esté en fase con las variaciones de la señal de velocidad [12]. El PSS consta de tres bloques. El primer bloque representa la ganancia K_{stab} del PSS. El segundo bloque se refiere al filtro de paso alto, donde T_W es la constante de tiempo. El tercer bloque está relacionado con el circuito de avance de fase necesario para compensar el retardo de fase entre la entrada de excitación y el par eléctrico del generador, siendo T_1 y T_2 las constantes de tiempo correspondientes. En la Figura 2 se puede observar el diagrama de bloques del estabilizador del sistema de potencia [13].

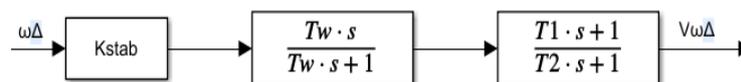


Figura 2. Estabilizador del Sistema de Potencia

En la Figura 3, se puede observar el módulo del estabilizador simplificado, que se implementa junto al modelo base del AVR para obtener una mejor respuesta y amortiguar la oscilación presente en el sistema.

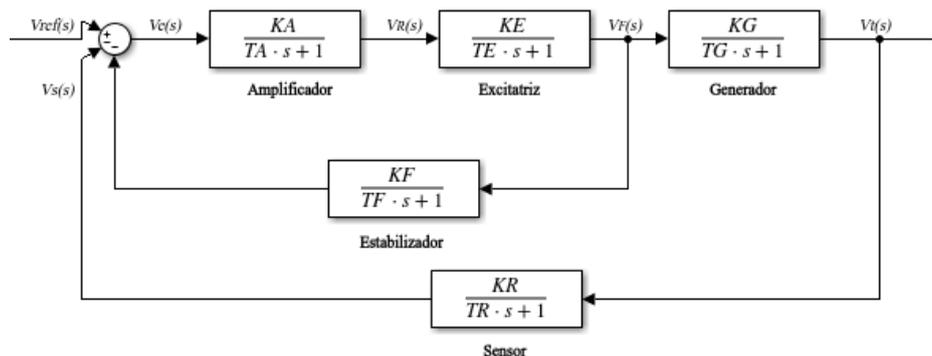


Figura 3. Sistema de excitación con Estabilizador

2.3. Sistema de excitación y control PID

En las últimas décadas, se han experimentado notables avances en las técnicas de control de procesos industriales. El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un mecanismo de control automático diseñado para mantener una variable controlada (la salida del sistema) cerca de un valor deseado [14]. Este tipo de control se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde sistemas industriales y procesos químicos hasta control de temperatura, velocidad de

motores y sistemas de automatización en general. Entre estas opciones, el controlador PID destaca como el más popular debido a su estructura sencilla y su rendimiento robusto en diversas condiciones de operación [15].

Hasta ahora, el controlador analógico PID se utiliza generalmente para el AVR debido a su simplicidad y bajo costo. Sin embargo, ajustar estos parámetros del controlador PID no es una tarea fácil [16]. El modelo del sistema AVR controlado por el controlador PID puede expresarse mediante la Figura 4.

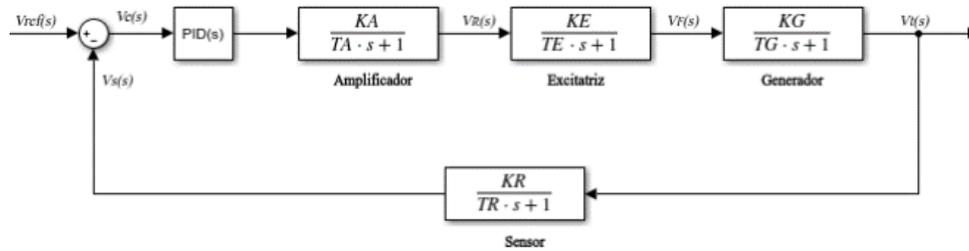


Figura 4. Controlador PID aplicado al sistema de excitación

La función de transferencia del controlador PID es:

$$G_e(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

donde K_p , K_d , y K_i son el coeficiente de proporción, el coeficiente diferencial y el coeficiente integral, respectivamente.

3. METODOLOGÍA

Considerando que el objetivo de este estudio es realizar un análisis comparativo de los modelos de Reguladores Automáticos de Voltaje (AVRs por sus siglas en inglés), con el fin de evaluar su eficiencia y capacidad de respuesta para optimizar la estabilidad del suministro eléctrico, se implementó un diseño experimental utilizando el software Matlab. Este estudio sigue el enfoque metodológico cuantitativo, ya que se analizarán datos influyentes en la generación de energía y se relacionarán modelos y bloques esquemáticos del software.

3.1. Desarrollo

El modelo implementado se puede observar en la Figura 5, consta de tres sistemas de AVR, el primero es el modelo base (amplificador, excitatriz, generador y sensor), el segundo cuenta con un estabilizador por retroalimentación el cual toma la señal de salida del bloque de excitatriz y lo retroalimenta al bloque sumatorio para tener una mejor respuesta de estabilización. Por último, se tiene el sistema implementando un control PID, en el cual se regularon las ganancias

de K_p , K_d , y K_i mediante la herramienta de Simulink para poder tener una respuesta de estabilización satisfactoria, es decir, que el sistema se estabilice en un menor tiempo.

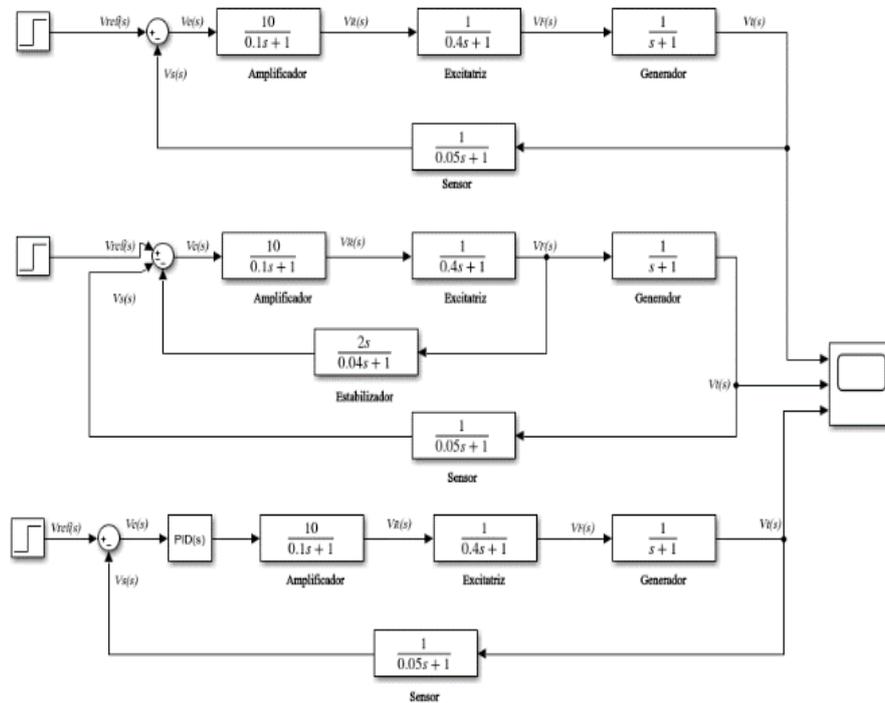


Figura 5. Sistema empleando los controladores para la estabilización del sistema

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se los clasificó en 3 graficas que representan los 3 sistemas descritos anteriormente. En la Figura 6 se puede observar el resultado de la respuesta de estabilización del modelo básico del AVR. La respuesta no es satisfactoria debido a las grandes oscilaciones de voltaje que se producen y tarde mucho tiempo tratando de amortiguar el sistema. Además, en el tiempo de simulación este modelo base no estabiliza el sistema ya que a los 20 segundos aún sigue siendo inestable por este tipo de sistema no es óptimo para la implementación de un AVR.

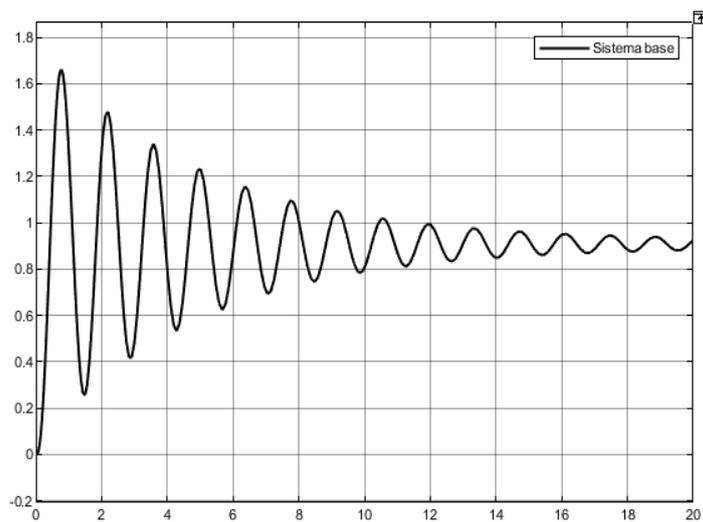


Figura 6. Respuesta de estabilización del sistema básico

En la Figura 7 se muestra la respuesta de estabilización del sistema cuando se añade un bloque de estabilizador retroalimentado, se puede observar como la respuesta es amortiguada en gran medida y a partir de los 9 segundos no existen oscilaciones presentes en la señal, sin embargo, no entrega una respuesta satisfactoria al nivel nominal de voltaje, la magnitud no llega al valor deseado, es decir, que este sistema a pesar de amortiguar la señal de respuesta sigue siendo poco eficaz.

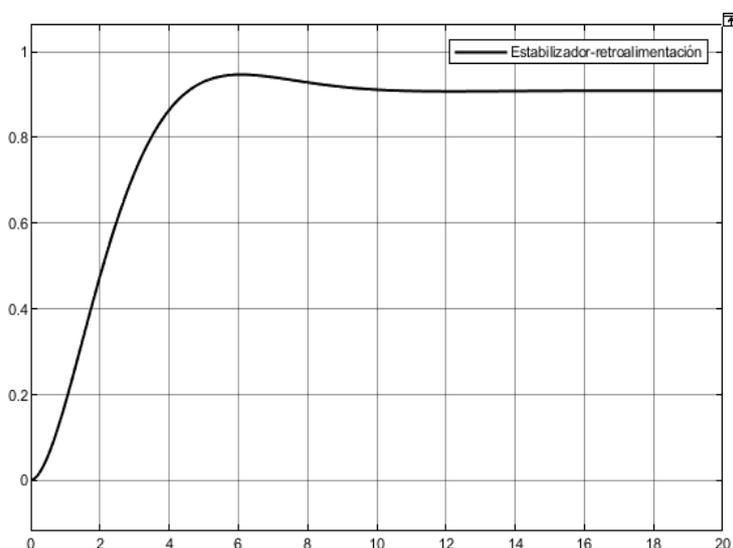


Figura 7. Respuesta de estabilización del sistema con estabilizador-retroalimentación

En la Figura 8 se muestra la señal resultante cuando se implementa al sistema de excitación un controlador PID, se muestra una respuesta satisfactoria debido a que este controlador ayuda a estabilizar el sistema en un menor tiempo, aproximadamente en 1.8 segundos. Además, el módulo del voltaje alcanza el nivel deseado que es 1pu. Por lo tanto, este sistema si es óptimo para implementar ya que estabiliza el voltaje del sistema eléctrico.

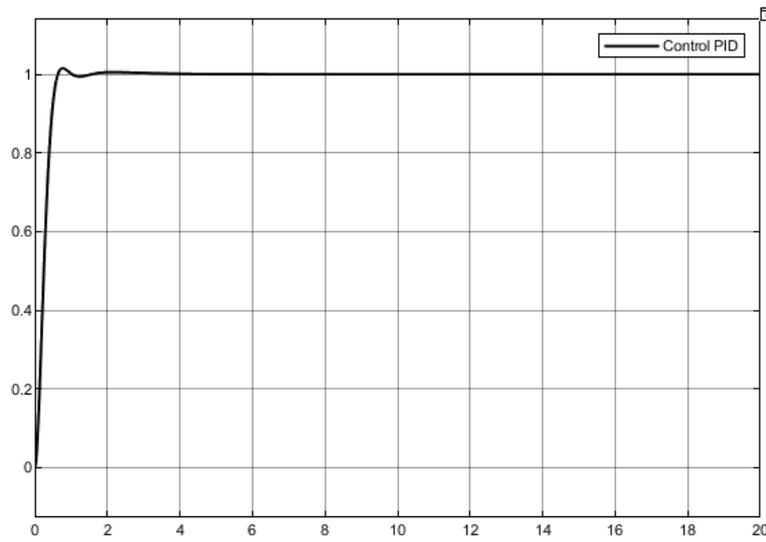


Figura 8. Respuesta de estabilización del sistema con un control PID

En la Figura 9 se puede observar con mayor detalle la diferencia entre los 3 sistemas planteados, observando una clara ventaja del sistema con controlador PID ante el básico y el retroalimentado.

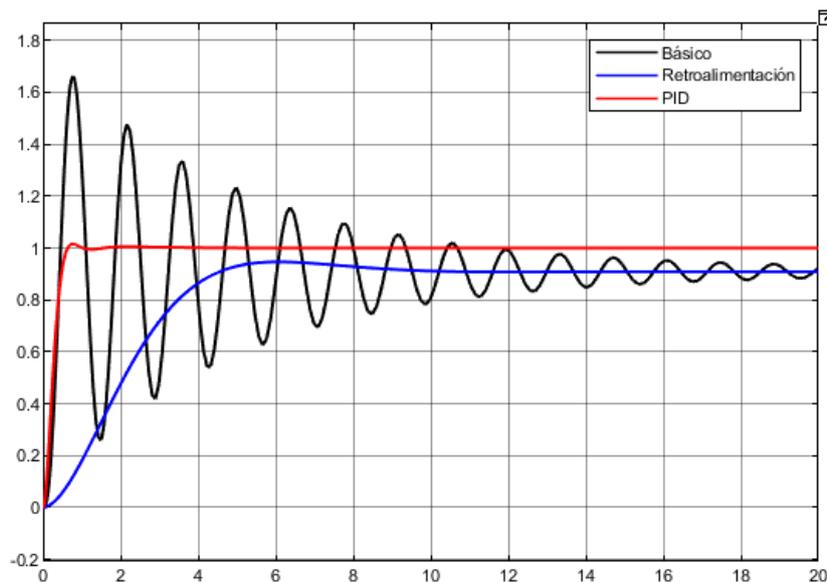


Figura 9. Respuesta de estabilización de los sistemas planteados

5. CONCLUSIONES

En la presente investigación, como resultado de las simulaciones realizadas en el software Matlab-Simulink, se demostró que los modelos de AVR son muy inestables cuando no incorporan un controlador eficiente, ya que no logran una respuesta satisfactoria, como se pudo observar en la Figura 6, donde no existe un controlador que amortigüe la señal de salida, y en la Figura 7, el estabilizador no fue exacto, pero mejoró la señal de salida amortiguando la oscilación presente en el sistema base.

Se evidenció la ventaja clara del sistema de excitación al aplicar un controlador PID, ya que la respuesta de salida fue satisfactoria, estabilizando el sistema en menos de 2 segundos en comparación con el sistema base, que no logra estabilizar el sistema, y el estabilizador con retroalimentación, que tampoco mostró una respuesta óptima, como se puede observar en la Figura 9.

Para concluir, en este artículo se destaca la importancia de un dispositivo AVR que aplique un controlador PID para regular con precisión la señal de salida del sistema en el menor tiempo posible, evitando así largos períodos de inestabilidad en un sistema eléctrico de potencia.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Afzal y T. Padmanabh, «A new control design strategy for automatic voltage regulator in power system,» *ISA Transactions*, vol. 100, 2020.
- [2] B. Kushwah, S. Batool, A. Gill y M. Singh, «ANN and ANFIS techniques for Automatic Voltage Regulation,» *4th International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 2023.
- [3] J. Touqeer, W. Mohd, H. Zohaib, M. Rasid, S. Salman, M. Mehran, K. Ilyas y N. Kottakkaran, «Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, 2020.
- [4] M. Mohd, M. Ahmad, M. Suid y M. Hao, «An Improved Marine Predators Algorithm-Tuned Fractional-Order PID Controller for Automatic Voltage Regulator System,» *Fractal Fract*, vol. 7, 2023.
- [5] I. Khan, A. Alghamdi, T. Jumani, A. Alamgir, A. Awan y A. Khidrani, «Salp Swarm Optimization Algorithm-Based Fractional Order PID Controller for Dynamic Response and Stability Enhancement of an Automatic Voltage Regulator System,» *Electronics*, vol. 8, n° 12, 2019.
- [6] B. Yazdan y G. Hemin, «Automatic voltage regulator design using a modified adaptive optimal approach,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, 2019.
- [7] M. Micev, M. Calasan y D. Oliva, «Design and robustness analysis of an Automatic Voltage Regulator system controller by using Equilibrium Optimizer algorithm,» *Computers & Electrical Engineering*, vol. 89, 2021.

- [8] P. Priyanka y S. Patil, «Automatic Voltage Regulator,» *International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE)*, 2020.
- [9] M. Elsisi, M. Tran, H. Hasanien, R. Turkey, F. Albalawi y S. Ghoneim, «Robust Model Predictive Control Paradigm for Automatic Voltage Regulators against Uncertainty Based on Optimization Algorithms,» vol. 9, n° 22, 2021.
- [10] E. Malcolm y D. Clark, *Automatic Voltage Regulator for an Induction Generator*, HASSELL STREET Press, 2021, p. 268.
- [11] A. Danar, F. Rudy y D. Heru, *Kendali Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Arus Searah Dengan Pengendali Tunggal Dan Kombinasi Pengendal*, Andalas University Press, 2023.
- [12] C. D., C. C. y L. N., «Estabilidad De Voltaje En Redes De Distribución Eléctrica Monofásicas De Medio Voltaje, Aplicando Reguladores Quick Drive Tap En Estado Estable,» *INGENIO*, vol. 4, n° 1, 2021.
- [13] M. Elsisi y M. Soliman, «Optimal design of robust resilient automatic voltage regulators,» *ISA Transactions*, vol. 108, 2021.
- [14] A. Othman, M. I. y M. A., «Comparative Study of AVR Control Systems Considering a Novel Optimized PID-Based Model Reference Fractional Adaptive Controller,» *Energies*, vol. 16, n° 2, 2023.
- [15] S. Mustafa y S. Erdinc, «FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator,» *Computers & Electrical Engineering*, vol. 90, 2021.
- [16] A. Saleh, S. Ahmad, J. Touqeer, K. Ilyas, H. Nawaf y K. Afrasyab, «Optimal design of Fractional order PID controller based Automatic voltage regulator system using gradient-based optimization algorithm,» *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2021.