

REGULACIÓN DE TENSIÓN Y FRECUENCIA MEDIANTE UN CONTROL ADAPTATIVO PARA UN GENERADOR SÍNCRONO EN LA EPIME

VOLTAGE AND FREQUENCY REGULATION THROUGH ADAPTIVE CONTROL FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR IN EPIME

Rousell Dario Montes Apaza^{1*}

¹Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica (EPIME), Universidad Nacional del Altiplano
Puno Av. Floral 1153

RESUMEN

La generación de energía eléctrica es uno de los sectores industriales más grandes y extensos del planeta, en estos últimos tiempos la electricidad se ha tornado muy esencial para la vida moderna, los sistemas de generación convencionales y los sistemas modernos como la generación de energía con recursos de energía renovables, solar fotovoltaicos, eólicas, la conexión de las cargas industriales no lineales y la inserción de la generación distribuida a las redes de electricidad en estos últimos tiempos exigen una mayor regulación de tensión y frecuencia para dotar de electricidad con calidad de energía y confiabilidad. El objetivo de este trabajo de investigación es, la implementación de un sistema control automatizado para la regulación de tensión y control de frecuencia para un generador síncrono. El sistema de control automatizado se implementa en el módulo PLC-S71200 SIEMENS, como planta se utiliza un módulo generador síncrono, también se utiliza un motor de inducción, el cual cumple la función de motor primario, el acoplamiento del sistema es mediante una faja tipo V. La metodología para la implementación del sistema de control, la configuración del controlador, la programación se implanta mediante el interfaz TÍA Portal y la técnica de sintonización inicial y una sintonización fina para el sistema, con estos parámetros del regulador, la ganancia proporcional 5, tiempo de integración 1,27 segundos, y tiempo derivativo 0,1 segundos, para un tiempo de muestreo del algoritmo 0,003 segundos. El sistema controlador ha logrado regular la tensión y controlar la frecuencia para carga resistiva, inductiva y capacitiva.

Palabras Clave: Corriente de excitación, control PID, frecuencia, Generador síncrono, regulación de tensión.

ABSTRACT

The generation of electrical energy is one of the largest and most extensive industrial sectors on the planet, in recent times electricity has become very essential for modern life, conventional generation systems and modern systems such as the generation of energy with natural resources. of renewable energy, solar photovoltaic, wind, the connection of non-linear industrial loads and the insertion of distributed generation into electricity networks in recent times require greater regulation of voltage and frequency to provide electricity with energy quality and reliability. The objective of this research work is the implementation of an automated system for voltage regulation and frequency control for a synchronous generator. The automated control system is implemented in the PLC-S71200 SIEMENS module, a synchronous generator module is used as the plant; an induction motor is also used, which serves as the primary motor, the coupling of the system is by means of a V-type belt. The methodology for the implementation of the control system, controller configuration, programming is implemented using the TÍA Portal interface and the initial tuning technique and a fine tuning for the system, with these controller parameters, proportional gain 5, integration time 1.27 seconds, and derivative time 0.1 seconds, for an algorithm sampling time 0.003 seconds. The controller system has achieved voltage regulation and frequency control for a resistive, inductive, and capacitive loads.

Keywords: Excitation current, PID control, Frequency, Synchronous generator, Voltage regulation

*Autor para correspondencia: rousellmontes@gmail.com

ORCID: [0000-0003-0819-2898](https://orcid.org/0000-0003-0819-2898)

Downloadable from : <http://revistas.unap.edu.pe/epg>

Av. Floral N° 1153, Ciudad Universitaria, Pabellón de la Escuela de Posgrado, tercer piso oficina de Coordinación de investigación. Teléfono (051) 363543



INTRODUCCIÓN

La generación de energía es uno de los sectores industriales más grandes y extensos del planeta, y uno de los más importantes, proveer de electricidad exige invertir en centrales de generación, transmisión y distribución: En estos últimos tiempos, los sistemas modernos de energía renovables pueden proporcionar energía en el punto de consumo en lugar de una fuente central, aun así, la seguridad del suministro requiere un alto nivel de confiabilidad, así como una gestión y planificación (Breeze 2018). De la misma forma, debido a la alta demanda de energía, el sistema de energía eléctrica se actualiza continuamente, no solo con grandes centrales eléctricas, si no con fuentes renovables más pequeñas, esto hace que el sistema sea complejo y propenso a perturbaciones repentinas (Jerković & Mehmedović 2018). Así mismo la intermitencia de fuente de energía renovables y la inercia reducida del sistema pueden afectar además de la desviación de frecuencia, que es una alta tasa de cambio de frecuencia (Masood *et al.* 2020). Por otro lado, adaptarse al nuevo sistema moderno en la industria energética que está conformado de diversas fuentes de generación convencionales y no convencionales, en este sistema con "Amplia interconexión, apertura de igual a igual, baja eficiencia en carbono, seguridad, confiabilidad y complementariedad multi energética" (Xue 2015).

Para Demillon & Leal (2017) la máquina síncrona es importante en la generación está expuesta a variación de carga y perturbaciones, una mayor carga implica mayor demanda de corriente, generando caída de tensión en la salida, lo contrario sucede si se desconecta la carga. Por un lado, Mandali *et al.* (2020) indican que estos sistemas están sujetos a diferentes perturbaciones de carga durante su operación, causando variaciones de voltaje de los niveles requeridos, estas fluctuaciones generan falla en el sistema, entonces un AVR es primordial para mantener estable un sistema de energía. Asimismo Grover *et al.* (2020) hacen el análisis de sensibilidad del sistema de potencia, revelan que el desajuste en la demanda de energía real y la reactiva afecta la frecuencia y el voltaje del sistema, el desajuste se puede minimizar mediante el control de bucle cerrado. Se puede lograr la realimentación utilizando los

siguientes componentes para un sistema de AVR que contiene cuatro componentes indispensables, sensor, transductor, excitador, controlador y generador. El voltaje terminal es detectado por un sensor de voltaje esta señal se compara con la señal de referencia, el voltaje de error obtenido de comparador se amplifica y se utiliza para controlar los devanados del campo magnético del rotor mediante la corriente del excitador.

En este documento se aborda el tema de control de velocidad del motor primario y el regulador de voltaje utilizando el controlador PID Compact para un generador que funciona en forma aislada a pequeña escala: Los mecanismos de regulación automática de tensión (AVR) y control de frecuencia, es importante para garantizar la operación, control y la confiabilidad del sistema de energía (Nahas *et al.* 2019). En funcionamiento independiente cuando se produce una perturbación, hay dos sistemas de control de regulación automática de voltaje y de frecuencia que opera para mantener el sistema estable, depende en gran medida de la velocidad de la turbina, y la corriente de excitación (Pham *et al.* 2017). Una entrada mecánica de la turbina y una entrada eléctrica para un sistema de excitación. La eficiencia y la estabilidad dependen de la fiabilidad del excitador (Ahcene & Bentarzi 2020). Y la estabilidad de frecuencia se puede asociarse directamente con el control de velocidad del rotor del generador síncrono: Esta inestabilidad de frecuencia se resuelve agregando regulador que retroalimenta la velocidad del generador, ajustando la entrada del actuador para seguir la variación de carga. De esta forma, la frecuencia del sistema se mantiene cerca del valor nominal especificado (Bevrani *et al.* 2021). Y el rendimiento dinámico del sistema en diversas condiciones de carga depende de la selección de ganancia de los parámetros del controlador y puede deteriorarse con parámetros no sintonizados (Grover & Bhatti 2020). De la misma forma, proponen la adaptación de los parámetros en línea en función del punto de operación. Este método de inteligencia artificial no requiere conocer el modelo matemático complejo de un generador (Chatterjee *et al.* 2009; Shayeghi *et al.* 2010). Indica que la idea básica del control adaptativo es modificar los parámetros que definen el controlador PID en

tiempo real, depende del comportamiento del proceso en el instante (Londoño & Milena 2005).

Fjarstedt (2019) mediante los anillos colectores conectados a los devanados del rotor y emontes apazamontes apazmontes apazascobillas. Los cepillos de carbón conectados a una fuente externa que controla la corriente de excitación a través de los devanados de campo, lo que permite controlar la máquina. Según Rodríguez (2015), el regulador de excitación actúa para conservar la tensión constante en la salida del estator. Lo que hace este sistema es ir cambiando el valor de la f.e.m. E_o , que es ajustado por medio de la corriente de excitación. Por otro lado para Ledesma (2020) hay diferentes métodos de excitar el inductor del generador síncrono, la corriente continua puede generarse en un módulo estacionario y transmitirse al rotor por medio de sistema de escobillas, utilizando semiconductores, aprovechando su propio campo magnético residual de la máquina. Por lo tanto, un sistema de excitación mantiene la tensión constante en el terminal del generador mediante el uso de AVR, que controla la corriente de campo que alimenta al rotor. Resulta difícil para el sistema regulador controlar el circuito cerrado para mantener la tensión deseado (Jittapramualboon & Assawinchaichote 2017). Entonces es primordial el controlador PID que es apropiado para el AVR que tiene una estructura común, es fácil de implementar, es robusto, tiene una amplia gama de aplicación en la industria (Gaing 2004; Kumar *et al.* 2018; Hernández 2010; Nguyen & Nguyen 2018). Por un lado, En estos reguladores convencionales se pueden emplear con un control con integrador para reducir la desviación de la tensión y frecuencia (Kundur 1994). Así mismo en las evaluaciones realizadas en las industrias ven el control PID como un núcleo indispensable en el sistema de regulación del lazo cerrado y la sintonización como un problema importante (Samad 2017). A pesar de sus características no lineales de muchos procesos físicos, un controlador bien sintonizado ofrece una mejor compensación entre la robustez y rendimiento. En la actualidad el PID disfruta de un uso popular en las industrias (Diaz-Rodriguez *et al.* 2015).

Por otro lado, realizaron numerosas investigaciones para ajustar los parámetros de controlador PID. Entonces, la evolución del

controlador inicia desde el ajuste tradicional de Ziebler Nichols, donde señalan que es importante la experiencia del diseñador para ajustar los parámetros del controlador (Rahimian & Raahemifar 2011). Por un lado el fácil uso y la estructura simple de los controladores PID en la industria (Ang, Chong & Li 2005). Así mismo, el uso generalizado de PID y los inconvenientes de las técnicas de control óptimas hicieron que los investigadores vean la necesidad de combinar esquemas de regulación basados en controladores PID con enfoques de ajuste óptimo (Hote & Jain 2018). Se han investigado ampliamente variedad de técnicas que se han utilizado para mantener la tensión de salida y control de frecuencia en los sistemas de generación. En los últimos años mediante el desarrollo de optimización se puede ver que han propuesto algoritmos de optimización heurística, en controladores PID y su variedad de derivados como el controlador óptimo adaptativo en línea (Batmani & Golpîra 2019), presentaron la teoría de control adaptativo en sistemas de energía eléctrica, También desarrollaron la implementación de algoritmo de control sobre el PLC (Herrera *et al.* 2018), utilizaron un AVR digital para controlar la tensión de salida del generador para buques (Park *et al.* 2009), como también diseñaron un controlador automático de voltaje PID-ANN para el generador síncrono (Salih *et al.* 2019), como el PID del orden fraccionario (FOPID), compararon el rendimiento de generador de inducción autoexcitado y generador síncrono de imanes permanentes, impulsados por primotor de velocidad constante, el objetivo mantener el voltaje y frecuencia constante, para identificar la solución simple, viable y económica en sistemas aislados (Krishna *et al.* 2022).

Por lo tanto, en este trabajo de investigación tiene como objetivo hacer la evaluación de regulación de tensión y control de frecuencia mediante un controlador PID_Compact, para un generador síncrono de polo saliente que funciona en forma aislada en el laboratorio de la EPIME.

MÉTODOS

Ámbito o lugar de estudio

El presente proyecto de investigación se desarrolló en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica (EPIME), que está ubicado en la ciudad de Puno, provincia de Puno, departamento de Puno. Ubicado en la latitud Sur $15^{\circ} 49' 38.8''$ S, longitud Oeste $70^{\circ} 1' 1.3''$ W, Altitud 3821 msnm.

En este proyecto de investigación la población objeto de investigación está conformado por el módulo experimental de regulación de tensión y control de frecuencia de un generador síncrono de 12 polos salientes y todas las pruebas realizado en el laboratorio con diferentes configuraciones de carga, como carga resistiva pura, inductiva y capacitiva.

Descripción de métodos

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, se ha utilizado el método de investigación de tipo aplicativo, se ha realizado bajo el método científico, el cual es un método coherente, sistematizado, estructurado que permite plantear un problema, probarlo, analizarlo y presentar los resultados obtenidos en las pruebas experimentales de la regulación de tensión y control de frecuencia con regulador PID_Compact que contiene el software TIA Portal, donde se ha implementado dicho controlador en la CPU del PLC S71200, de tal modo verificar y analizar el comportamiento del perfil de tensión frente a perturbaciones o cambio de carga resistiva, inductiva y capacitiva. Estas pruebas se realizaron en el prototipo en el laboratorio de automatización de la EPIME.

Descripción detallada de los materiales

Procedimiento inicial del proceso, para la implementación del módulo de regulación de tensión y control de frecuencia se implementa mediante un controlador lógico programable que se adapta el regulador en un sistema generación síncrona, se sigue la siguiente metodología. En esta atapa se describe la metodología desarrollada en la ejecución de esta investigación, especificando los materiales, equipos e instrumentos utilizados en cada etapa del desarrollo metodológico. Se ha utilizado como planta del proceso el generador síncrono de polo saliente, Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200 SIEMENS, con módulos de expansión como módulo de energía para adquirir datos de redes monofásicas y trifásicas hasta 480 voltios de corriente alterna (AC) ENERGY METER SM 1238 SIEMENS, Módulo de expansión analógica SM 1231, de 4 entradas analógicas AI4x13 bits, (2.5, 5, 10) V, (0/4-20) mA, instalación frontal que adapta la señal eléctrica de tensión a la entrada del PLC, Sensor de proximidad, diámetro 18 mm, aprox. 5 mm, Schneider Electric para realimentar la señal de la velocidad del eje del motor primario. Fuente variable (laboratorio) switching 0-30VDC 0-5A de precisión AC/DC para proveer corriente de excitación al bobinado de rotor, variador de frecuencia COMPACT SINAMIXS V20 Siemens se utiliza para controlar el motor primario, Transductor o convertidor analógico Zelio AC/DC que se emplea para adaptar la señal de corriente y tensión a la CPU del PLC, analizador de redes trifásicas CA 8335 QUALI STAR que es para el procesamiento y registro de la señal eléctrica en tiempo real, son los equipos e instrumentos importantes detallados, en la figura 1, se muestra el módulo en funcionamiento en la regulación de tensión y control de frecuencia.



Figura 1. Módulo de sistema de regulación de tensión y frecuencia

Con los ensayos en vacío y cortocircuito se ha encontrado los parámetros experimentales como: resistencia del inducido (R)= $0,55 \Omega$, reactancia síncrona (X_s)= $1,13 \Omega$, tensión inducida (E)= $17,34 \sqrt{17.05^\circ}$, potencia activa (P)= 150 W , potencia reactiva (Q)= 99 VAR , potencia aparente (S)= 180VA , par inducido (τ)= $3,1\text{N.m}$, los parámetros del generador síncrono facilitan para la implementación del sistema de control.

Para implementar la regulación de tensión y control de frecuencia, se ha utilizado el esquema de control de regulador PLC S7-1200 Siemens, la programación se ha realizado en lenguaje Ladder lógico o lenguaje de contactos (KOP) y en diagrama de funciones (FUP), y la monitorización en tiempo real mediante la plataforma Tía portal.

Al utilizar un ordenador portátil como componente de control en línea, permite resolver problemas de regulación y seguimiento de consignas con una mejor relación de funciones de programación, la ventaja de la posibilidad de cambio en la estrategia de control en tiempo real, al modificar algunas instrucciones en el programa, además, el computador laptop puede controlar varios procesos simultáneamente, dependiendo de sus características, se puede realizar a la vez las funciones de procesamiento de datos, supervisión y monitoreo. Por lo tanto, para desarrollar la programación se utilizó el software de TÍA PORTAL v17 del PLC S7-1200 Siemens, que ofrece un entorno muy amigable, que permite programar, editar,

observar la lógica de la programación necesario para controlar, gestionar y configurar los componentes del proyecto, como PLCs. Ofrece dos lenguajes de programación (KOP y FUP) (programación por diagrama de contactos, programación basada en bloques lógicos), que permite desarrollar el programa de control.

La acción del controlador implica un procesamiento interno en la CPU del regulador, que en base a datos de entrada SP recibido por la PV, regula una variable de control CV, para obtener un valor deseado.

Al controlar el potenciómetro de la fuente de tensión de corriente continua, que controla la corriente de excitación por medio de un servomotor DC, que es controlado por modulación de ancho de pulso (PWM), entre dos valores si la corriente es mayor a 0,2 entonces el motor gira hacia la derecha y si el valor real es menor a 1,8 entonces el motor DC gira hacia la izquierda, es forma como regula la corriente de excitación controlado por la salida PWM o encendido digital como se puede ver en la figura 7.

El algoritmo utilizado para la corrida del controlador PID compact ofrece un regulador PID continuo con una optimización integrada, se puede configurar un regulador de impulsos. También se puede elegir entre el modo manual y automático (Siemens 2019). Registra de forma continua el valor real medido dentro de un lazo de regulación y lo compara con la consigna. A partir del error de regulación resultante, la instrucción calcula un valor de

salida, con el que el valor real se iguala con la consigna con la máxima rapidez y estabilidad.

La instrucción PID compact emplea el siguiente algoritmo para calcular el valor de salida de la variable de control CV. El algoritmo PID funciona de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Y = K_p \left[(b.W - X) + \frac{1}{T_i \cdot S} (W - X) + \frac{T_D \cdot S}{a \cdot T_D \cdot S + 1} (C.W - X) \right] \quad (1)$$

Donde:

Y: Valor de salida del algoritmo PID

Kp: Ganancia proporcional

S: Operador laplaciano

b: Ponderación de la acción P

W: Consigna

X: Valor real

Ti: Tiempo de integración

a: Coeficiente para el retardo de la acción derivada (retardo de la acción derivada $T1 = a \times TD$)

TD: Tiempo derivativo

C: Ponderación de la acción D, (Siemens 2019).

La parte derivativa va amortiguada por un e-t, de ahí que su expresión varíe ligeramente respecto al PID ideal. Cada acción (P, I y D), va afectada por sus respectivos coeficientes: Ponderación proporcional(P), tiempo integral (Ti), y tiempo derivativo (Td)(Siemens 2019).

El tiempo de muestreo del algoritmo PID, dado que el sistema regulado necesita cierto tiempo para responder a un cambio del valor de salida, no es razonable calcular este valor en cada ciclo. El tiempo de muestreo del algoritmo PID es el tiempo entre dos cálculos del valor de salida. Este se determina durante la optimización y se redondea a un múltiplo del tiempo de ciclo. Todas las demás funciones de PID_Compact se ejecutan con cada llamada (Siemens 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- a) Diseñar e implementar un sistema de regulación de tensión y frecuencia para un generador síncrono

En seguida se presenta el diseño e implementación de sistema de regulación de

tensión y frecuencia, mediante el uso de transductor de corriente los parámetros de tensión de línea que son adaptados por el microcontrolador, que envían las señales de control para ajustar la corriente de campo. Para Fjarstedt (2019) el rotor de la maquina síncrona que debe estar magnetizado para que su campo magnético este excitado mediante los anillos colectores conectados a los devanados del rotor y escobillas. Los cepillos de carbón conectados a una fuente externa que controla la corriente de excitación a través de los devanados de campo, lo que permite controlar la máquina. Asimismo para Rodríguez (2015), el regulador de excitación actúa para conservar la tensión constante en la salida del estator. Lo que hace este sistema es ir cambiando el valor de la f.e.m. Por otro lado, los parámetros son monitoreados en tiempo real en la computadora mediante la plataforma de TÍA Portal dando robustez al sistema de generación. El motor primario en este sistema aislado simula a la acción que provocaría el caudal del agua en la práctica que impulsaría las paletas de una turbina (Lucero et al. 2017).

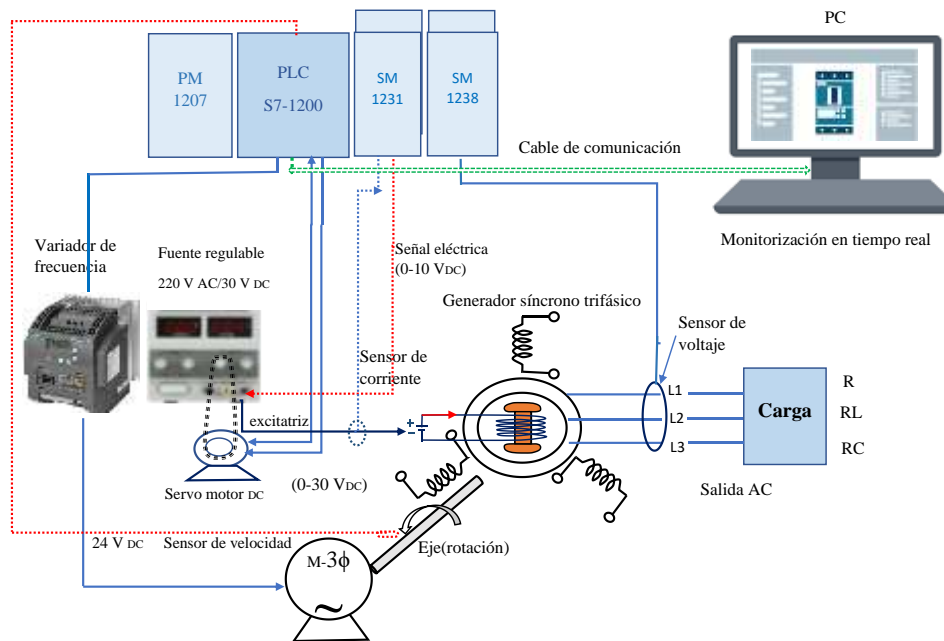


Figura 2. Sistema de regulación de tensión y frecuencia de un generador.

La importancia en este trabajo radica en implantar un controlador más poderoso en un dispositivo comercial PLC que es de dominio de la mayoría de los ingenieros que están en el rubro de la industria control y automatización (Londoño & Milena 2005). Así mismo indican que en este dispositivo electrónico PLC es una necesidad de implantar los algoritmos en el mismo, que sean cada vez más versátiles y útiles para diversas plantas entonces se hace importante (Duque, Lopez, & Navas 2017). Además, este sistema implementado servirá

para la difusión didáctica de las herramientas para la utilización en procesos de entrenamientos para estudiantes y técnicos.

En la tabla se presenta los parámetros del controlador PID para este proceso que contiene el método: autoajuste del controlador PID basado en un margen de fase fijado con anticipación, es de fácil implementación. Esto ocurre cuando es asegurado la identificación de los parámetros en línea y esto de acorde con los cambios producidos en la planta (Vargas 2008).

Tabla 1. Parámetros del controlador PID_Compact en funcionamiento On Line.

Constante	Descripción	Valor
Kp	Ganancia proporcional	5,0
Ti	Tiempo de integración	1,27 s
Td	Tiempo derivativo	0,1 s
a	Coefficiente de retardo derivativo	0,2
b	Ponderación de la acción P	0,8
C	Ponderación de la acción D	0,15
	Tiempo de muestreo algoritmo PID	0,003 s

Nota: En el algoritmo de controlador la representación equivalente es lo siguiente: W=SP: Es el valor de la consigna, X=PV: Es la variable de proceso o el valor real

Es importante resaltar que ante cualquier problema de identificación se tenga el conocimiento a priori del sistema físico debido a que existe una variedad de modelos de identificación de caja negra como, por ejemplo, los modelos lineales y no lineales (Cisneros *et al.* 2010). Por otro lado, un inconveniente en los controladores auto sintonizados es la falta de información del proceso que genera algunas imprecisiones en la salida del sistema cuando se ajusta los parámetros, que depende de las características del proceso puede no ser relevantes (Lozano-Valencia *et al.* 2012). Para sistemas donde no permitan tales imprecisiones, se sugiere otra estrategia de control.

Para Lucero *et al.* (2017) en su artículo de investigación sobre la regulación de voltaje y frecuencia para un generador síncrono encontraron los parámetros de controlador como $K_p= 0,1981$, $K_i= 1,0506$, $K_d= 0,0212$, para el lazo de regulación de frecuencia estos datos difieren de los parámetros registrados en mi trabajo de investigación debido a diversos factores como el número de polos del generador síncrono, el interfaz de control que es diferente en esta investigación entre otros factores influyentes. Por un lado, también para el lazo de control de voltaje registraron los parámetros como $K_p= 0,85578$; $K_i= 5,6421$; $K_d= 0,00068517$, para regular el voltaje en la salida del generador, estos resultados difieren de los parámetros del trabajo de investigación, en conclusión, para cada proceso industrial los parámetros del controlador se aplican solo para el proceso para el cual ha sido sintonizado.

- b) Determinar el control PID de tensión para un generador síncrono.

Para determinar la regulación de tensión en esta investigación se utilizó el control PID_Compact que contiene el PLC S7-1200 Siemens, que se adapta para controlar la tensión de salida del generador síncrono, este sistema funciona en forma aislada. Por un lado, en funcionamiento independiente cuando se produce una perturbación, hay dos sistemas de control de regulación automática de voltaje y de frecuencia que opera para mantener el sistema estable, depende en gran medida de la velocidad del motor primario, y la corriente de excitación (Pham *et al.* 2017). La eficiencia y la estabilidad dependen de la fiabilidad del excitador (Ahcene & Bentarzi 2020). Y el rendimiento dinámico del sistema en diversas condiciones de carga depende de la selección de ganancia de los parámetros del controlador y puede deteriorarse con parámetros no sintonizados (Grover *et al.* 2020). En la tabla 2 se aprecia los valores de tensión en la salida del generador síncrono el valor deseado es 24 voltios en tensión alterna, como variable de proceso es 22,5 voltios que es el valor real registrado por el transductor de tensión, para dichos datos ha registrado una corriente de excitación de 0,89 A que es suministrado desde una fuente de tensión regulable en corriente directa. En este ensayo se han utilizado como carga resistiva tres lámparas incandescentes de 25 vatios. Los valores de los parámetros del controlador PID para estos valores obtenidos se encuentran en la tabla 1.

Tabla 2. Parámetros temporales de tensión registrados en el panel del PLC

Valor deseado	Valor de respuesta
SP: Voltaje AC	24,0
PV: Voltaje AC de la línea	22,50094
Corriente de excitación DC	0,895456

Con los valores fijados como entrada SP y la variable de proceso PV valor resultante del proceso que se visualiza en el panel del interfaz Tía Portal como las que contiene en la tabla 2, para las cargas resistivas, inductivas y capacitivas y con los parámetros del controlador PID de la tabla 1, el controlador hace que la tensión en la salida del generador se mantenga en la tensión fijado en el SP o constante, aun cuando hay variación de carga, perturbaciones. El comportamiento del voltaje para la carga inductivas pura en el punto 1 de la figura 3, se puede observar que dicha carga genera un efecto desmagnetizante, una disminución del

flujo en el entrehierro lo que genera entonces una caída en el inducido, pero a la vez requiere una gran corriente de excitación $I_{exc} = 1.8$ Amperios a 1,9 Amperios variando dentro de estos valores, generando así una caída de tensión en la salida del generador (López *et al.* 2015); como se puede ver los datos detallados del seguimiento de los parámetros de tensión en la figura 3. Entonces para cargas inductiva pura el desfase entre f.e.m. y la corriente es de 90° , ocurre cuando el polo norte del rotor se halla adelantado 90° eléctricos respecto a la máxima f.e.m esto genera una caída en la f.e.m inducida (Fraile 2008).

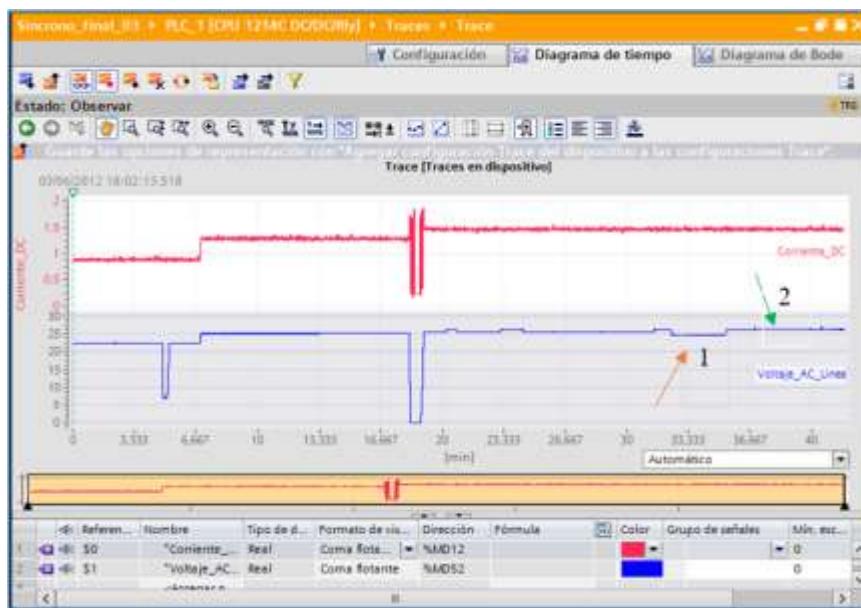


Figura 3. Regulación de tensión de línea AC y control de corriente de excitación.

Para las cargas resistivas de 75 vatios, este solo necesita un pequeño aumento de la corriente de excitación, para mantener la tensión nominal en la salida del generador (López *et al.* 2015).

Para las cargas capacitivas en la gráfica se puede visualizar en el punto 2, se genera un efecto contrario al anterior, significa; Las cargas capacitivas ayudan a las f.e.m de inductor generando un efecto magnetizante en el campo de los polos (Fraile 2008). Entonces adopta ese comportamiento diferente, la corriente de excitación es inversamente proporcional a la

corriente a la salida del estator, solo existe el riesgo de autoexcitación (López *et al.* 2015); para este ensayo se ha se utilizó un capacitor de $4 \mu\text{f}$, de 250 Voltios.

En esta figura 3 se muestra el seguimiento del voltaje en la salida del generador síncrono para las cargas resistivas, inductivas y capacitiva, con los parámetros del controlador de la tabla 1 y el voltaje deseado SP y la variable de proceso de la tabla 2. Estos datos han sido registrados con el analizador de redes trifásicas C.A. 8335 QUALISTAR+.

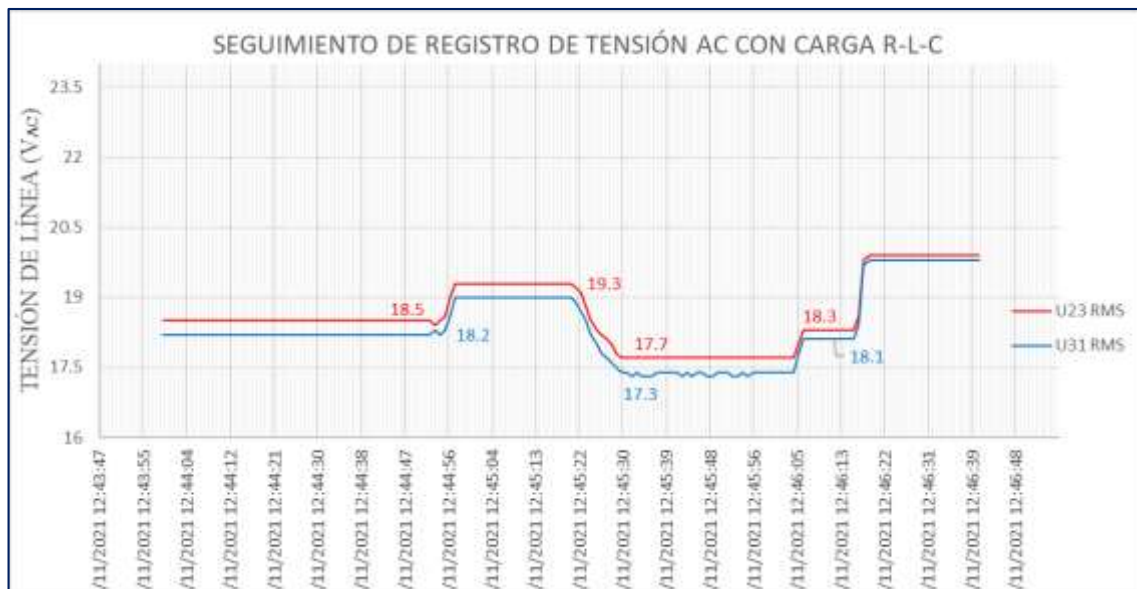


Figura 4 Seguimiento y registro de la variación de tensión para las cargas R-L-C

En la gráfica se observa los parámetros de entrada al controlador para regular el voltaje y la corriente de excitación, la supervisión de los parámetros se visualiza en tiempo real. Como SP de voltaje de línea toma el valor instantáneo de 24 voltios, y como variable de proceso es 22,34 voltios con una frecuencia nominal de 60 Hz. Se puede comprobar que en la figura 3 y 4, el comportamiento de la tensión para la carga resistiva, inductiva y capacitiva tienen el mismo comportamiento habiendo sido registrado la figura 3 en Tía Portal y en figura 4 el seguimiento del mismo proceso en el analizador de redes trifásicas C.A. 8335 QUALISTAR+. Por otro lado indican que una variación en la frecuencia del generador implica una variación considerable del voltaje generado, en cambio sí hay una perturbación en el voltaje no hay variación en la frecuencia (Lucero *et al.* 2017). Entonces el controlador regula al mismo tiempo el voltaje y la frecuencia del sistema en forma óptima.

- c) Determinar y evaluar el sistema de control PID de frecuencia para un generador síncrono.

El sistema del microcontrolador regula a un variador de frecuencia, la frecuencia mecánica del motor primario que está conectado al eje del generador síncrono, para regular la frecuencia

eléctrica del generador, utilizando un PLC con CPU 1214 que se encarga de gestionar y procesar los datos, se utiliza un sensor de proximidad como taco generador, para detectar el número de vueltas que gira el motor primario. Así mismo, controlar la frecuencia del sistema generación a un valor deseado, depende de suministrar al generador una velocidad constante, que se logra controlando la velocidad del motor primario (Lucero *et al.* 2017).

Para la gestión de los bloques de sistema de controlador PID de frecuencia se ha configurado en el microcontrolador PLC S71200 Siemens, en el software Tía portal Siemens, los parámetros se ajustan basado en el error, lo cual se basa en la diferencia entre la salida del sistema y el modelo del proceso, en sistema de lazo cerrado (Siemens AG 2019). El valor deseado de frecuencia en este proceso SP es 60 Hz y al inicio la variable de proceso PV es de 59,93, en la tabla se puede observar que esta variable de proceso llega a 60,08 Hz lo cual indica que el sistema de regulación de frecuencia está regulando a una frecuencia nominal de 60 Hz. A diferentes tipos de perturbaciones, como carga resistiva, inductiva y capacitiva, estos datos se ajustan automáticamente con el control PID compact, configurando antes en modo automático.

Tabla 3. Parámetros temporales de frecuencia

Valor deseado	Valor de respuesta
SP: Frecuencia Eléctrica	60
PV: Frecuencia	60,08614

Una vez configurado en optimización fina en el controlador, en la figura se observa que reconoce al sistema, intenta llegar al valor deseado que es el SP a 60 Hz, en el primer impulso no logra a estabilizar la frecuencia al SP, en el segundo impulso alcanza una

estabilidad de la frecuencia nominal, este comportamiento es a una carga resistiva de 75 vatios. También es necesario resaltar que para cada proceso de control los parámetros del controlador serán diferentes.

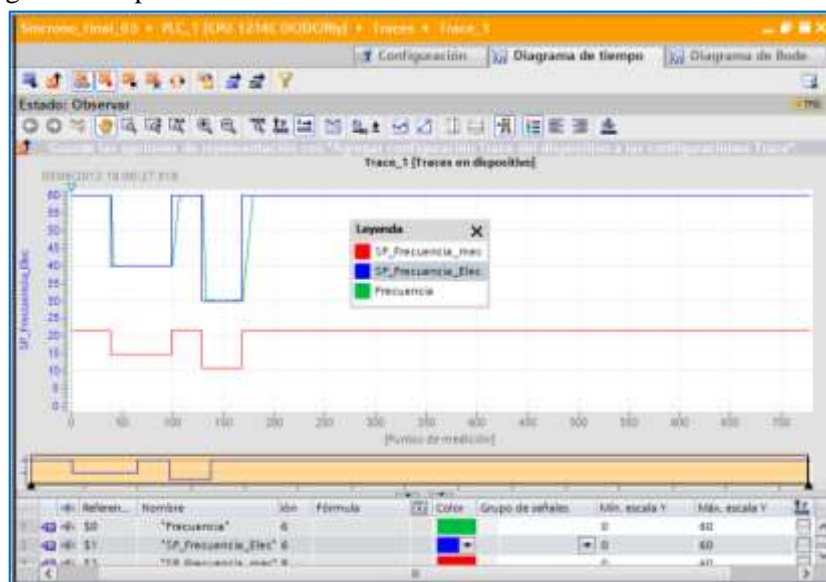


Figura 5. Regulación de frecuencia con una optimización fina

El controlador ya sintonizado anteriormente ya tiene los parámetros almacenados como se puede ver en la Tabla 3, porque es un proceso interno dentro de la CPU del PLC, para la carga resistiva en la figura anterior se puede observar que la frecuencia alcanza el SP en el primer impulso.

En este proceso el tiempo de estabilización es de 10 segundos esto debido al efecto de saturación que causa el actuador en el control de la corriente de excitación o la no linealidad. Por otro lado, Lucero *et al.* (2017) en su investigación indican que el tiempo de estabilización de la planta es aproximadamente

2,5 segundos este lapso de respuesta se considera aceptable ya que el criterio en que se basa el desarrollo del regulador prioriza la precisión.

En este caso el sistema ha trabajado a una carga nominal de 75 vatios y se incrementó la carga escalonada a 300 vatios. Donde se observa que la frecuencia oscila cerca al valor de referencia que es 60 Hz, estabilizándose al valor nominal. Este sistema de controlador PID se encarga de controlar la corriente de excitación, para regular la tensión ante una posible variación de carga, siendo la carga experimental, resistivo, inductivo y capacitivo.

CONCLUSIONES

- Se ha logrado diseñar y la implementación del módulo, también regular la tensión y controlar la frecuencia en un PLC S71200, se realizó las pruebas correspondientes satisfactoriamente, el ensayo en vacío del generador, cortocircuito, con los datos anteriores se pudo obtener las características del generador como la reactancia síncrona $X_s=1,13 \Omega$. También se ha realizado las pruebas del generador funcionando con carga resistiva, carga inductiva y capacitiva. Para este proceso los parámetros del controlador son $K_p=5,0$, $T_i=1,27$ s, $T_D=0,1$ s, estos parámetros son registrados en línea.

- En el módulo de regulación de tensión se ha logrado regular el voltaje, con carga resistiva, con carga inductiva y con carga capacitiva. Para la carga inductiva pura se observa que genera una disminución en el perfil de salida de tensión esto es debido al efecto desmagnetizante en el entre hierro del generador, esto refleja en que se requiere gran corriente de excitación para mantener el voltaje nominal en la salida del generador síncrono. Para la carga capacitiva pura es diferente se genera una sobre tensión en el perfil de tensión, entonces se deduce que las cargas capacitivas tienen el efecto magnetizante en el campo de polos, en este caso la corriente de excitación es inversamente proporcional a la corriente en la salida del generador.

- Se ha logrado instalar, configurar y controlar la frecuencia en línea utilizando el interfaz de TÍA PORTAL que facilita la comunicación y la configuración en tiempo real, se logró también enlazar y sincronizar con el variador de frecuencia para poder controlar la velocidad angular en el eje del motor primario, se ha obtenido una captura de datos iniciales de entrada de datos temporales y respuesta del controlador PID, obteniéndose como SP de la frecuencia igual a 60 que es el valor que el operador al inicio lo configura, resultando como respuesta 60, 08614 que es la variable del proceso, lo que busca el controlador es tratar de igualar al valor de consigna entonces el error sería la diferencia de esos dos valores

$E=0,08614$, es el valor con que ajusta el controlador este valor tendera a cero.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano Puno por acogerme para seguir formándome profesionalmente. También agradecer a la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica Eléctrica con mención en Gestión de Operación y Mantenimiento de Sistemas Eléctricos, por contribuir en mi formación profesional y agradezco a cada uno de los docentes por su dedicación y compartir sus conocimientos.

REFERENCIAS

- Ahcene, Fazia, and Hamid Bentarzi. 2020. "Automatic Voltage Regulator Design Using Particle Swarm Optimization Technique." In *2020 International Conference on Electrical Engineering, ICEE 2020*, 0–5. Algeria. <https://doi.org/10.1109/ICEE49691.2020.9249789>.
- Ang, Kiam Heong, Gregory Chong, and Yun Li. 2005. "PID Control System Analysis, Design, and Technology." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 13 (4): 559–76. <https://doi.org/10.1109/TCST.2005.847331>.
- Batmani, Yazdan, and Hêmin Golpîra. 2019. "Automatic Voltage Regulator Design Using a Modified Adaptive Optimal Approach." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 104 (May 2018): 349–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.001>.
- Bevrani, Hassan, Hêmin Golpîra, Arturo Román Messina, Nikos Hatziargyriou, Federico Milano, and Toshifumi Ise. 2021. "Power System Frequency Control: An Updated Review of Current Solutions and New Challenges." *Electric Power Systems Research* 194 (December 2020).

- <https://doi.org/10.1016/j.ejpsr.2021.107114>.
- Breeze, Paul. 2018. "Hydropower Generators." In *Hydropower*, 47–52. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812906-7.00005-3>.
- Chatterjee, A., V. Mukherjee, and S. P. Ghoshal. 2009. "Velocity Relaxed and Crazyness-Based Swarm Optimized Intelligent PID and PSS Controlled AVR System." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 31 (7–8): 323–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.03.012>.
- Cisneros, M, M Arjona, and F Sellschopp. 2010. "Identificación Paramétrica de Un Generador Síncrono a Partir de La Prueba de Escalón de Voltaje." *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México.*, no. 665–0654: 7.
- Demillon, Rufino, and Huber Leal. 2017. "Revista de Operaciones Tecnológicas Lazos de Control Para Un Regulador Automático de Voltaje (AVR) Revista de Operaciones Tecnológicas." *ECORFAN-Taiwan* 1 (1): 35–48.
- Diaz-Rodriguez, Ivan D., Vilma A. Oliveira, and Shankar P. Bhattacharyya. 2015. "Modern Design of Classical Controllers: Digital PID Controllers." *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* 2015-Sept (5): 1010–15. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2015.7281610>.
- Duque, Arturo, Jesus Lopez, and Andres Navas. 2017. "Sintonización de Un Controlador PID Implementado En Un PLC Haciendo Uso de Inteligencia de Enjambres." *Scielo* 35 Prospect. Vol. 15, No. 1, 15 (1692–8261). <https://doi.org/Doi:http://dx.doi.org/10.15665/rp.v15i1.679>.
- Fjarstedt, Eric. 2019. "Implementation of an Automatic Voltage Regulator for Synchronous Machines on an FPGA." UPPSALA UNIVERSITET. <https://doi.org/ISSN:1654-7616,UPTEC E19013>.
- Fraile, Jesús. 2008. *Máquinas Eléctricas*. edited by s. a. u. mcgraw-hill/interamericana de España. 6ta. Ed. Madrid.
- Gaing, Zwi-Lee. 2004. "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 19 (2): 384–91. <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.821821>.
- Grover, Himanshu, Ashu Verma, and T. S. Bhatti. 2020. "Load Frequency Control & Automatic Voltage Regulation for a Single Area Power System." *PIICON 2020 - 9th IEEE Power India International Conference*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9112902>.
- Hernández, Ricardo. 2010. *Introducción a Los Sistemas de Control: Conceptos, Aplicación y Simulación Con MATLAB*. Pearson Educación de México. 1st ed. Vol. 01.
- Herrera, E, J Garcia, and R Gustabello. 2018. "Implementación de Algoritmos de Control En La Unidad # 1 de La Central Hidroeléctrica Hanabanilla Para La Regulación de Frecuencia Del Sistema Electro-Energético Nacional." *RIELAC XXXIX3* (1815–5928): 14.
- Hote, Yogesh V., and Shivam Jain. 2018. "PID Controller Design for Load Frequency Control: Past, Present and Future Challenges." *IFAC-PapersOnLine* 51 (4): 604–9. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.162>.
- Huang, Xiaotong, Yuquan Liu, Yufeng Liao, Zhouming Jiang, Jibiao He, and Yajun Li. 2018. "Multiple Energy Complementation." *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9346802>.
- Jerković Štil, Vedrana, and Muharem Mehmedović. 2018. "Interconnection and

- Damping Assignment Automatic Voltage Regulator for Synchronous Generators.” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 101 (September 2017): 204–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.03.022>.
- Jittapramualboon, Sajee, and Wudhichai Assawinchaichote. 2017. “Optimization of PID Controller Based on Taguchi Combined Particle Swarm Optimization for AVR System of Synchronous Generator.” *20th International Computer Science and Engineering Conference: Smart Ubiquitous Computing and Knowledge, ICSEC 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICSEC.2016.7859925>.
- Krishna, V.B Murali, V. Sandeep, S.S. Murthy, and Kishore Yadlapati. 2022. “Experimental Investigation on Performance Comparison of Self Excited Induction Generator and Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Scale Renewable Energy Applications.” *Renewable Energy* 195 (August): 431–41. <https://doi.org/10.1016/j.RENENE.2022.06.051>.
- Kumar, Lalitesh, Prawendra kumar, Satyajee, and Deepak Narang. 2018. “Tuning of Fractional Order PI λ D μ Controllers Using Evolutionary Optimization for PID Tuned Synchronous Generator Excitation System.” *IFAC-PapersOnLine* 51 (4): 859–64. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.121>.
- Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. Edited by Neal J. Balu and Mark G. Lauby. McGraw-Hil. New York.
- Ledesma, Pablo. 2020. *Análisis Dinámico y Control de Sistemas Eléctricos*. 1ra. Ed. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Londoño, Pérez, and Sandra Milena. 2005. “Utilización de Una Técnica Adaptativa En El Control de La Excitación de Una Máquina Síncrona.” *Redalyc.Org*, 9.
- López, Evelin, Jorge Oyuela, José López, and Jeison Mayorga. 2015. “Característica de Regulación de Tensión de Un Generador Síncrono.” *Ingeniería Eléctrica Industrial - UNAH*.
- Lozano-Valencia, Leonardo, Luis Rodriguez-Garcia, and Didier Giraldo-Buitrado. 2012. “Diseño, Implementación y Validación de Un Controlador PID Autosintonizado.” *Rev. Tecno Lógicas* 28, no. 0123–7799: 22.
- Lucero, J, J Ñauta, and M Carpio. 2017. “Diseño e Implementación de Un Sistema de Control de Voltaje y Frecuencia de Un Sistema Eléctrico de Potencia a Escala Para La Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca.” *Revista de Ciencia y Tecnología Ingenius*, no. 1390–860X: 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/ing.s.n17.2017.08>.
- Mandali, Anusree, Lili Dong, and Allen Morinec. 2020. “Robust Controller Design for Automatic Voltage Regulation.” *Proceedings of the American Control Conference 2020-July*: 2617–22. <https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147208>.
- Masood, Nahid-Al, Md. N Shazon, Hasin M Ahmed, and Shohana R Deeba. 2020. “Mitigation of Over-Frequency through Optimal Allocation of BESS in a Low-Inertia Power System.” *Energies* . <https://doi.org/10.3390/en13174555>.
- Nahas, Nabil, Mohammed Abouheaf, Adel Sharaf, and Wail Gueaieb. 2019. “A Self-Adjusting Adaptive AVR-LFC Scheme for Synchronous Generators.” *IEEE Transactions on Power Systems* 34 (6): 5073–75. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2920782>.
- Nguyen, Nam Hoai, and Phuoc Doan Nguyen. 2018. “Overshoot and Settling Time Assignment with PID for First-Order and Second-Order Systems.” *IET Control Theory and Applications* 12 (17): 2407–16. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5076>.

- Park, Sang Hoon, Seung Kyung Lee, Su Won Lee, Jae Sung Yu, Sang Seuk Lee, and Chung Yuen Won. 2009. "Output Voltage Control of a Synchronous Generator for Ships Using Compound Type Digital AVR." *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, 417–21. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5352002>.
- Pham, Duy An, Najib Essounbouli, Frederic Noller, and Abdelaziz Hamzaoui. 2017. "Voltage and Frequency Regulation for Wound Rotor Synchronous Generator in Micro Hydro Power Plants with Real-Time Implementation." *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, no. 9781538628478: 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477386>.
- Rahimian, M Sadegh, and Kaamran Raahemifar. 2011. *Optimal PID Controller Design for AVR System Using Particle Swarm Optimization Algorithm. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2011.6030468>.
- Rodríguez, Miguel. 2015. *Máquinas Eléctricas I - G862*. Cantabria.
- Salih, Ashref M., Abdulrahim Th Humod, and Fadhil A. Hasan. 2019. "Optimum Design for PID-ANN Controller for Automatic Voltage Regulator of Synchronous Generator." *4th Scientific International Conference Najaf, SICN 2019*, 74–79. <https://doi.org/10.1109/SICN47020.2019.9019367>.
- Samad, Tariq. 2017. "A Survey on Industry Impact and Challenges Thereof." *IEEE Control Systems*, 2017. <https://doi.org/10.1109/MCS.2016.2621438>.
- Shayeghi, H., H. A. Shayanfar, A. Safari, and R. Aghmasheh. 2010. "A Robust PSSs Design Using PSO in a Multi-Machine Environment." *Energy Conversion and Management* 51 (4): 696–702. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.10.025>.
- Siemens AG. 2019. *Manual de Funciones Regulación PID*. Edited by Siemens.com. Alemania.
- Vargas, Bruno. 2008. "Control PID Autoajustable Basado En Un Margen de Fase Prefijado." *Facultad de Ingeniería Electronica y Electrica. UNMSM Lima*.