



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



TESIS

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

PRESENTADA POR:

ROUSELL DARIO MONTES APAZA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE
SISTEMAS ELÉCTRICOS**

PUNO, PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA

TESIS

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



PRESENTADA POR:

ROUSELL DARIO MONTES APAZA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA CON
MENCIÓN EN GESTIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS
ELÉCTRICOS**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

.....
M.Sc. ARMANDO TITO CRUZ CABRERA

PRIMER MIEMBRO

.....
Dr. MATEO ALEJANDRO SALINAS MENA

SEGUNDO MIEMBRO

.....
M.Sc. HENRY SHUTA LLOCLLA

ASESOR DE TESIS

.....
Dr. LEONIDAS VILCA CALLATA

Puno, 25 de Julio de 2022

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería Mecánica Eléctrica.

TEMA: Regulación de tensión y frecuencia mediante control adaptativo para un generador síncrono en la EPIME.

LÍNEA: Mecánica Eléctrica.



DEDICATORIA

Este trabajo de Tesis va dedicado a mi madre Atanacia Apaza Mamani, con todo amor, gratitud y agradecimiento, por su enseñanza, confianza, amor y gran apoyo para seguir superándome como profesional.

A mis hijas Sthephanny, Dana por ser la razón de mi existencia y a mi esposa Alicia Norma Machaca Condori, porque son el motivo de mi persistir para lograr mis objetivos.

A mi padre Andrés Montes Apaza y mis hermanas, Nancy, Sonia, Dany, Mery, María, Nery y a mis hermanos, Richard, Francisco, quienes me han incentivado para seguir adelante en este proceso de mi formación profesional.

A Moho mi tierra donde he nacido. A Juliaca tierra de mis grandes oportunidades.

Rousell Darío Montes Apaza



AGRADECIMIENTOS

A nuestro señor creador, por darnos vida, por guiar mi camino, por brindarnos la sabiduría, salud. Por enseñarnos en el manual de vida que es la sagrada escritura a vivir con humildad y caminar por la vida lleno de amor y justicia con el prójimo.

Agradezco a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano Puno por acogerme para seguir formándome profesionalmente y culminar mis estudios de Maestría.

Mi agradecimiento a los miembros que conforman el jurado calificador M.Sc. Armando Tito Cruz Cabrera, Dr. Mateo Alejandro Salinas Mena, M.Sc. Henry Chuta Llocella, Dr. Leonidas Vilca Callata, por sus acertadas recomendaciones y apoyo al M.Sc. Jose Manuel Ramos Cutipa, M.Sc. Elmer Rodrigo Aquino Larico por su apoyo, asesoramiento, paciencia y confianza brindado para el desarrollo de este proyecto de investigación motivo de tesis.

Muchas gracias por brindarme parte de su tiempo y conocimiento que compartieron que es muy valioso para mí, a todos los docentes a mis compañeros y amigos de la Maestría.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	2
1.1.1 Generación de energía	2
1.1.1.1 Centrales hidroeléctricas	2
1.1.2 Generador síncrono	3
1.1.2.1 Definición	3
1.1.2.2 Características del generador síncrono	4
1.1.2.3 Características del estator	5
1.1.2.4 Características del rotor	5
1.1.2.5 Generador con polo Saliente	5
1.1.2.6 Generador con polo liso	6
1.1.2.7 Funcionamiento de un alternador	6
1.1.2.8 Características en circuito abierto	8
1.1.2.9 Característica en cortocircuito	9
1.1.2.10 Voltaje interno generado por un generador síncrono	10
1.1.2.11 Circuito trifásico del generador síncrono	11
1.1.2.12 Circuito equivalente monofásico del generador síncrono	12
1.1.2.13 Tipos de conexiones del generador síncrono	13
1.1.2.14 Diagrama fasorial de un generador síncrono	14
1.1.2.15 Potencia suministrada por un generador	14
	iii



1.1.2.16	Esquemas de generador síncrono	16
1.1.3	Sistemas de control	17
1.1.3.1	Variable controlada, variable manipulada	18
1.1.3.2	Sistema de control de lazo abierto	18
1.1.3.3	Sistema de control de lazo cerrado	19
1.1.3.4	Controladores PID	19
1.1.4	Sistema de regulación de tensión del generador síncrono	24
1.1.4.1	Excitación del rotor	24
1.1.4.2	Sistema regulador AVR	26
1.1.4.3	Sistema de regulación de velocidad	26
1.2	Antecedentes	27

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	33
2.2	Enunciados del problema	35
2.2.1	Problema General	35
2.2.2	Problemas específicos	35
2.3	Justificación	35
2.4	Objetivos	36
2.4.1	Objetivo general	36
2.4.2	Objetivos específico	36
2.5	Hipótesis	36
2.5.1	Hipótesis general	36
2.5.2	Hipótesis específicas	36

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Lugar de estudio	37
3.2	Población	37
3.3	Muestra	37
3.4	Métodos de investigación	37
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	38
3.5.1	Diseño y montaje del módulo de generador síncrono	39
3.5.1.1	Controlador Lógico Programable (PLC) S7-1200 Siemens	40



3.5.1.2	Signal Board	41
3.5.1.3	Modulo fuente de alimentación PM 1207, Siemens	42
3.5.1.4	Módulo de entrada analógica SM 1231, Siemens	43
3.5.1.5	Módulo SM 1238 Energy Meter 480VAC	43
3.5.1.6	Variador de frecuencia SIMATIC V20	44
3.5.1.7	Convertidor analógico Zelio AC/DC	45
3.5.1.8	Fuente de variable switching 0-30VDC 0-5A de precisión	46
3.5.1.9	Sensor de proximidad inductivo	47
3.5.1.10	Analizador de redes trifásico	47
3.5.1.11	Motor DC de accionamiento	49
3.5.1.12	Motor primario de accionamiento	49
3.5.1.13	Generador síncrono	50
3.5.1.14	Esquema del generador síncrono	51
3.5.1.15	Prueba en vacío para generador síncrono	51
3.5.1.16	Prueba en cortocircuito para generador síncrono	54
3.5.1.17	Parámetros del generador síncrono	55
3.5.2	Esquema del controlador	55
3.5.2.1	Los algoritmos utilizados para la corrida del control PID Compact que dispone el PLC S71200	59
3.5.3	El sistema de control de frecuencia se desarrolló un esquema	64

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Sistema de regulación de tensión de un generador síncrono	67
4.2	Se determina el sistema control PID de tensión para un generador síncrono	68
4.3	Evaluar el sistema de control de frecuencia de un generador síncrono	71
CONCLUSIONES		74
RECOMENDACIONES		75
BIBLIOGRAFÍA		76
ANEXOS		82



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Equipos utilizados en el proceso de investigación	38
2. Especificaciones técnicas del motor de Inducción.	49
3. Características del generador síncrono	50
4. Prueba de vacío del generador síncrono	53
5. Prueba de cortocircuito del generador síncrono	54
6. Parámetros del generador síncrono	55
7. Parámetros temporales de tensión visualizados en el panel del PLC	68
8. Parámetros temporales de frecuencia	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Máquina Síncrona de Rotor de polos salientes	4
2. Máquinas de polo saliente	6
3. Máquina síncronas de polo liso	6
4. Característica de vacío de un alternador síncrono	9
5. Esquema para ensayo en vacío y cortocircuito del generador	10
6. Característica de cortocircuito de un alternador síncrono	10
7. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico	12
8. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono	12
9. Circuito de un generador conectado en estrella serie	13
10. Circuito equivalente de un generador conectado en delta	13
11. Diagrama fasorial de un generador síncrono con un f.d.p.=1	14
12. Diagrama fasorial de un generador con un f.d.p. en retraso	14
13. Diagrama fasorial de un generador con un f.d.p. en adelanto	14
14. Diagrama fasorial simplificado, resistencia del inducido ≈ 0	16
15. Esquema de Generador Síncrono	17
16. Esquema de sistema de control de temperatura ambiente	18
17. Sistema de control de lazo abierto	18
18. Sistema de control de lazo cerrado	19
19. Distintos tipos de entradas aplicadas a los sistemas de control	19
20. Diagrama de bloque del control proporcional K_p	21
21. Diagrama de bloque del controlador integral	22
22. Diagrama de bloque del controlador PI	22
23. Diagrama de bloque del controlador PD	23
24. Diagrama de bloque del controlador PID	24
25. Un sistema AVR controlado para GS	26
26. Módulo de Sistema de Regulación de Tensión en funcionamiento	40
27. Controlador Lógico Programable S7-1200	41
28. Signal board de entrada analógica	42
29. Módulo de Entradas Analógicas	42
30. Módulo Analógica SM 1231	43
31. SM 1238 Energy Meter 480VAC	44
	vii



32. Variador de Frecuencia Sinamics V20	45
33. Convertidor Analógico Zelio AC/DC	46
34. Fuente de Variable de Precisión	46
35. Sensor de Proximidad Inductivo	47
36. Analizador trifásico modelo Chauvin Arnoux C.A	48
37. Accesorios, sensor de corriente y tensión del analizador trifásico	48
38. Motor DC de 24v DC acondicionado a la fuente DC	49
39. Esquema de Generador Síncrono	51
40. Prueba de vacío del generador síncrono	52
41. Prueba de cortocircuito del generador síncrono	54
42. Esquema de Diseño de Regulador de Tensión	56
43. TÍA Portal v17 Entorno de Programación	57
44. Programación y configuración del regulador PID	57
45. Diagrama de bloque del regulador PID	58
46. Configuración de las E/S del regulador PID en la regulación de tensión	58
47. Muestra esquema de entrada de los parámetros en el algoritmo PID	61
48. Las constantes del controlador PID_Compact funcionando Of Line	63
49. Parámetros del controlador PID_Compact On Line en una optimización fina	64
50. Programación para control de frecuencia eléctrica del generador síncrono	64
51. La frecuencia del variador es configurada a 20 Hz en el Interfaz TÍA Portal	65
52. Frecuencia en la salida del Generador Síncrono es de 60.08 Hz	65
53. La frecuencia en la salida del generador síncrono a una frecuencia de 59.91 Hz	66
54. Regulación de frecuencia a 60 Hz en la salida del generador síncrono	66
55. Sistema de regulación de tensión y frecuencia de un generador síncrono	67
56. Regulación de tensión de línea AC y control de corriente de excitación	68
57. Perfil de tensión en la salida del generador en vacío con carga resistiva 75 W	69
58. Perfil de tensión en el estator del generador con carga resistiva 75 W	69
59. Registro de la variación de tensión para las cargas R-L-C	70
60. Parámetros de entrada al controlador PID Compact	70
61. Regulación de frecuencia con una optimización fina para una carga de 75 W	72
62. Respuesta al escalón del controlador PID para una carga de 300 W	72



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Sistema de generación síncrono y el motor primario	82
2. Módulo de control PLC S71200 para implementar el PID y el variador	82
3. Módulo de regulación en la etapa de acondicionamiento de componentes	83
4. Configurado y cableado de circuito para el ensayo	83
5. Módulo de control terminado en operación	84
6. Monitorización en línea de la regulación de tensión y frecuencia	84
7. Servomotor que regula la corriente de excitación	85
8. Analizador de red y sus accesorios como sensor de corriente y tensión	85
9. Pinza amperímetro Fluke para la toma de medición de la corriente y tensión	86
10. Registro y visualización en línea de la tensión y corriente	86
11. Perfil de tensión regulado y la corriente de excitación	87
12. Datos registrados en tiempo real de la regulación de tensión y frecuencia	87
13. Tensión en la salida del generador registrado por el analizador	88
14. Importación de los datos registrados en el analizador al formato Excel	88
15. Datos registrados en el analizador de la tensión RMS en la salida	89
16. Parámetro de ajuste del PID_Compact funcionando OF Line	90
17. Parámetros de ajuste del PID_Compact funcionando ON Line	90



RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación es la implementación de un sistema 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 TIA 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: Control PID, corriente de excitación, frecuencia, generador síncrono, regulación de tensión.



ABSTRACT

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, frequency, PID control, synchronous generator, voltage regulation

INTRODUCCIÓN

La presente investigación consiste en la regulación de tensión y frecuencia para un generador síncrono en el laboratorio de la EPIME, la importancia que tiene la regulación de voltaje en los sistemas de generación, por la inserción de las fuentes de energías renovables, las cargas no lineales que se conectan en estos últimos tiempos, la superpoblación en las ciudades demanda más energía de calidad, confiable. En este trabajo, primeramente, se redacta un marco teórico que aborda temas sobre regulación de voltaje y frecuencia para generador síncrono mediante un control proporcional integral derivativo (PID), desarrollando también la revisión literaria de las investigaciones en el ámbito internacional, nacional y local. En seguida se detalla el problema de investigación referente a la regulación de voltaje y frecuencia en los sistemas de generación de energía. Para después continuar con la metodología de la investigación, materiales utilizados para la implementación del módulo de control utilizando un microcontrolador lógico programable (PLC), para el control de este proceso con lazo realimentado, utilizando los algoritmos de PID como estrategia de control. Para implementar este sistema de control se utiliza un PLC S71200 Siemens, mediante la plataforma de Tía Portal V17 de Siemens, para la comunicación de PLC y computador portátil se realiza mediante el cable de ethernet para poder monitorizar en línea el proceso y supervisar las variables.

Con los datos obtenidos de los resultados de ensayos realizados en el laboratorio se implementa el modelo, implantando un sistema de control PID compact, para configurar los parámetros de control, el ajuste del controlador es automático en PID tuning, logrando obtener el comportamiento del perfil de voltaje y la corriente de excitación en el panel de visualización de Tía Portal, bajo diferentes esquemas de perturbación, con carga resistiva, carga inductiva y capacitiva.

CAPÍTULO I REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1 Generación de energía

La generación de energía es uno de los sectores industriales más grandes y extensos del planeta, y uno de los más importantes. Un suministro de electricidad se ha tornado muy esencial para la vida moderna, y su progreso económico de una nación a menudo se puede medir por el nivel de acceso de su población a la energía eléctrica. La provisión de ese acceso requiere inversión en centrales de generación, transmisión y distribución para llevar electricidad a los consumidores. 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 interconexión, así como una gestión y planificación (Breeze, 2017). Adaptarse al nuevo sistema moderno de la industria energética que está compuesto de diversas fuentes de generación convencionales y de recursos renovables, de un sistema con "Amplia interconexión, apertura de igual a igual, baja eficiencia en carbono, seguridad y confiabilidad, complementariedad multi energética" (Xue, 2015) citado por (Huang et al., 2018).

1.1.1.1 Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas, son un conjunto de equipos electromecánicos, grandes instalaciones de producción continua de energía eléctrica, donde se aprovechan la energía potencial del agua en electricidad:

En este sistema de centrales de generación, la energía es producida por el agua que mueve a la turbina que impulsa al generador. La energía producida depende de la altura al depósito del agua. La turbina de esta máquina tiene una velocidad lenta de 100 a 250 revoluciones por minuto(rpm). Generando electricidad a poco tiempo de funcionar, lo que es ventajoso para suministrar cargas máximas (Atwa, 2019). Por otro lado, esta estructura de generadores de polos salientes, se adaptan mejor a los generadores hidroeléctricos, que tienen baja velocidad y multipolares, como la mayoría de las máquinas síncronas.

1.1.2 Generador síncrono

En esta sección se describirá, la estructura interna del generador síncrono su clasificación, funcionamiento, los modelos utilizados para representar el generador eléctrico, teniendo en cuenta el funcionamiento en estado estacionario(vacío) o dinámico (operación nominal).

1.1.2.1 Definición

El inventor Werner, en 1867, lo nombro maquinas dinamo eléctrico. Pronto lo llamaron dinamo, que entrega corriente continua (CC) a partir de la rotación mecánica. Posteriormente diseñaron maquinas que podían suministrar corriente alterna (CA), facilitando en su distribución a grandes distancias. A estos dispositivos inicialmente lo llamaban alternadores, hoy en día generalmente lo llaman generadores (Breeze, 2018). Actualmente los generadores síncronos se ubican en el primer eslabón de la cadena energética, convirtiendo diferentes fuentes de energía en energía eléctrica, una energía fácilmente transportable y capaz de ser convertida en todas las formas de energía: Es una máquina eléctrica rotativa capaz de convertir la energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna(CA) (Chapman, 2012). Está compuesto de una parte móvil llamado rotor y de una parte fija o estator, que está en movimiento relativo (Murty, 2017).

Girando a una velocidad sincrónica con la red. El devanado del inductor, con polos salientes actúa como electroimán con fuente externa a través de anillos deslizantes. Existe de diferentes números de polos para cambiar la relación de entre la frecuencia eléctrica y mecánica (Fjarstedt, 2019).

$$n_m = \frac{120 * f_e}{P} \quad (1)$$

Donde:

f_e : Frecuencia eléctrica en Hz.

P: Numero de polos.

n_m : Velocidad mecánica de campo giratorio magnético del rotor en revoluciones por minuto(rpm).

f_m : $n_m/60$, frecuencia mecánica en revoluciones por segundos(rps)

El rotor del generador síncrono puede tener diferentes números de polos para cambiar la relación entre la f_e y la f_m .

$$f_e = \frac{P}{2} f_m \quad \text{en (Hz)} \quad (2)$$

1.1.2.2 Características del generador síncrono

Las características de los generadores síncronos se pueden describir según la construcción del estator y del rotor.



Figura 1. Máquina Síncrona de Rotor de polos salientes
Fuente: Morejón & Pérez (2015)

1.1.2.3 Características del estator

El núcleo de chapas está formado de material ferromagnético, estas juntas constituyendo un paquete, mediante una serie de pernos. También están aisladas entre sí para evitar las pérdidas por efecto de joule, que se traduce en calentamiento del núcleo de hierro que están sometidos a campos magnéticos de corriente alterna. Tienen ranuras donde se alojan los cables de cobre aislados del inducido, para aislar se colocan con cartón aislante, abiertos.

El inducido de un generador sincrónico es muy parecido al estator de una máquina de inducción. Los circuitos de corriente en el lado del estator tienen tres partes separadas llamadas devanados de fase del estator o fases del estator. Cada fase se obtiene conectando un número de vueltas en serie. Los conductores relevantes se distribuyen a lo largo de la circunferencia de la máquina y se colocan en las ranuras. Las ranuras del estator están talladas en el lado interior del circuito magnético del estator, mirando hacia el entrehierro.

1.1.2.4 Características del rotor

El rotor en las máquinas síncronas es un electroimán o un imán permanente. La posición del flujo del rotor se define únicamente por la posición del inductor. En condición nominal de operación, el inductor gira sincrónicamente con el campo del inducido. El par electromagnético es proporcional al producto vectorial de los vectores de flujo del inducido y del inductor. La rotación sincrónica del rotor es la razón por la que este tipo de máquinas eléctricas se denominan máquinas síncronas (Vukosavic, 2013).

El inductor o rueda polar, se suele construir de una pieza para las máquinas de reducido número de polos o de un núcleo central macizo, al que se fijan las masas polares, en las máquinas multipolares.

1.1.2.5 Generador con polo Saliente

Las máquinas síncronas de polo saliente, tienen de dos polos hasta más de cuatro polos y son de baja velocidad. Utilizan como alternadores para acoplar en las turbinas hidráulicas (Rodríguez, 2015). Por otro lado, las fuerzas de aceleración son bajas, se puede realizar polos simples con bobinas de excitación concéntricas.

Tienen un diámetro grande y una longitud axial corta, con este tipo de diseño el entrehierro no es constante en la circunferencia del rotor, es decir la reluctancia magnética varía dentro de la circunferencia (Gerling, 2015).

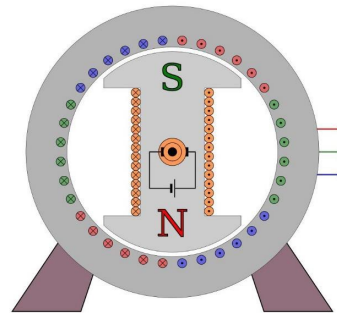


Figura 2. Máquinas de polo saliente
Fuente: Rodríguez (2015)

1.1.2.6 Generador con polo liso

Los generadores de polo cilíndrico tienen pocos polos de dos a cuatro polos y desarrollan altas velocidades. Funcionando como alternador se usan para acoplar a las turbinas térmicas. Tiene el diámetro de rotor pequeño, son de eje horizontal (Rodríguez, 2015).

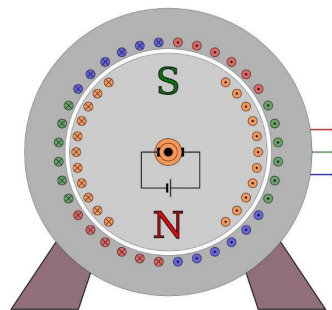


Figura 3. Máquina síncrona de polo liso
Fuente: Rodríguez (2015)

1.1.2.7 Funcionamiento de un alternador

La máquina síncrona funciona como generador de CA, cuando un motor primario impulsa al rotor y con él gira el campo magnético inductor. El campo magnético es generado por inyectar corriente continua, visto desde el inductor es un campo que no se mueve. Cuando gira el rotor las fases del inducido ven un campo magnético móvil. Entonces estas fases están sometidos a un flujo variable en el

tiempo y se inducen en ellas fuerzas electromotrices alternas (Rodríguez, 2015, p. 6).

Una bobina gira en un campo magnético generado por un imán permanente con polo norte y sur, la corriente que se genera es CA que está variando a lo largo de un ciclo de 360 grados por cada rotación completa. En un generador el rotor es similar un electroimán que produce dos polos magnéticos. A nivel mundial la frecuencia estándar para suministrar energía alterna a la red es 50 Hz o 60 Hz. Para generar energía a esta frecuencia con un rotor de dos polos, el rotor del generador debe girar a 3000 rpm (50 Hz) y a 3600 rpm (60 Hz) (Breeze, 2018)

El rotor consta de un devanado envuelto alrededor de un cuerpo de acero. Se hace circular una corriente de campo en el devanado del inductor, generando un campo magnético en el inductor, al girar a una velocidad constante, los devanados trifásicos del estator experimentan un campo magnético que varía periódicamente. Por lo tanto, las fem se inducen a través de estos devanados de acuerdo con la ley de Faraday. Estas fem son AC y periódicas; cada período corresponde a una revolución del rotor. Los devanados se desplazan por igual en el espacio entre sí 120 grados, sus formas de onda fem se desplazan en el tiempo $1/3$ de un periodo.

La frecuencia mecánica de rotación está estrechamente vinculado a la frecuencia eléctrica de la red, el principio de funcionamiento es excitar el flujo del inductor de campo.

El rotor gira recibiendo un torque externo. Este rotor tiene acoplada una fuente de corriente continua de excitación independiente variable que genera un flujo constante, pero que al estar acoplada rotor, crea un campo magnético giratorio (por el teorema de Ferraris) que genera un sistema trifásico de fuerzas electromotrices en los devanados estáticos, (Aller, 2008) citado por (Santos & Navas, 2017).

El voltaje inducido en el rotor está determinado por varios parámetros, pero la variable de peso es la corriente de bobinado del rotor o la excitatriz. La tensión en el inducido es proporcional a la corriente, esto ocurre a través de los devanados del rotor y esto facilita para construir un regulador de voltaje automático.

Por esto se entiende que regular la velocidad del motor primario que impulsa al generador afecta directamente sobre el valor de frecuencia obtenida. Análogamente, si los r.p.m. aumenta también la frecuencia aumentara.

1.1.2.8 Características en circuito abierto

Las características de una maquina síncrona se determina mediante las pruebas que de detallan abajo:

Para el circuito en vacío: En el estator la corriente de carga es cero, la maquina síncrona es impulsada a su velocidad nominal por un motor primario de menor potencia nominal. Se mide la tensión en vacío del estator, la f.e.m. por fase o línea E_o y la corriente de excitación. La corriente de campo se eleva hasta un valor I_f máximo correspondiente a un 120% hasta 250% de la tensión nominal V_{1r} a la frecuencia nominal (Boldea, 2016). Por otro lado, el ensayo, en vacío representa la curva de voltaje de salida de armadura. También indica la relación que hay entre la componente fundamental del flujo del entrehierro y la f.e.m. que actúa sobre el circuito magnético del inducido de campo (Fitzgerald et al., 2003).

$$I = 0 \rightarrow E_o = V(\text{vacío}) \quad (3)$$

La f.e.m. E_o toma el valor de voltaje en terminales de la maquina cuando es cero la corriente del inducido.

La curva de vacío en un generador síncrono, está en función:

$$E_o = f(I_e) \quad (4)$$

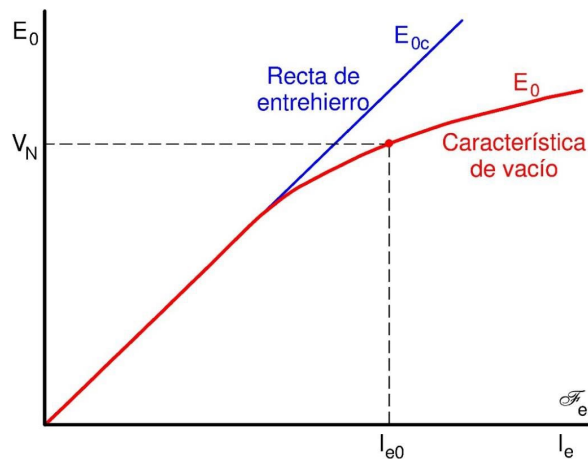


Figura 4. Característica de vacío de un alternador síncrono
Fuente: Rodríguez (2015)

1.1.2.9 Característica en cortocircuito

La curva de saturación de cortocircuito se obtiene impulsando el SG excitado a la velocidad nominal "n" con terminales del estator en cortocircuito. La corriente CC de campo I_f se varía hacia abajo gradualmente y se miden tanto la I_f como la corriente del estator I_{sc} . es necesario medir el 100 %, 75 %, 50 % y 25 % de la corriente nominal para reducir la temperatura del devanado durante esa prueba (Boldea, 2016).

$$V = 0 \rightarrow E_o = (R + jX_s)I_{sc} = Z_s I_{sc} \quad (5)$$

Entonces resulta de aquí el valor modular de la impedancia síncrona:

$$Z_s = \frac{E_o}{I_{sc}} \quad (6)$$

Entonces la impedancia síncrona es la división entre la tensión en vacío y la corriente de cortocircuito; Estas magnitudes anteriores se debe expresar en valores por fase. Tener en cuenta que E_o y I_{sc} dependen de la corriente de excitación de la máquina (Fraile, 2008).

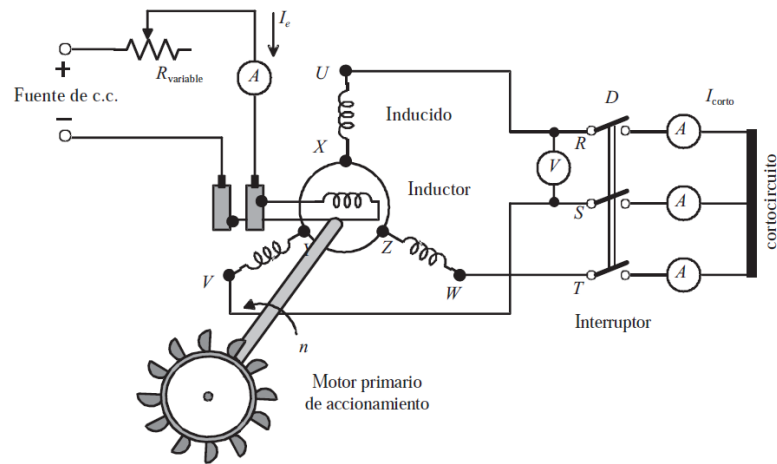


Figura 5. Esquema para ensayo en vacío y cortocircuito del generador
Fuente: Fraile (2008)

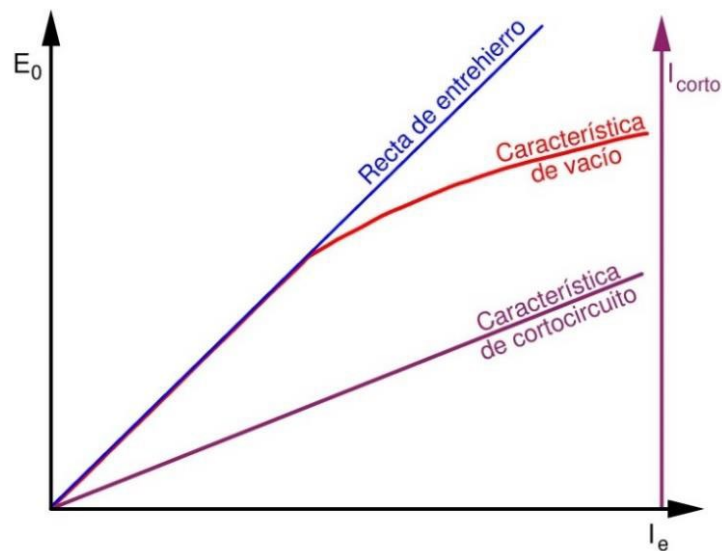


Figura 6. Característica de cortocircuito de un alternador síncrono
Fuente: Rodríguez (2015)

1.1.2.10 Voltaje interno generado por un generador síncrono

Se dedujo que la magnitud del voltaje inducido en cierta fase de un estator era:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \phi_f \quad (7)$$

depende mucho del flujo, la velocidad de rotación y forma de construcción de la máquina. para facilitar solucionar los problemas de máquinas, esa ecuación se escribe más simple.

$$V_A = K\phi\omega \quad (8)$$

Donde:

K es la constante que representa la construcción del generador. Es expresado en radianes eléctricos por segundo.

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

mientras que, es expresado en radianes mecánicos por segundo, entonces

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

1.1.2.11 Circuito trifásico del generador síncrono

Se muestra el circuito completo del maquina sincrónico trifásico. En donde la fuente de corriente continua provee potencial al circuito de campo del inductor, mediante la inductancia y resistencia en serie con la bobina. La resistencia conectada en serie con la R_f , el cual controla el flujo la corriente de campo. por fase tiene un voltaje interno generado con inductancia en serie X_s y una resistencia en serie R_a . La tensión y corriente de las tres fases están separados por 120° (Chapman, 2012).

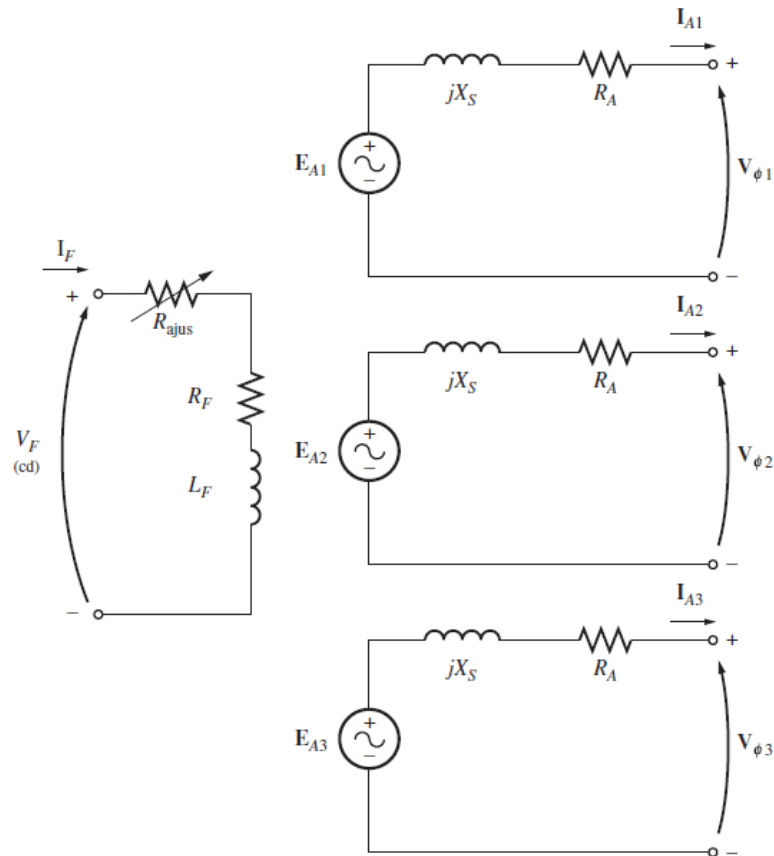


Figura 7. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico
Fuente: Chapman (2012)

1.1.2.12 Circuito equivalente monofásico del generador síncrono

la tensión y corriente en las tres fases son idénticos, pero el ángulo de fase son distintos o están desfasados 120° , solo cuando las cargas no están balanceados requieren técnicas de análisis complicados (Chapman, 2012).

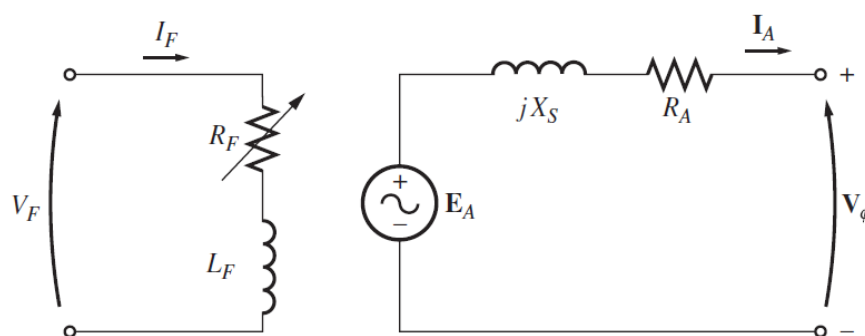


Figura 8. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono
Fuente: Chapman (2012)

1.1.2.13 Tipos de conexiones del generador síncrono

Los tipos de conexiones, estrella como delta se configuran para obtener los diferentes niveles de tensiones, según el requerimiento, se pueden conectar en estrella y en delta. Si se conecta en estrella el voltaje del terminal V_T está relacionado con el voltaje de fase:

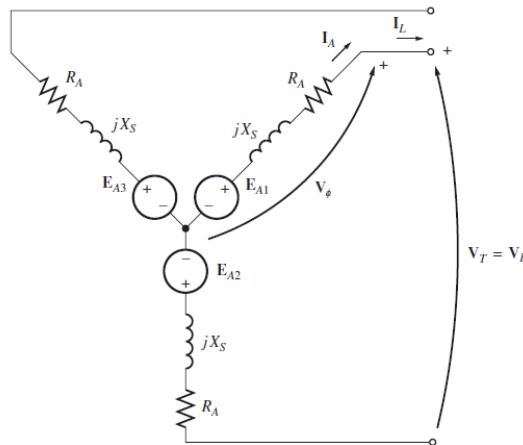


Figura 9. Circuito de un generador conectado en estrella serie
Fuente: Chapman (2012)

$$V_T = V_L = \sqrt{3}V\phi \quad (11)$$

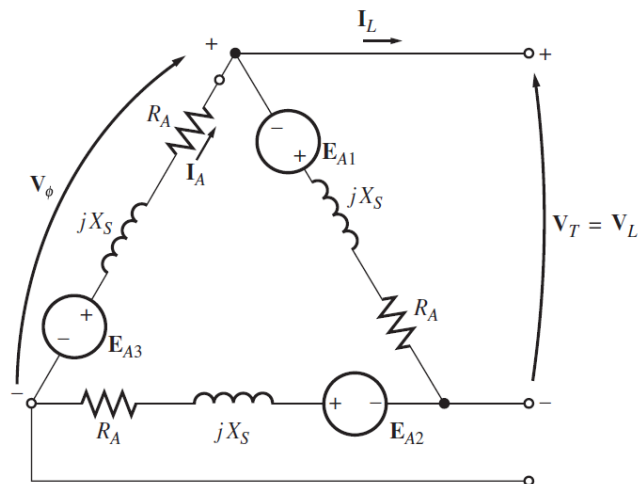


Figura 10. Circuito equivalente de un generador conectado en delta
Fuente: Chapman (2012)

Si el generador síncrono se conecta en delta, entonces el voltaje terminal se relaciona con la tensión de fase mediante la ecuación:

$$V_T = V\phi \quad (12)$$

1.1.2.14 Diagrama fasorial de un generador síncrono

Debido a que los voltajes en un generador síncrono son voltajes de ca, por lo general se expresan como fasores. puesto que los fasores tienen tanto magnitud como ángulo, la relación entre ellos se debe expresar en una gráfica bidimensional.

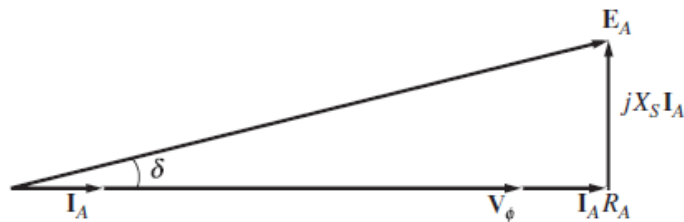


Figura 11. Diagrama fasorial de un generador síncrono con un f.d.p=1

Muestra estas relaciones cuando está conectado a una carga puramente resistiva.

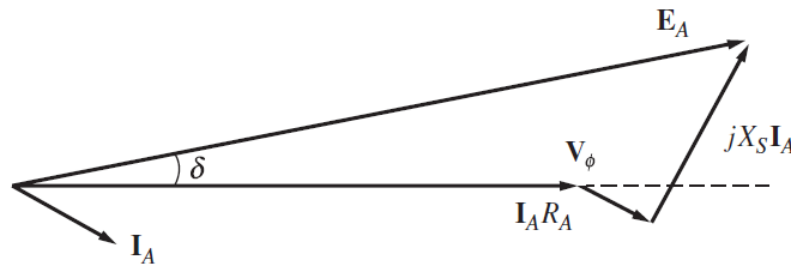


Figura 12. Diagrama fasorial de un generador con un f.d.p. en retraso

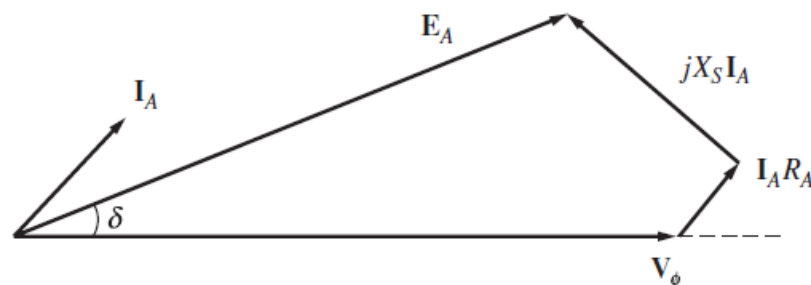


Figura 13. Diagrama fasorial de un generador con un f.d.p. en adelante

1.1.2.15 Potencia suministrada por un generador

Un generador síncrono convierte la energía mecánica en potencia eléctrica trifásica, dicha fuente energía mecánica puede entregar, un motor primario, una

turbina hidráulica, una turbina a vapor o similar. Dicha fuente debe tener la propiedad básica de mantener una velocidad constante, sin importar la demanda de potencia, si esto no se cumple entonces el sistema resultante de frecuencia puede generar falla en el sistema.(Chapman, 2012).

La potencia generada en la salida del estator

$$P_{SAL} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (13)$$

En cantidades fasoriales se expresa como

$$P_{SAL} = 3V_\phi I_A \cos \theta \quad (14)$$

La potencia reactiva de salida del generador síncrono.

$$Q_{SAL} = \sqrt{3}V_L I_L \text{sen}\theta \quad (15)$$

En cantidades fasoriales la potencia reactiva es

$$Q_{SAL} = 3V_\phi I_A \text{sen}\theta \quad (16)$$

Si la resistencia del inducido es despreciable R_A (porque $X_S \gg R_A$), entonces se puede obtener una aproximación de la potencia de salida del generador síncrono.

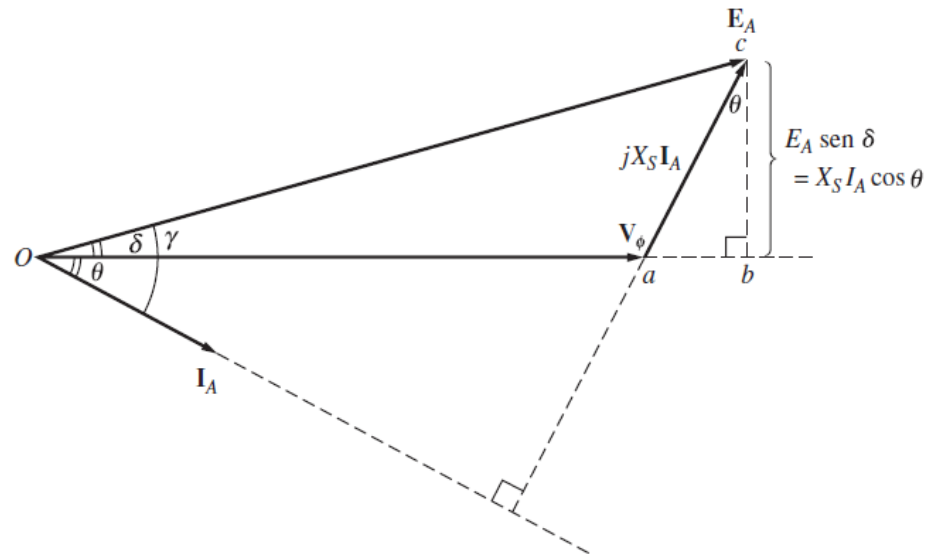


Figura 14. Diagrama fasorial simplificado, resistencia del inducido ≈ 0

Cómo se considera que la R aproximadamente 0, no hay pérdidas eléctricas

$$P_{CONV} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_S} \text{sen}\delta \quad (17)$$

La potencia entregada por una máquina síncrona dependerá del ángulo δ entre V_{ϕ} y E_A . Es conocido como el ángulo interno o ángulo de par de la máquina δ , puede entregar una potencia máxima cuando presenta cuando $\delta = 90^{\circ}$, $\text{sen } \delta = 1$

$$P_{MAX} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_S} \quad (18)$$

Por lo general, los generadores nunca llegan a estar demasiado cerca de este límite de estabilidad. En las máquinas reales los ángulos más comunes del par a plena carga son de 20 a 30°.

1.1.2.16 Esquemas de generador síncrono

En la siguiente figura se presenta el esquema del generador síncrono.

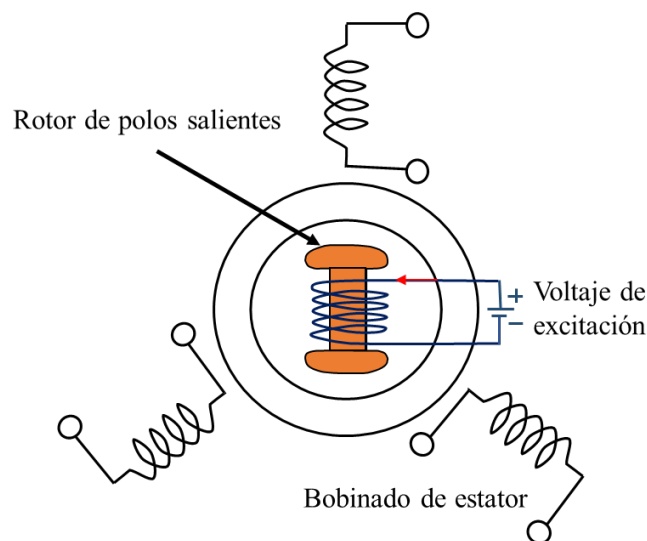


Figura 15. Esquema de Generador Síncrono

1.1.3 Sistemas de control

Según Hernández (2010) un sistema de control automatizado es una interconexión de elementos que conforman una configuración llamado sistema, de tal modo que el arreglo resultante sea capaz de controlarse por sí mismo. Para Bolton (2001) el sistema de control es donde la salida del sistema es controlada para tener un valor específico, según establece la entrada del sistema. Este valor se ajusta mediante controlador, de esta forma se obtiene el valor de la consigna. Por otro lado Luis & Moncayo (2020) señaló que la responsabilidad del sistema de control tiene tres tareas importantes: Monitorear las variables de salida por medio de mediciones, tomar decisiones racionales en base a la información del estado actual del proceso e implementar efectivamente esta decisión sobre el proceso.

Los objetivos de control, se identifican como señales actuantes u , y los resultados también se llaman VC, y . En general el objetivo de un sistema de control es controlar la salida en alguna forma ordenada mediante las entradas a través de los elementos de sistema de control (Kuo, 1996).

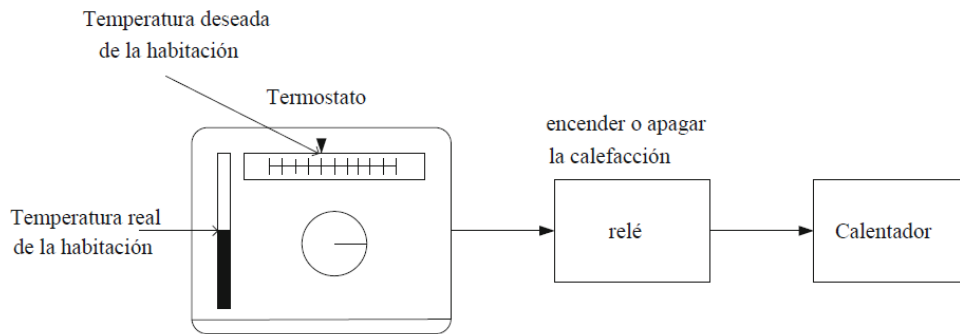


Figura 16. Esquema de sistema de control de temperatura ambiente
Fuente: László & Jenő (2017)

1.1.3.1 Variable controlada, variable manipulada

La VC es la cantidad que se mide y controla. La VM es la cantidad que el controlador modifica para afectar el valor de la VC. Por lo general, la VC es el resultado del sistema. Controlar significa medir el valor de la VC del sistema y aplicar la VM al sistema a corregir una desviación del valor medido a partir de la consigna (Ogata, 1998).

Los sistemas de control se pueden clasificar, según se detalla a continuación:

1.1.3.2 Sistema de control de lazo abierto

Según Ogata (1998), en un sistema de lazo abierto no se mide la salida del sistema, no afecta la acción de control, ni se realimenta para compararla con la entrada del sistema. Para Bolton (2001), en este tipo de sistema la entrada se elige con base en la experiencia que se tiene con dichos sistemas para producir el valor de salida requerido.

En sistemas de control de lazo abierto, generalmente el tiempo es la variable que es controlada por el sistema.



Figura 17. Sistema de control de lazo abierto

1.1.3.3 Sistema de control de lazo cerrado

Para Hernández (2010) indica que en este tipo de sistema de control depende de la salida. Utilizando un sensor que registra la respuesta real en la salida para comparar con la señal de consigna obteniendo una señal de error, esa señal es acopiada al controlador, y este actúa sobre la planta y modifique la entrada de modo que la salida se mantenga constante. Por lo que se denominan sistemas retroalimentados.

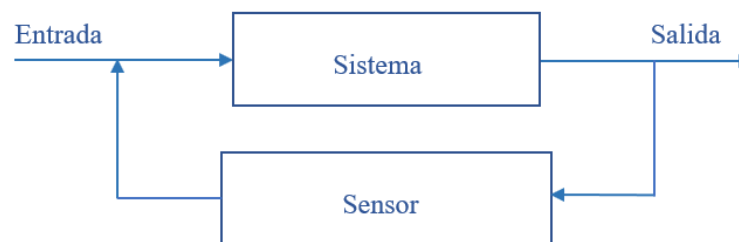


Figura 18. Sistema de control de lazo cerrado

Las señales de entradas típicas aplicadas a los controladores: Escalón, rampa e impulso, como se puede observar en la figura

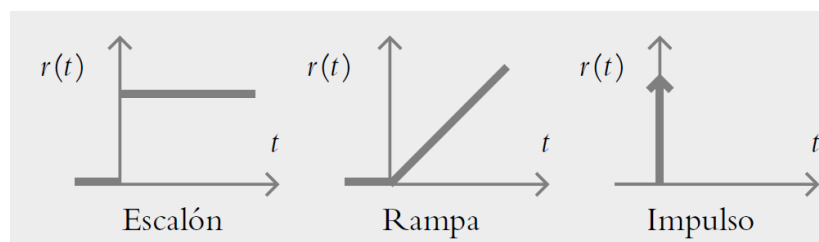


Figura 19. Distintos tipos de entradas aplicadas a los sistemas de control
Fuente: Hernández (2010)

El comportamiento de una señal escalón introducido al sistema. Mientras la entrada rampa supone una referencia con variación continua en el tiempo y la entrada impulso se caracteriza por ser una señal de prueba con magnitud muy grande y duración muy corta (Hernández, 2010).

1.1.3.4 Controladores PID

El controlador PID es un método de control que combina proporcional, integral y derivada del error de entrada, ayudando a la unidad a compensar automáticamente los cambios (Uluocak & Yavuz, 2022). De la misma forma los controladores de retroalimentación, como los PID, se utilizan ampliamente en las industrias en la

aplicación de control. Porque su objetivo es mantener el proceso lo más cerca posible del punto de ajuste deseado mientras se minimizan los errores, este tipo de controlador analiza el error entre su variable de proceso de entrada y ese valor objetivo antes de tomar la acción adecuada para reducir el error del proceso al mínimo. Las acciones se toman en función de los errores actuales, la suma de errores y la tasa de conversión de errores. El término proporcional responde basado en el error actual (Kumavat & Thale, 2022).

Este tipo de controladores recibe la señal de error calculado como la diferencia entre el valor de la referencia y el valor real de la salida que es aplicado sobre el término del controlador implementado: El controlador proporcional (P), el controlador proporcional integral (PI), el controlador proporcional derivado (PD) y el controlador proporcional integral derivativo (PID) (Wang, 2020). Obteniéndose la acción de control aplicado sobre la planta.

El algoritmo PID se puede describir como:

$$C(S) = K_P + \frac{K_I}{S} + K_D S \quad (19)$$

Es utilizado ampliamente en procesos industriales esto debido a su simplicidad y buen rendimiento, es el controlador más extendido en su aplicación en la actualidad.

a) Controlador P

Es el controlador más simple es el controlador proporcional. Con este término proporcional, la señal de control de retroalimentación $u(t)$ se calcula en proporción al error de retroalimentación $e(t)$ con la formula,

$$u(t) = K_P e(t) \quad (20)$$

donde K_P es la ganancia proporcional.

en el dominio de frecuencia, aplicando la transformada Laplace, la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (21)$$

Este controlador se puede ver como amplificador con una ganancia ajustable, se representa de diagrama de bloque:

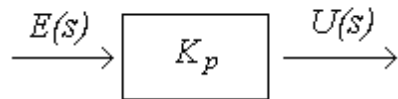


Figura 20. Diagrama de bloque del control proporcional K_p

El controlador K_p puede controlar cualquier proceso estable, pero presenta inconvenientes el error off set en régimen permanente, por esto se hace limitado su aplicación en la industria.

Por lo simple que es controlador proporcional es utilizado en los casos donde hay poca información del sistema.

b) Controlador I

Este tipo de controladores realiza una acción de control integral. El valor de la salida del regulador $u(t)$, varía a razón proporcional a la señal de error $e(t)$:

$$\frac{\partial u(t)}{\partial t} = K_I e(t) \quad (22)$$

también se puede representar:

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (23)$$

donde K_I es la constante que es ajustable.

También su función de transferencia en el dominio de Laplace es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{S} \quad (24)$$

La ventaja de este controlador es que permite cancelar el error en estado estacionario. Se muestra la representación del diagrama de bloque del controlador:

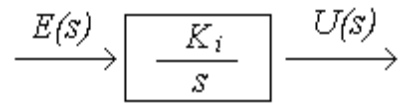


Figura 21. Diagrama de bloque del controlador integral

c) Controlador PI

Este controlador aplica tanto el controlador proporcional como el controlador integral, se define mediante la representación matemática.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (25)$$

su función de transferencia en el dominio de Laplace se representa así:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (26)$$

Donde:

K_p : Ganancia proporcional

T_i : constante de tiempo integral

Los dos parámetros son ajustables, un cambio en la ganancia K_p , influye en la parte integral y proporcional del control. La inversa del tiempo es llamada velocidad de reajuste, también nos indica la cantidad de veces por minuto que se duplica la K_p de la acción de control.

la representación en diagrama de bloque es la siguiente:

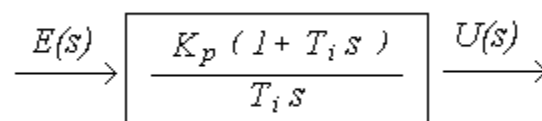


Figura 22. Diagrama de bloque del controlador PI

Se utilizan cuando se quiere mejorar el error en estado estacionario, pero la limitante es que este tipo de controlador PI hace que el sistema se vuelva oscilatorio y puede llegar a ser inestable.

d) Controlador PD

Este tipo de controlador aplica tanto el control proporcional y derivativa.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (27)$$

su función de transferencia en transformada de Laplace es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (28)$$

Donde:

K_p: Ganancia proporcional

T_d: Tiempo derivativo

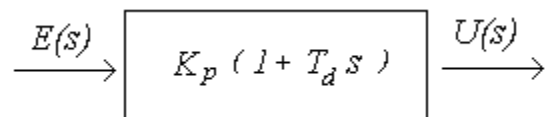


Figura 23. Diagrama de bloque del controlador PD

Al agregar al controlador derivativa al controlador proporcional, permite obtener mejor sensibilidad, que va a responder a la rapidez de cambio de error.

e) Controlador PID

Este controlador es el resultado de juntar los controladores PI y PID

Estructura de controlador PID, es la suma de acción, P, I, D y su ecuación está representada por:

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_P T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (29)$$

y su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_d S \right) \quad (30)$$

Donde:

Kp: Ganancia proporcional

Ti: Tiempo integral

Td: Tiempo derivativo

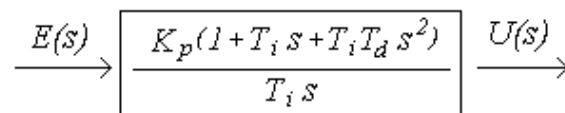


Figura 24. Diagrama de bloque del controlador PID

1.1.4 Sistema de regulación de tensión del generador síncrono

Un sistema de regulación de un generador síncrono que trabaja en forma aislada dispone de dos sistemas de control básico, control de velocidad y control de corriente de excitación: En funcionamiento aislado del sistema, el regulador mantiene la velocidad del sistema motor primario y generador síncrono igual a la velocidad del sincronismo, con lo cual la frecuencia se mantiene constante (Rodríguez, 2015).

1.1.4.1 Excitación del rotor

El rotor de una máquina síncrona debe estar magnetizado para que su campo magnético este excitado: Al tener el rotor bobinado se suministrar la I_e desde una fuente externa, se puede controlar el voltaje de salida. Mediante el uso de anillos colectores conectados a los devanados del rotor y escobillas de carbón. Los cepillos de carbón están conectados a una fuente de alimentación externa que controla la corriente a través de los devanados de campo, lo que permite el control de varios aspectos de la máquina (Fjarstedt, 2019).

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, Macangus (2018) indica que, en la práctica, el voltaje se restaura a la normalidad aumentando la excitación, y se verá que cuanto menor sea el factor de potencia, más excitación se requiere, aumentando así la cantidad de calor disipado en los devanados de campo.

En un sistema de generación es una necesidad primordial mantener la tensión nominal en su salida, generando una confiabilidad en la operación segura y económica. esta variación de voltaje se puede reducir mediante el control del sistema de excitatriz de campo generando robustez en este sistema de generación. El controlador PID es el controlador más común para el propósito de control del sistema de excitación del generador síncrono (Kumar et al., 2018)

Los sistemas de excitación modernos son muy rápidos y bastante eficientes. El control de la excitatriz es un bucle de retroalimentación que tiene por objetivo mantener la tensión en la salida del estator a un nivel establecido. supongamos que se conecta una carga como una perturbación en el sistema, como resultado el voltaje terminal disminuye. aumenta el voltaje interno, esta acción puede aumentar el voltaje de la salida y también tiende a aumentar la salida de potencia reactiva (Chen-Ching et al., 2000).

Hay diferentes métodos de excitar el inductor de un generador síncrono: La corriente continua puede generarse en un módulo estacionario y transmitirse al rotor por medio de sistema de escobillas, o generarse en un equipo montado sobre su propio eje del rotor utilizando semiconductores, aprovechando su propio campo magnético residual de la máquina (Ledesma, 2020).

El sistema de excitación de los generadores juega un papel importante para conservar la estabilidad de tensión del sistema de energía. Un sistema de excitación bien diseñado podría mejorar el rendimiento de la red eléctrica al mejorar la estabilidad transitoria, soportar el voltaje y amortiguar las oscilaciones. Sin embargo, el regulador de voltaje automático (AVR) de respuesta rápida, como la parte fundamental del sistema de excitación, actúa en contraste con el

estabilizador del sistema de potencia, como un controlador auxiliar. La señal de salida del estabilizador de potencia se aplica sobre el punto de ajuste del control de excitación para modular el voltaje de campo, de tal manera que proporcione una amortiguación positiva para las oscilaciones de ángulo del generador en los sistemas de potencia (Batmani & Golpîra, 2019).

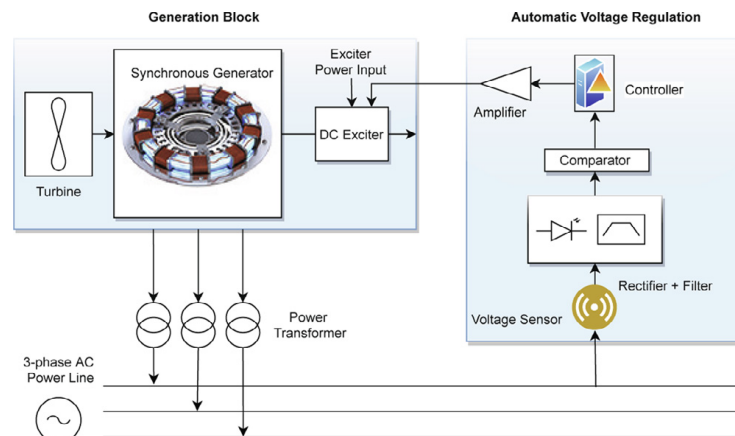


Figura 25. Un sistema AVR controlado para GS
Fuente: Padiachy et al. (2021)

Nota: En general, el sistema AVR a controlar es una red de área única, que consiste en un amplificador, excitador, generador, sensor de voltaje y comparador.

1.1.4.2 Sistema regulador AVR

Mejorar su comportamiento, robustez y la rapidez del sistema de regulación, es primordial utilizando un controlador para garantizar la respuesta eficiente del circuito a los transitorios en la tensión de salida. la sencillez en la implementación y su estructura se utiliza el controlador PID en la industria (Ang et al., 2005) citado por (Modabbernia et al., 2020)

El sistema de regulación con AVR es un método eficiente para mantener la estabilidad. este sistema funciona controlando la tensión de excitador de corriente continua en el generador síncrono, en sistema realimentado a la vez mantiene el equilibrio de la potencia reactiva, según la tolerancia de tensión en la salida en estado estable en el generador (Mandali, 2020) citado por (Padiachy et al., 2021)

1.1.4.3 Sistema de regulación de velocidad

Uno de los factores importantes, que afecta en la regulación de la velocidad es la variación de la demanda en el consumo y la generación:

En un alternador, y en general en un sistema eléctrico, la potencia demandada varía continuamente y es necesario disponer de los mecanismos de regulación necesarios para adaptar en todo momento la generación al consumo. Cuando se produce un aumento en la potencia eléctrica absorbida por los receptores, en tanto no se modifique la potencia la potencia mecánica suministrada por el motor primario (turbina) del alternador la energía adicional requerida se extrae de la energía cinética almacenada en las masas giratorias del sistema, con lo cual la velocidad de giro del grupo experimentará un descenso que se refleja en la misma proporción en la frecuencia del generador. Lo contrario sucede en el caso de una reducción del consumo de energía eléctrica. Este mecanismo constituye por lo tanto un indicador del desequilibrio entre la generación y consumo que existe en un momento dado y puede ser utilizado como referencia para efectuar la regulación correspondiente (Fraile, 2008, p. 466).

1.2 Antecedentes

En el contexto internacional referido al tema de investigación se describe importantes avances de la literatura, y presenta diversos resultados que anteceden sobre esta investigación, las que podemos mencionar a continuación.

Hoy en día, la creciente demanda de energía, la configuración de la topología del sistema que cambia constantemente con la integración de fuentes de energías renovables, que hacen que el sistema sea complejo, expuesto a perturbaciones repentinas (Jerković & Mehmedović, 2018). Por otro lado, los sistemas de energía tradicionales son proporcionados de energía principalmente por generadores síncronos, el rotor tiene un momento de inercia rotacional y amortiguación, que fluctúa bajo perturbaciones de carga, lo que afecta la estabilidad del sistema de energía (Cheema et al., 2021)

Para Demillon & Leal (2017) la máquina síncrona es importante en la generación está expuesta a variación de carga, perturbaciones, una mayor carga implica mayor demanda de corriente, generando caída de tensión en la salida, lo contrario sucede si funciona sin carga. Por un lado, para Mandali et al. (2020) 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, para Grover et al. (2020) el análisis de sensibilidad del sistema de potencia revela 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.

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 retroalimente 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 et al., 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; Londoño & Milena, 2005; Shayeghi et al., 2010) indican 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.

El rotor de una maquina síncrona debe estar magnetizado para que su campo magnético este excitado, Fjarstedt (2019) 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. 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 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 deseada (Jittapramualboon & Assawinchaichote, 2017). También indican, que 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; Hernández, 2010; Kumar et al., 2018; 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).

Según Grover et al. (2020) el objetivo principal de la investigación es implementar un bucle de hardware con esquema de control de frecuencia de carga (LFC) y regulación automática de voltaje (AVR) para un sistema que consiste en una unidad de área térmica sin recalentamiento basada en un generador síncrono, con la finalidad de reducir el desajuste de potencia entre la generación y la carga. Este sistema de control propuesto es capaz de regular la frecuencia de carga y el voltaje dentro de los límites especificados cuando es sometido a desajustes entre la generación y demanda de carga además la calidad de energía se mantuvo dentro del rango según estándar IEEE 519-2014.

Según estudios de Khrushchev et al. (2020) en su artículo de investigación presentan el concepto de control adaptativo en sistemas de energía eléctrica, también indican que la técnica utilizado es del modelo de referencia simple que define la dinámica de los parámetros controlados. Para la validación de dicho método realizaron una serie de experimentos de simulación. Como resultado, el ángulo vectorial de voltaje de la

velocidad y la aceleración se acercan a los valores objetivos exactos. En comparación con otros métodos adaptativos refieren que el tiempo de control es relativamente corto y una estabilidad mejorada con las perturbaciones.

Para Salih et al. (2019) en este artículo proponen el controlador de Derivada Proporcional Integral (PID) basado en una red neuronal artificial (ANN) como un controlador inteligente no lineal para un regulador automático de voltaje (AVR) del generador síncrono trifásico. Los parámetros del controlador se ajustan mediante el uso de la tecnología de optimización de enjambre de partículas (PSO). Los principales resultados demostraron que el controlador PID-ANN tiene una buena respuesta y más robustez en conjunto con los controladores tradicionales, en el cual el sobregiro máximo en la prueba de robustez del controlador PID-ANN se redujo (0.71%) de (11.98%) en PI (38.07) en las mismas condiciones de operación para todos los casos.

Según estudios de Sanampudi & Kanakasabapathy (2019) en este trabajo de investigación modelan y simulan en Matlab Simulink un controlador electrónico de carga (ELC) con generación síncrona, para controlar el voltaje de la micro central hidroeléctrica, controlando el voltaje de excitación para garantizar la estabilidad en el voltaje y la frecuencia a cargas variables.

Según estudios de Blondin et al. (2019) en su artículo científico sobre enfoque de ajuste del controlador con robustez, estabilidad y criterios dinámicos para el sistema AVR original. De la universidad de Quebec, Canadá, se dedican para encontrar un conjunto de parámetros para controladores basados en proporcional derivada integrales PID para obtener un tiempo de inicio rápido con sobregiro mínimo. Los resultados del análisis de optimización para ajuste de ganancia del controlador combinado para dicho sistema, demostraron que gestiona eficazmente los criterios dinámicos y de robustez.

Por otro lado Batmani & Golpîra (2019) en su artículo el objetivo general es diseñar un controlador óptimo adaptativo en línea para optimizar el rendimiento de un regulador de voltaje automático (AVR). Entonces definen un problema de seguimiento cuadrático óptimo basado en el error entre la tensión de salida del generador síncrono y el valor de consigna. Este problema de control óptimo se resuelve utilizando un método de programación dinámica adaptativa (ADP), llamado técnica de iteración de políticas. Con esta técnica, el rendimiento óptimo se logra sin el conocimiento de los parámetros AVR.

En su trabajo de investigación Nahas et al. (2019) presentan “el esquema AVR-LFC adaptativo autoajustable para generadores síncronos” se introduce una metaheurística flexible autoajustable eficiente para desarrollar esquemas automáticos de regulación de voltaje y frecuencia de carga para sistemas de energías de múltiples áreas, empleando un algoritmo de aceptación de umbral no lineal para encontrar las mejores combinaciones de ganancias de control PID, se basan en enfoques convencionales de control de modelos internos y heurísticas para sistemas de energía de múltiples áreas. Concluyeron que los sistemas de circuito cerrado garantizaron una respuesta dinámica rápida.

Según Efendi et al. (2019) en su trabajo de investigación explicaron que para superar la inestabilidad de tensión debido a cargas dinámicas o causados por diversos factores perturbadores, diseñaron e implementaron un regulador automático de voltaje con algoritmo PID-Cuckoo, este método se aplica para ajustar el ángulo de disparo de tres semi convertidores de fase con el fin de estabilizar el voltaje de salida del generador. De los datos del experimento concluyen que mediante el uso del método PID-CSA, los valores de tiempo de aumento y tiempo de asentamiento serán más rápidos que el uso del control PID. Para probar la salida del generador con cambio de carga, el valor de error generado por el método PID-CSA es menor que el método de control PID; mediante el método PID – CSA, el error hacia la tensión de 380 V del punto de set es del 0.26%, mientras que cuando se utiliza el control PID, el error hacia el voltaje del punto de set es del 0.57%.

De acuerdo con Jerković & Mehmedović (2018) en su artículo de investigación presenta una nueva regulación no lineal para controlar la excitación en el generador, con retroalimentación de voltaje. El control de excitación IDA es introducido en el modelo matemático del generador sincrónico de polos salientes del tercer orden como un sistema hamiltoniano controlado. Las simulaciones muestran la eficiencia de seguimiento del valor de referencia de voltaje de generador, así como el mantenimiento de la estabilidad en caso de cortocircuito en el lado de la red, el tiempo crítico de limpieza del generador síncrono simulado con IDA AVR es de 283 ms.

Krishna et al. (2022) presentan una comparación experimental del rendimiento del generador auto excitado y un generador síncrono de imanes permanentes para aplicaciones independientes basados en RER. Estos generadores son impulsados por motores primarios a velocidad constante debido a sus ventajas inherentes. En los sistemas



aislados, se conocen la capacidad máxima de generación y carga. Entonces el objetivo principal es mantener la tensión y frecuencia constante en el terminal de carga. La comparación del rendimiento de ambos generadores es necesario para identificar la solución simple, viable y económica para una fuente dedicada para cargas fijas aisladas.

Park et al. (2009) con el objetivo de proporcionar la tensión constante de salida del generador. Regulando con AVR la corriente de campo de un generador síncrono. Implementando un AVR digital del tipo PMG, utilizando MOFSET en un generador síncrono para barcos. Con este AVR digital implementado se mejoró para la comodidad del usuario mediante la construcción de un sistema de monitoreo utilizando el software Labview. El sistema estudiado se verifico su validez a través de un experimento prototipo de 10 KVA, en lugar de utilizar un generador real para los barcos.

En el contexto nacional y local no se encontraron trabajos de investigaciones relacionado al tema de tesis, lo que hace más relevante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

Hoy en día, debido a la creciente demanda de energía, el sistema de energía eléctrica se actualiza permanentemente, no solo con grandes centrales eléctricas, también con fuentes de energías renovables, que hacen que el sistema sea complejo, expuesto a perturbaciones repentinas. En dicho sistema de energía eléctrica distribuida un generador síncrono se debe considerar como un sistema no lineal ya que su punto de operación puede variar considerablemente debido a las variaciones de carga y la topología del sistema (Jerković & Mehmedović, 2018). Por un lado, con la integración de generación distribuida en las redes de distribución está generando un reto para la regulación óptima de voltaje en tiempo real, que se deben implementarse para soportar la configuración cambiante de la red (Murray et al., 2021).

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. Entonces para Mandali et al. (2020) 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 para Grover et al. (2020) el análisis de sensibilidad del sistema de potencia revela 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.

Según estudios de Blondin et al. (2019) en su artículo científico sobre enfoque de ajuste del controlador con robustez, estabilidad y criterios dinámicos para el sistema AVR original. De la universidad de Quebec, Canadá, se dedican para encontrar un conjunto de parámetros para controladores basados en proporcional derivada integrales PID para obtener un tiempo de inicio rápido con sobregiro mínimo. los resultados del análisis de optimización para ajuste de ganancia del controlador combinado para dicho sistema, demostraron que gestiona eficazmente los criterios dinámicos y de robustez.

De acuerdo con Batmani & Golpîra (2019) en su artículo de investigación sobre diseño de regulador de voltaje automático utilizando un controlador optimo adaptativo modificado. De la universidad de Kurdistán, Irán. Diseñaron un controlador optimo adaptativo en línea para optimizar el rendimiento de un regulador de voltaje automático (AVR). Entonces definen un problema de seguimiento cuadrático óptimo basado en el error entre el voltaje en la salida del generador síncrono y su valor deseado. Este problema de control óptimo se resuelve utilizando un método de programación dinámica adaptativa (ADP), llamado técnica de iteración de políticas. Con esta técnica, el rendimiento óptimo se logra sin el conocimiento de los parámetros AVR.

De acuerdo con Jerković & Mehmedović (2018) en su artículo de investigación sobre regulador automático de tensión de asignación de interconexión y amortiguación para generadores síncronos. De la universidad de Ojisek, Croacia. Presentan una nueva regulación no lineal para el control de la excitación del generador síncrono. El control de excitación IDA es introducido en el modelo matemático del generador síncrono de polos salientes del tercer orden representado como un puerto sistema hamiltoniano controlado. Las simulaciones muestran la eficiencia de seguimiento del valor de referencia de voltaje de generador, así como el mantenimiento de la estabilidad en caso de cortocircuito en el lado de la red.

Según estudios de Roy et al. (2017) sobre el diseño del controlador de excitación de retroceso adaptativo no lineal para modelos de orden superior de generadores síncronos, demostraron que el controlador de retroceso adaptativo diseñado es más eficaz en comparación del mismo controlador existente en términos de proporcionar amortiguación, regular el voltaje y asentar el sistema de funcionamiento en estado estacionario previo a la falla.

2.2 Enunciados del problema

2.2.1 Problema General

¿Cómo realizo la regulación de tensión y frecuencia mediante un control PID para un generador síncrono en la EPIME?

2.2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cómo realizo el diseño del sistema de regulación de tensión y frecuencia en un generador síncrono?
- b) ¿Cómo determino la regulación de tensión en un generador síncrono?
- c) ¿Cómo desarrollo el sistema de control de frecuencia para un generador síncrono?

2.3 Justificación

En estos últimos tiempos los sistemas de generación está en un crecimiento importante en diferentes sectores, como la generación de energía con recursos renovables, inserción de la generación distribuida, por esto es muy necesario tener controladores automáticos para la regulación de tensión y control de la frecuencia con generadores síncronos, para estabilizar el voltaje y mantener una sola frecuencia a la que deben operar en un sistema eléctrico, se requiere tener de sistemas de control que sean capaces de cubrir estos requerimientos. lo que hace que el usuario final tenga una buena calidad de energía eléctrica, alargando la vida útil de sus equipos eléctricos, electrónicos u otros.

Con la implementación de sistema automatizado para la regulación de tensión y control de frecuencia para un generador síncrono de polos salientes. Esto permite a los estudiantes de la EPIME realizar practica de laboratorios de máquinas síncronas, centrales eléctricas e ingeniería de control en procesos de generación eléctrica.

El prototipo de control automatizado que se implementa está constituido en su mayoría de componentes de bajo costo, también es fácil de obtener en el mercado. Se realizará con la ayuda de dispositivos como PLC S71200 marca Siemens, herramientas digitales, así como también uso de elementos de electrónica de potencia, aplicación de las técnicas de ingeniería de control.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

- a) Evaluar la regulación de tensión y frecuencia mediante un control PID para un generador síncrono en la EPIME

2.4.2 Objetivos específico

- a) Diseñar e implementar un sistema de regulación de tensión y frecuencia para un generador síncrono.
- b) Determinar el control PID de tensión para un generador síncrono.
- c) Determinar y evaluar el sistema de control PID de frecuencia para un generador síncrono.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

- a) El control PID estabiliza la tensión y regula la frecuencia constante en el generador síncrono en la EPIME.

2.5.2 Hipótesis específicas

- a) El sistema de regulación diseñada e implementada en un Controlador Lógico Programable PLC, optimiza la estabilidad de tensión y la regulación de frecuencia.
- b) El control PID de la corriente de excitación estabiliza la tensión del generador síncrono ante una variación de carga.
- c) El sistema de control de frecuencia regula eficientemente la velocidad del generador síncrono para una frecuencia constante.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

El presente proyecto de investigación fue realizado en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 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.

3.2 Población

En este proyecto de investigación la población objeto de investigación estará conformado por el módulo experimental de regulación de tensión y control de frecuencia de un generador síncrono y todas las pruebas realizado en el laboratorio con diferentes configuraciones de carga.

3.3 Muestra

La muestra objeto de estudio para la regulación de tensión y control de frecuencia para un generador síncrono, estará constituido el módulo de controlador y los valores que se han obtenido de las pruebas realizadas en la salida del generador síncrono.

3.4 Métodos de investigación

Este estudio de investigación es de tipo aplicativo, se ha realizado bajo el método científico, el cual es un método coherente, sistematizado, estructurado que permite plantear un problema, probarlo y presentar los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

Procedimiento inicial del proceso, para la implementación del módulo de regulación de tensión y control de frecuencia es mediante un controlador adaptativo para un generador síncrono, se sigue la siguiente metodología. En esta atapa se describe la metodología desarrollada en la ejecución de esta tesis de maestría, especificando los materiales, equipos e instrumentos utilizados en cada etapa del desarrollo metodológico.

Se ha acopiado la información necesaria de la investigación usando equipos e instrumentos de medición, que nos permita medir parámetros para su posterior modelamiento.

Tabla 1

Equipos utilizados en el proceso de investigación

Ítem	Instrumento/Equipo	Unidad	Parámetro
01	Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200	Procesamiento de señales.	Es el cerebro del proceso que evalúa los indicadores y controla los procesos.
02	Módulo de energía para adquirir datos de redes monofásicas y trifásicas hasta 480 voltios de AC ENERGY METER SM 1238, SIEMENS	Medición y registro de variables eléctricas.	Intensidades, ángulo de fase, potencia, energía, frecuencia, factor de potencia, contador de energía.
03	Módulo de expansión analógica SM 1231, de 4 entradas analógicas AI4x13 bits, (2.5, 5, 10) V, (0/4-20) mA, SIEMENS, instalación frontal	Procesamiento de señal eléctrico.	Adapta la señal eléctrica tensión en las entradas del PLC.
04	Sensor de proximidad, diámetro 18 mm, aprox. 5 mm, Schneider Electric	Sensor de proximidad inductivo.	Mide los rpm del eje de motor primario, sirve para la realimentación del controlador.
05	Fuente de variable (laboratorio) switching 0-30VDC 0-5A de precisión	Fuente de alimentación	Fuente de alimentación de AC/DC
07	Variador de frecuencia compacto SINAMIXS V20 Siemens	Control de motor primario	Frecuencia.

08	Analizador de redes trifásicas CA 8335 QUALI STAR	Procesamiento y registro de señal eléctrica en tiempo real	Tensión, corriente, potencia, factor de potencia, Potencia activa, potencia reactiva.
09	Software Tía portal V17	Programación y control, HMI	Monitorización y control en tiempo real de frecuencia y otros parámetros.
10	Software Powe Pad III	Procesamiento y registro de señal eléctrica en tiempo real	Monitorización y control en tiempo real, parámetros eléctricos.
11	Convertidor analógico Zelio AC/DC	Convertidor analógico	Corriente AC/DC
12	Motor de inducción	Motor primario	Cumple la función de una turbina hidráulica.
13	Generador síncrono trifásico	Generador de electricidad	Tensión, corriente trifásico

3.5.1 Diseño y montaje del módulo de generador síncrono

Para la implementación del módulo de regulación, en el control de proceso se utiliza el controlador lógico programable (PLC) S7-1200 Siemens, como planta o proceso se utiliza un generador síncrono, que funciona en forma aislada, para alimentar la carga eléctrica no definida. El variador de velocidad controla el arranque del motor primario que impulsa al generador síncrono, esto permite ajustar la frecuencia, mediante un sensor taco generador que es controlado por el regulador, mientras tanto la regulación de la corriente de excitación o inductor permite controlar el valor eficaz de la tensión de salida en los bornes del generador mediante un transductor de tensión, por lo tanto, el factor de potencia depende de la carga que se conecta al generador síncrono. La frecuencia se regula mediante la velocidad del motor primario que está conectado al eje del generador, en el cual es instalado un sensor taco-generador, la señal es acopiada por el regulador. Por otro lado, la tensión de salida del generador es regulada mediante la corriente de excitación, alimentada con una fuente regulable de corriente continua, en el cual es instalado un sensor de corriente continua para controlar la corriente de excitación por el controlador, todo este proceso es controlado y monitorizado en tiempo real mediante el interfaz del software Tía portal de Siemens.

Para este sistema de regulación de tensión y control de frecuencia del generador síncrono, las características de los elementos constituyentes del módulo se visualizan en la siguiente figura.

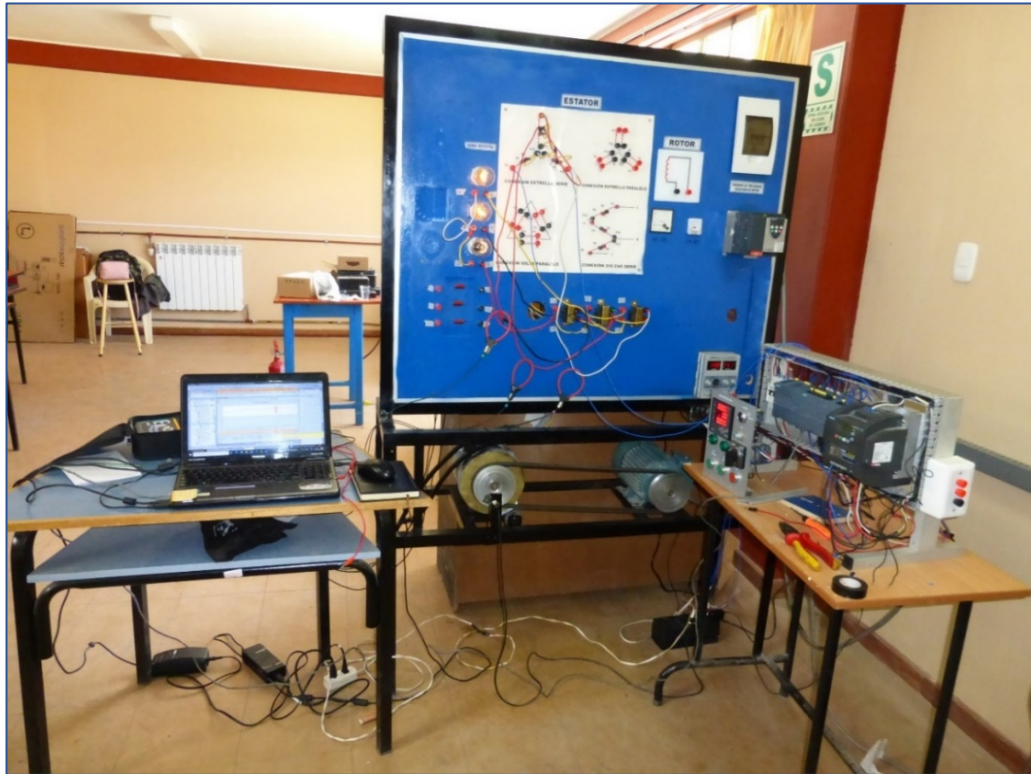


Figura 26. Módulo de Sistema de Regulación de Tensión en funcionamiento

3.5.1.1 Controlador Lógico Programable (PLC) S7-1200 Siemens

En la implementación del prototipo experimental, se ha utilizado un controlador lógico programable, que es un dispositivo electrónico capaz de gestionar los circuitos de automatismo en forma programada, contienen memoria programable para almacenar y ejecutar instrucciones específicas de control:

El controlador S7-1200, que ofrece la flexibilidad y potencia necesaria para controlar una gran variedad de dispositivos para las distintas necesidades de automatización. Gracias a su estructura compacta, configuración flexible y amplio juego de instrucciones, es idóneo para controlar una gran variedad de aplicaciones. La CPU combina los siguientes elementos, en una caja compacta para crear un controlador potente: Un microprocesador, una fuente de alimentación integrada,

circuitos de entrada y salida, PROFINET incorporado, E/S de control rápida (Siemens, 2018, p. 27).

También los PLCs son microprocesadores, que realizan cálculos matemáticos complejos, funciona también como secuenciación lógica, temporización y contador, también controla y supervisa todas las operaciones en un proceso.

Tiene entradas y salidas digitales I0...I13, I0...I9, Entradas y salidas analógicas, I0...I1:I0.

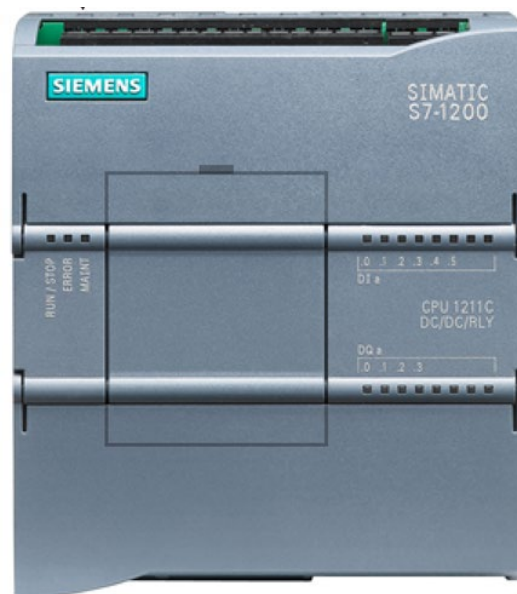


Figura 27. Controlador Lógico Programable S7-1200
Fuente: Siemens (2018)

3.5.1.2 Signal Board

Este componente se adiciona al PLC, es un componente de medida analógica, proporcionando salidas y entradas analógicas adicionales, por medio de este componente se cierra el lazo de control, entrada analógica, SB1232, 1 AI, +/- 10VDC



Figura 28. Signal board de entrada analógica
Fuente: Siemens (2018)

3.5.1.3 Módulo fuente de alimentación PM 1207, Siemens

La fuente de alimentación tiene la función importante de convertir la corriente alterna de la red a corriente continua, para alimentar los circuitos internos de PLC, la tensión de trabajo es de 24 V en corriente continua. Ofrece protección electrónica contra cortocircuitos

La tensión de alimentación de la fuente, puede variar en un rango de 85...264V AC. Montaje a riel DIN para un óptimo desempeño en el entorno industrial. Alimentación 120 / 230V AC, salida 24V DC / 2,5 Amperios.



Figura 29. Módulo de Entradas Analógicas
Fuente: Siemens (2018)

3.5.1.4 Módulo de entrada analógica SM 1231, Siemens

Los módulos de entrada analógica para Simatic S7-1200 permiten la conexión del controlador a las señales analógicas del proceso. Con tiempos de conversión extremadamente cortos. Esto proporciona a los usuarios las siguientes ventajas: Los usuarios pueden adaptar de forma óptima sus controladores incluso a las tareas más complejas. También se puede hacer la conexión directa de sensores: Hasta 13 bits de resolución y diferentes rangos de entrada que permiten la conexión de sensores sin amplificador adicional. Por último, tienen la flexibilidad: si la tarea se amplía posteriormente, el controlador se puede actualizar. La actualización del programa de usuario es extremadamente sencilla. Los módulos de señales de entrada analógica SM 1231 convierten señales analógicas del proceso a señales digitales para procesamiento interno por el Simatic S7-1200, tiene 4 entradas analógicas $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2,5\text{ V}$ o $0/4 \dots 20\text{ mA}$.

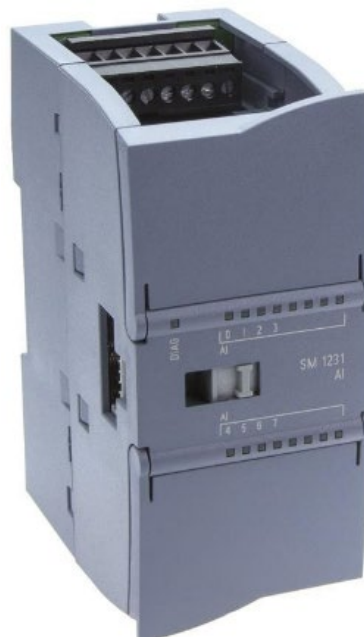


Figura 30. Módulo Analógica SM 1231
Fuente: Siemens (2018)

3.5.1.5 Módulo SM 1238 Energy Meter 480VAC

Módulo de energía es para adquirir datos monofásicos o trifásicos hasta una tensión alterna de 480 VAC.

El medidor de energía SM 1238 480VAC está diseñado para implementación a nivel de máquina en un S7-1200. El módulo registra más de 200 valores de energía y medidas eléctricas diferentes. Eso le permite medir los requisitos energéticos de los componentes individuales de una planta de producción hasta el nivel de la máquina. Usando los valores medidos proporcionados por el Medidor de energía SM 1238 480VAC, puede determinar el consumo de energía y la demanda de energía. También puede determinar el consumo pronósticos y eficiencia a partir de los valores medidos. Las medidas de potencia son relevantes para gestión y mantenimiento de carga.



Figura 31. SM 1238 Energy Meter 480VAC
Fuente: Siemens (2018)

3.5.1.6 Variador de frecuencia SIMATIC V20

El variador de frecuencia se utiliza para controlar la velocidad de motor primario. Modifica la tensión alterna, cambiando la frecuencia y la amplitud, con el fin de optimizar procesos y reducir las cargas mecánicas de las máquinas. Estos dispositivos se usan en numerosas aplicaciones industriales como, por ejemplo, bombas, ventiladores, compresores, cintas transportadoras o en la automatización de edificios.



Figura 32. Variador de Frecuencia Sinamics V20

Fuente: <https://www.solucionesyservicios.biz/SINAMICS-v20>

3.5.1.7 Convertidor analógico Zelio AC/DC

Estos equipos detectan los valores de tensión y corriente, adaptan dichas señales para que sean compatibles con los equipos del sistema de control. Es simple de configurar gracias a los rangos de entrada y salida pre calibrados, y con las salidas protegidas contra inversiones de polaridad, cortocircuitos y sobretensión, también detectan automáticamente los circuitos en bucle rotos.

Convertidor de tensión/corriente, tipo de entrada analógica:

Tensión 0...300 VAC a una frecuencia de 50/60Hz.

Tensión 0...50 VAC a una frecuencia de 50/60Hz.

Tensión 0...500 VAC, a una frecuencia de 50/60Hz.

Tipo de salida analógica

Corriente 0...20 mA \leq 500 Ohm Conmutable

Corriente 4...20 mA \leq 500 Ohm Conmutable

Tensión 0...10 V \geq 100 kOhm Conmutable



Figura 33. Convertidor Analógico Zelio AC/DC

Fuente: <https://www.fcmsolutionsperu.com/products/rmca61bd>

3.5.1.8 Fuente de variable switching 0-30VDC 0-5^a de precisión

Esta fuente de alimentación DC de alta precisión, con regulación de voltaje 0 – 30 V; regulación corriente 0 – 5 A, con alta velocidad, también tiene la capacidad de proteger picos de corriente y protección contra cortocircuitos en el tiempo que significa cierre de salida. Cuenta con cinco diferentes interfaces de alimentación para teléfono celular y cinco diferentes opciones de voltaje de salida. Adecuado para su uso en centros de prueba y reparación, laboratorios y escuelas.

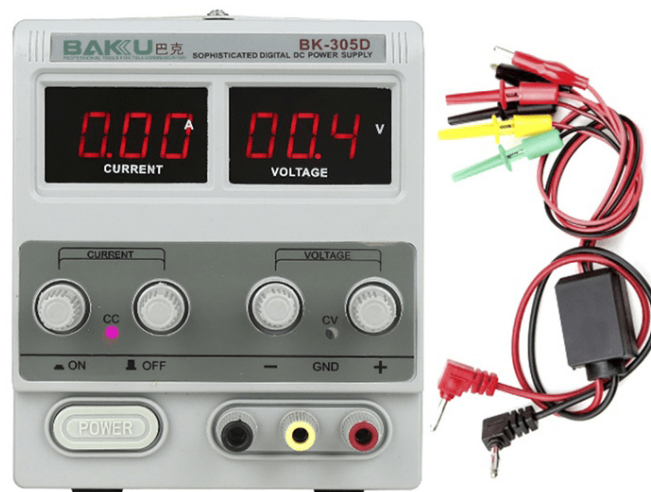


Figura 34. Fuente de Variable de Precisión

Fuente: <https://www.amazon.com/-/es/alimentaci%C3%B3n-regulada-ajustable-laboratorio-cocodrilo/dp/B075FQ6Z18>

3.5.1.9 Sensor de proximidad inductivo

Los sensores inductivos o taco generador convierten la información sobre el movimiento, se utiliza para detectar el número de vueltas que gira el eje del motor, al determinar el número de vueltas se obtendrá su frecuencia y su rpm. Los sensores de aplicación estándar pueden reconocerse fácilmente, pues la tapa plástica está al ras del metal.

Las entradas y salidas analógicas detectan los valores de tensión y corriente para producir eventos de comparación cuando se alcanza los prefijados en el programa.

Estándar de tensión:

De 0 a 10 Vcc

De -10 a +10 Vcc

De 2 a 10 Vcc

Estándar de corriente:

De 4 a 20mA

De 0 a 20 mA

De 1-5mA

De 0 a 5mA

En ambos casos el indicado en el primer lugar es más utilizado.



Figura 35. Sensor de Proximidad Inductivo

Fuente: <https://images.app.goo.gl/xujpVJeh9pQMnpHe9>

3.5.1.10 Analizador de redes trifásico

El analizador trifásico de redes, su función triple permite medir, valores eficaces, potencias, perturbaciones de las redes de distribución, obtener imágenes

instantáneas de las características de las redes y visualizar los parámetros eléctricos en tiempo real. Cuenta con sensores de corriente y tensión registrar las mediciones desde algunos miliamperios hasta unos kiloamperios. Se puede realizar conexiones monofásicas, bifásicas y trifásicas (Arnoux, 2012).



Figura 36. Analizador trifásico modelo Chauvin Arnoux C.A
Fuente: Arnoux (2012).



Figura 37. Accesorios, sensor de corriente y tensión del analizador trifásico

3.5.1.11 Motor DC de accionamiento

El motor de corriente directa convierte la energía eléctrica en mecánica, generando un movimiento giratorio. Cumple la función de un actuador, se encarga de regular al potenciómetro del estabilizador entre dos valores la corriente de excitación 0.2 y 2.9 Amperios, se impulsa la perilla de la fuente y eje del motor DC mediante una faja, se puede apreciar en la figura 38.



Figura 38. Motor DC de 24v DC acondicionado a la fuente DC

3.5.1.12 Motor primario de accionamiento

Para este trabajo de investigación se utiliza un motor de inducción, como motor primario que cumple la función de la turbina, para impulsar al generador síncrono en este sistema de generación. Sus características técnicas se detallan en el cuadro siguiente:

Tabla 2

Especificaciones técnicas del motor de inducción.

Item	Descripción	Unidad de medida
1	Marca	Kaili Type Y90L-4
2	Potencia	1.5 Kw.
3	Velocidad máxima	1680 rpm
4	Tensión	220/380 v
5	Frecuencia	60 Hz
6	Fases	Trifásico

3.5.1.13 Generador síncrono

En este módulo, el generador síncrono, es utilizado como planta o proceso, el cual no tiene una carga definida, es para aplicación de pruebas en el laboratorio, los devanados del estator están conectados en grupos de seis, las conexiones de las bobinas determinan el tipo de voltaje de salida de maquina síncrona, se puede realizar las conexiones serie estrella, paralelo estrella, estas configuraciones sirven para obtener diferentes rangos de voltaje, entonces esta máquina eléctrica trifásico, es de baja potencia de polo saliente, que son utilizadas para la alimentación de vagones ferroviarios, centrales eólicas, automóviles, camiones, tractores agrícolas, volquetes mineros, etc. Tiene las siguientes características:

Tabla 3

Características del generador síncrono

Ítem	Descripción	Unidad de medida
1	Marca	Chrysler
2	Potencia	1.6 KVA
3	Velocidad máxima	183 r/s (11000 rpm)
4	Resistencia a través de los anillos colectores	12.5-13.5 ohmios
5	Resistencia en el estator por grupo de bobinas	0.9-1.0 ohmios
6	Longitud mínima de escobillas	5 mm
7	Excentricidad radial máxima de anillos colectores	0.03 mm
8	Excentricidad máxima del rotor	0.05 mm
9	Velocidad de funcionamiento variable	2100-3000rpm
10	Numero de polos	12

Fuente: Tesis diseño y construcción de un módulo con generador síncrono con fines de investigación.

3.5.1.14 Esquema del generador síncrono

El esquema del generador síncrono, utilizado para las pruebas realizadas en este trabajo de investigación tiene una conexión estrella serie que se muestra en la siguiente figura.

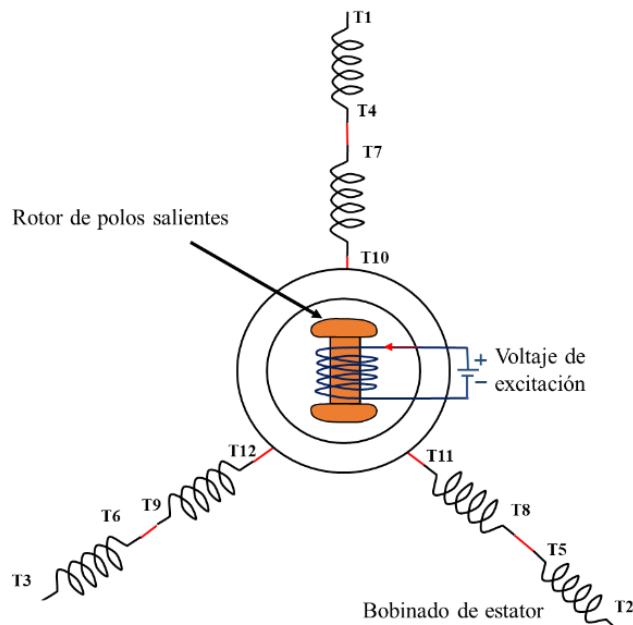


Figura 39. Esquema de Generador Síncrono

Se observa en la figura, el esquema eléctrico del devanado del rotor mediante esta se manipula el flujo de corriente que circula por el embobinado de campo, esto se hace con el fin de obtener una tensión que depende de los requerimientos, para obtener una tensión alta entonces se hace una conexión en estrella serie. si se requiere tener una tensión baja entonces se conectará en delta, entonces este módulo facilita hacer diferentes configuraciones prácticas.

3.5.1.15 Prueba en vacío para generador síncrono

Este ensayo, consiste en impulsar al rotor a su velocidad nominal mediante un motor primario, hasta alcanzar la velocidad síncrona, sin carga, en seguida, alimentar al rotor con corriente continua que proviene de una fuente de alimentación de corriente continua regulable. Se debe incrementar progresivamente, la corriente de excitación, y medirse el voltaje en la salida en los bornes del estator. Este ensayo ayuda a obtener la curva característica de vacío, a

su vez nos permite encontrar la relación entre tensión interna que es producida por una corriente de campo dada.

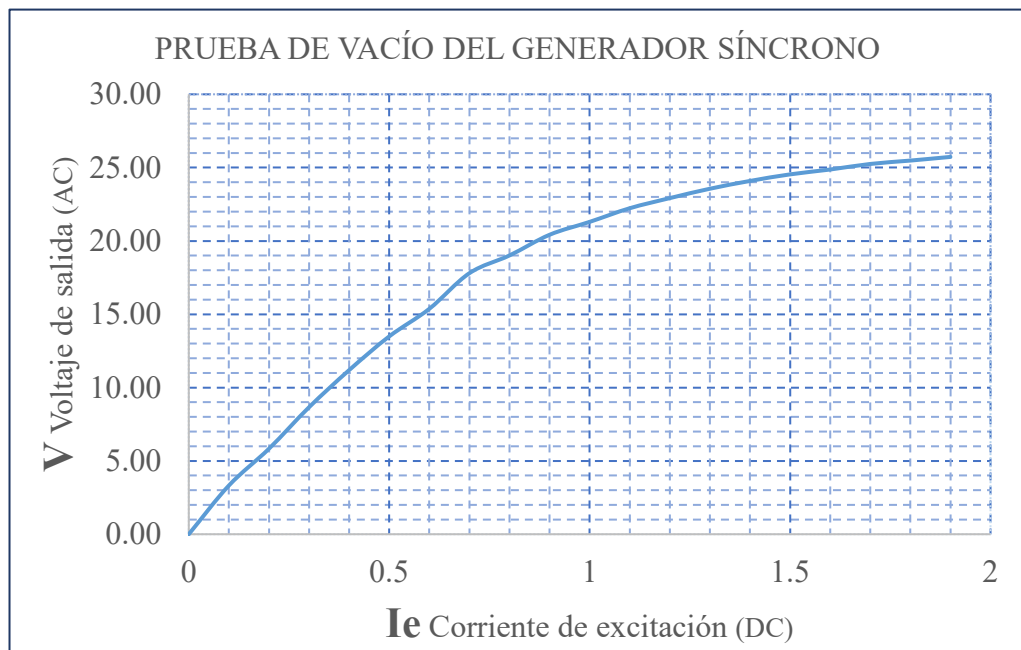


Figura 40. Prueba de vacío del generador síncrono

En el gráfico se puede visualizar que, a medida que se va incrementando la corriente de excitación el voltaje de salida crece cuadráticamente, hasta alcanzar el voltaje nominal.

Tabla 4

Prueba de vacío del generador síncrono

Iexc.	V Salida
0.1	3.32
0.2	5.83
0.3	8.66
0.4	11.19
0.5	13.49
0.6	15.37
0.7	17.80
0.8	19.01
0.9	20.42
1	21.30
1.1	22.23
1.2	22.92
1.3	23.56
1.4	24.09
1.5	24.54
1.6	24.87
1.7	25.25
1.8	25.48
1.9	25.73

3.5.1.16 Prueba en cortocircuito para generador síncrono

En este ensayo de cortocircuito al generador hay que llevar a su velocidad nominal en los terminales cortocircuitados, esta prueba nos evidencia la relación lineal que existe entre la corriente de campo y la corriente de la armadura.

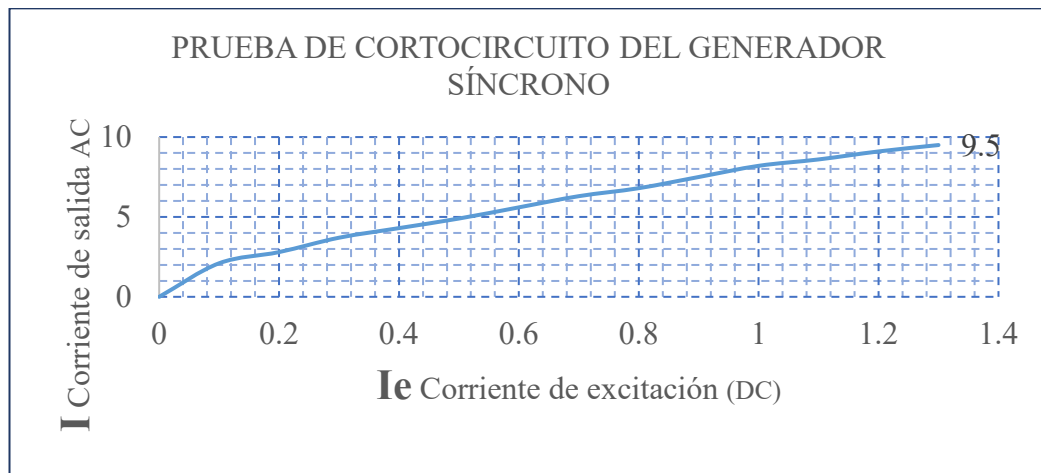


Figura 41. Prueba de cortocircuito del generador síncrono

Tabla 5

Prueba de cortocircuito del generador síncrono

$I_{exc.}$	I Salida
0	0
0.1	2.1
0.2	2.8
0.3	3.7
0.4	4.3
0.5	4.9
0.6	5.6
0.7	6.3
0.8	6.8
0.9	7.5
1	8.2
1.1	8.6
1.2	9.1
1.3	9.5

En la gráfica se puede visualizar una tendencia lineal entre la corriente de excitación y la corriente en la salida del estator.

3.5.1.17 Parámetros del generador síncrono

Los parámetros del generador síncrono han sido obtenidos por el método aproximado, del ensayo en vacío y cortocircuito, los parámetros experimentales mostrados se presentan en el siguiente cuadro.

Tabla 6

Parámetros del generador síncrono

Parámetros	
Resistencia del inducido (R)	0.55 Ω
Reactancia síncrona (X_s)	1.13 Ω
Tensión inducida (E)	17.34 $\underline{17.05^\circ}$ V
Potencia activa (P)	150 W
Potencia reactiva (Q)	99 VAR
Potencia aparente (S)	180 VA
Par inducido (τ)	3.1 N.m

3.5.2 Esquema del controlador

Para desarrollar este objetivo de 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 lógic o lenguaje de contactos (KOP) y en diagrama de funciones (FUP), y la monitorización en tiempo real mediante la plataforma TÍA Portal, la comunicación y la conexión entre la computadora portátil y el autómatas programable se ha realizado mediante un cable ethernet que tiene un tipo de conector RJ45, que facilita el ajuste en línea de los parámetros para el control de este proceso.

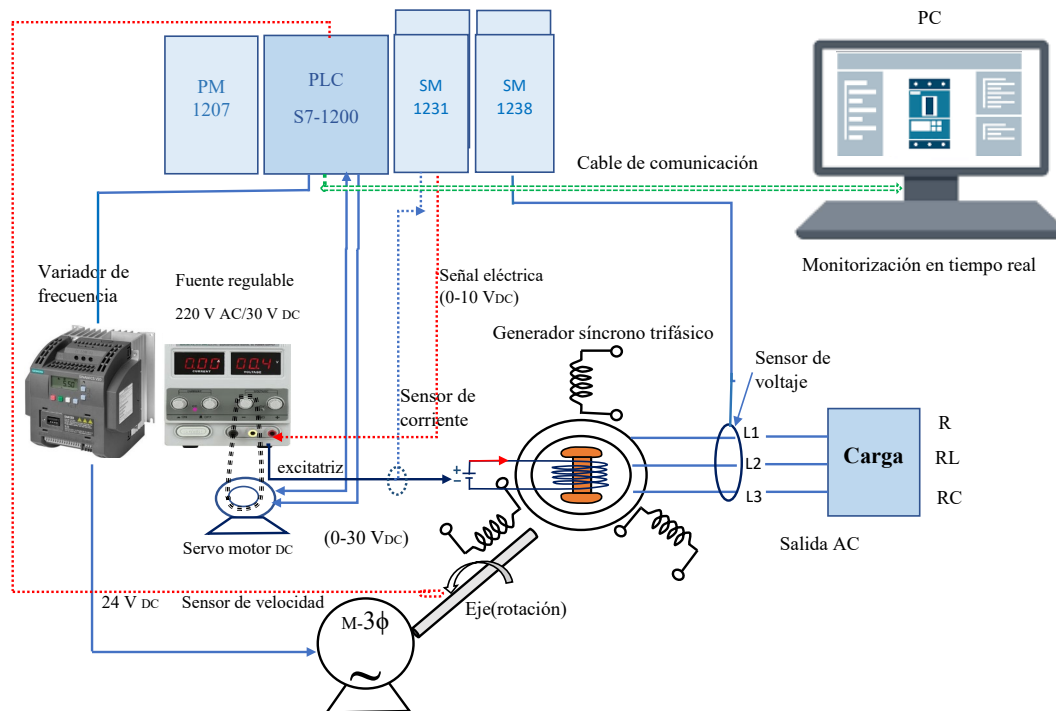


Figura 42. Esquema de Diseño de Regulador de Tensión

Al utilizar el computador laptop 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 TIA 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.

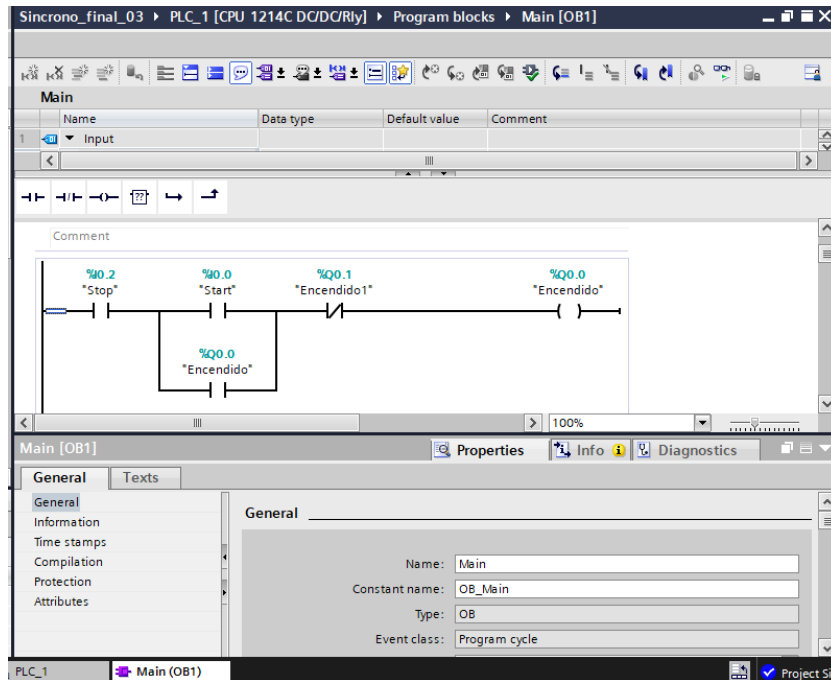


Figura 43. TIA Portal v17 Entorno de Programación

En la CPU del PLC S7-1200 contiene objeto tecnológico de controlador PID compact, STEP 7 ofrece las instrucciones PID continuo con optimización integrada. Para esta configuración se debe insertar el PID compact, en este trabajo se adapta el tipo de regulación general, existen tipos de regulación de temperatura, presión, longitud y caudal.

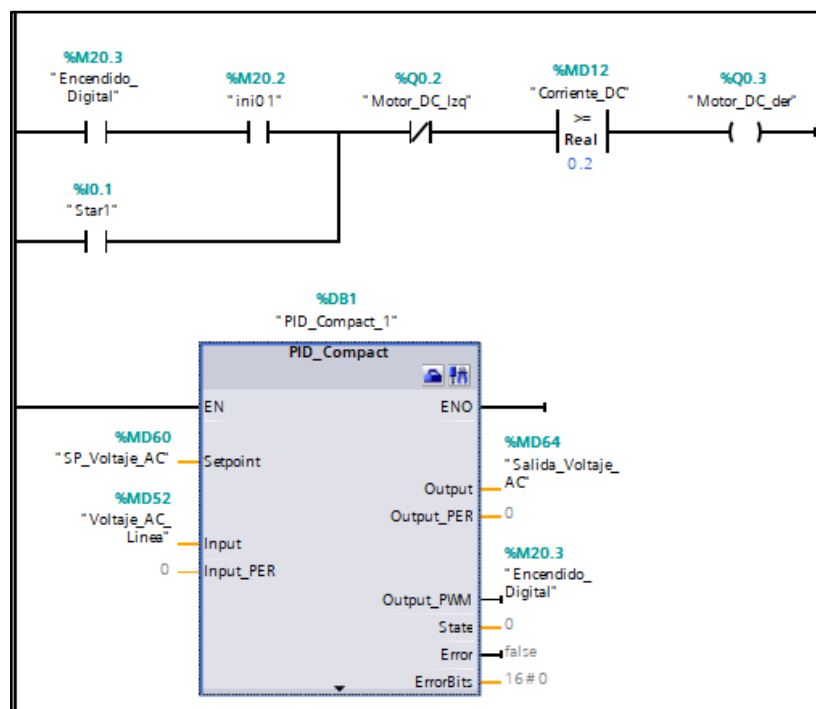


Figura 44. Programación y configuración del regulador PID en la regulación de tensión

En la figura se puede visualizar el esquema de la programación de control PID, en diagrama de funciones, son controladores que intentan alcanzar un comportamiento deseado del sistema de lazo de realimentación, dado por un modelo ideal.

Los tres parámetros de PID compact, son calculados de forma autónoma en el primer arranque, antes configurando para la optimización inicial. Los parámetros pueden optimizarse aún más mediante una optimización fina. No es necesario especificar los parámetros manualmente (Siemens, 2019).

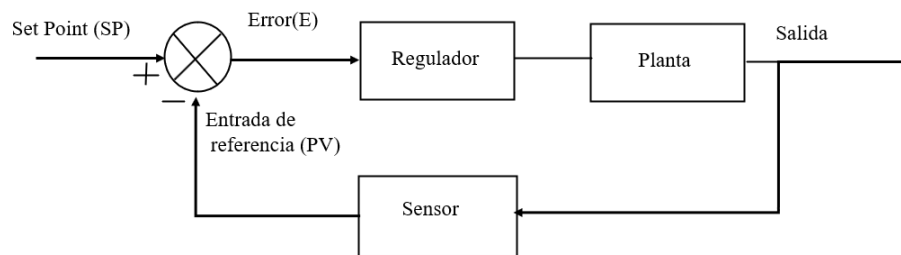


Figura 45. Diagrama de bloque del regulador PID

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.

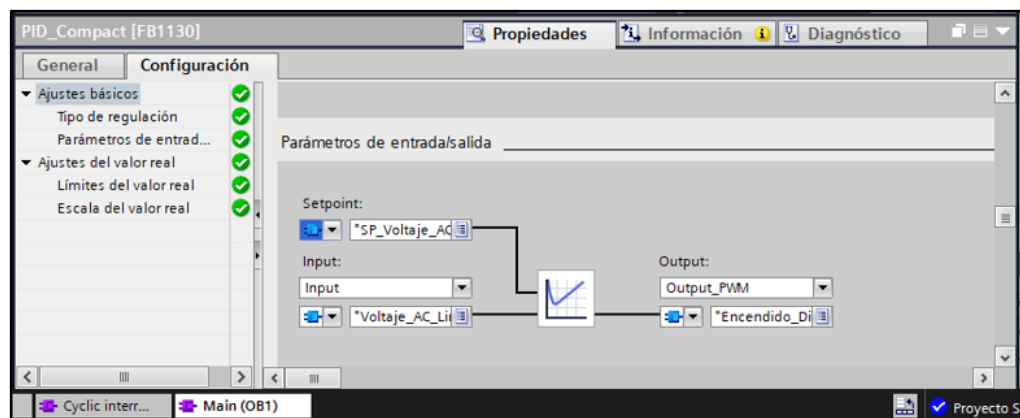


Figura 46. Configuración de las E/S del regulador PID en la regulación de tensión

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, de esta forma se regula la corriente de excitación controlado por la salida PWM o encendido digital como se puede ver en la figura 44.

3.5.2.1 Los algoritmos utilizados para la corrida del control PID Compact que dispone el PLC S71200

El algoritmo utilizado para la corrida de El 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. 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. en los reguladores PID, el valor de salida se compone de tres acciones:

En la ventana de configuración "Parámetros PID" se visualizan los parámetros PID. Durante la optimización los parámetros se adaptan al sistema regulado. No es necesario introducir los parámetros PID de forma manual.

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:

$$Y = K_p \left[(b.W - X) + \frac{1}{T_i.S} (W - X) + \frac{T_D.S}{a.T_D.S + 1} (C.W - X) \right] \quad (31)$$

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

$$T1 = a \times TD)$$

T_D : Tiempo derivativo

C: Ponderación de la acción D

a) Acción P

Proporciona un aporte a la salida proporcional a la diferencia entre valor de consigna SP y valor de proceso PV de regulación.

b) Acción I

De acuerdo al valor integral, el valor de salida aumenta en proporción a la duración de la diferencia entre la consigna SP y el valor de proceso PV o compensa al error de regulación.

c) Acción D

El valor de la salida aumenta como una función de la tasa de incremento de cambio de la diferencia entre la consigna SP y el valor de proceso PV, variación creciente de regulación. El valor real se iguala lo más rápidamente posible con la consigna. Si la velocidad de variación del error de regulación vuelve a reducirse, también lo hace la acción D.

Hay algunos aspectos interesantes sobre la ecuación de algoritmo PID especificada en el manual de sistema del S71200 de Siemens.

La ganancia proporcional, como hemos visto hasta ahora, afecta a los tres términos del algoritmo de control: proporcional integral y derivativo. si $K_p=0$. se anula el control PID

La ponderación de la acción proporcional (P), es un coeficiente que afecta exclusivamente al término proporcional.

En el algoritmo del manual del sistema se expresan los términos integral y derivativo por sus correspondientes transformada de Laplace. 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).

El gráfico siguiente muestra cómo entran los parámetros en el algoritmo PID

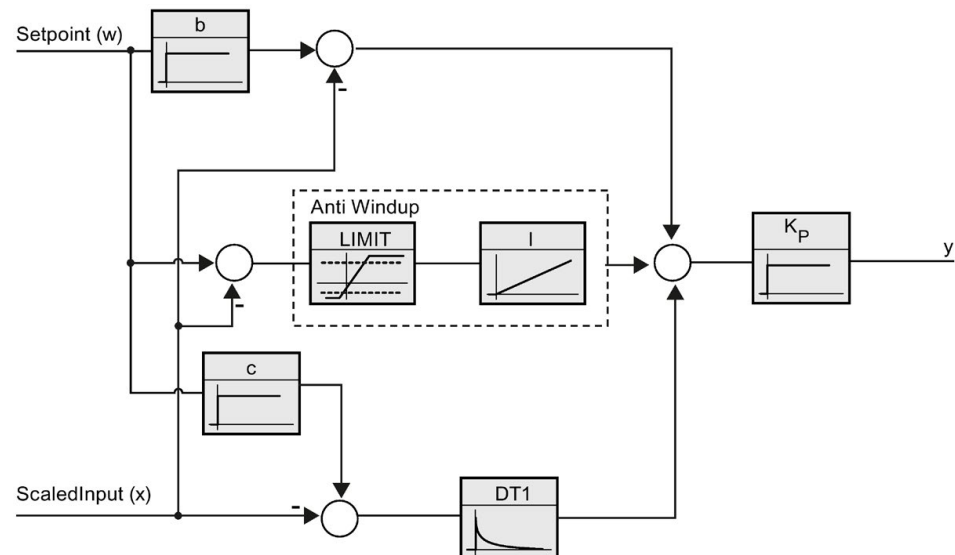


Figura 47. Entrada de los parámetros en el algoritmo PID

Fuente: Manual de funciones S71200-S71500 regulación PID, Pag. 93

Todos los parámetros PID son remanentes. Se introduce manualmente los parámetros PID, debe cargar PID_Compact por completo.

a) Ganancia proporcional

El valor indica la ganancia proporcional del regulador. PID_Compact no funciona con una ganancia proporcional negativa. El sentido de regulación se invierte en Ajustes básicos > Tipo de regulación.

b) Tiempo de integración

El tiempo de integración determina el comportamiento temporal de la acción I. La desconexión de la acción I se realiza con el tiempo de integración = 0,0. Si el tiempo de integración se modifica online en el modo de operación "Automático" de un valor cualquiera a 0,0, la acción I actual se borra y se produce un salto del valor de salida.

c) Tiempo derivativo

El tiempo de la acción derivada determina el comportamiento temporal de la acción D. La desconexión de la acción D se realiza con el tiempo derivativo = 0,0.

Coefficiente para el retardo de la acción derivada

El efecto de la acción D se retrasa mediante el coeficiente de retardo de la acción derivada. Retardo de la acción derivada = Tiempo derivativo x coeficiente de retardo de la acción derivada

- 0.0: la acción D solo surte efecto para un ciclo y, por ello, casi no es efectiva.
- 0.5: Este valor se ha acreditado en la práctica para sistemas regulados con una constante de tiempo dominante.
- 1.0: Cuanto mayor sea el coeficiente, más se retrasará el efecto de la acción D.

Tiempo de muestreo 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.

Si se utiliza Output_PWM, el tiempo de muestreo del algoritmo PID se utiliza como duración del periodo de la modulación por ancho de impulsos. La precisión de la señal de salida está determinada por la relación entre el tiempo de muestreo del algoritmo PID y el tiempo de ciclo del OB. Por eso se recomienda que el tiempo de ciclo sea como máximo una décima parte del tiempo de muestreo del algoritmo PID.

Regla para la optimización, en la lista desplegable "Estructura del regulador" seleccione si van a calcular los parámetros PI o PID.

- PID Se calcula durante la optimización inicial y la optimización fina del parámetro PID.
- PI Se calcula durante la optimización inicial y la optimización fina del parámetro PI.
- Definido por el usuario Si se han ajustado diferentes estructuras del regulador para la optimización inicial y la optimización fina en un programa de usuario, en la lista desplegable aparece "Definido por el usuario".

Una vez terminado las diferentes configuraciones, se hace la sintonización del controlador, poder visualizar los parametros de entrada y salida del PLC, tiene configurado a un tiempo de muestreo de 0.003 segundos, el controlador esta en modo automatico.

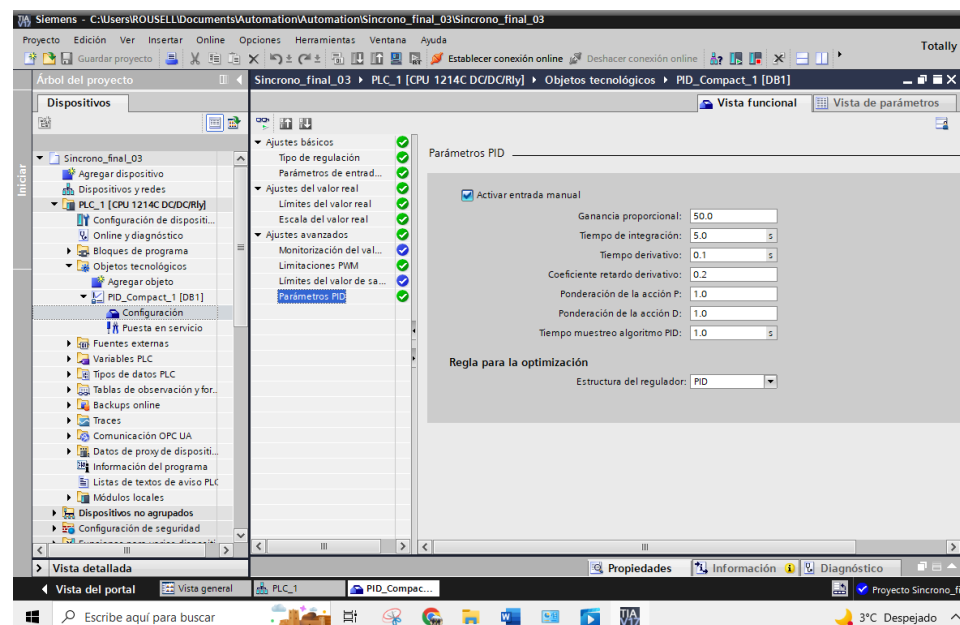


Figura 48. Las constantes del controlador PID_Compact en Of Line

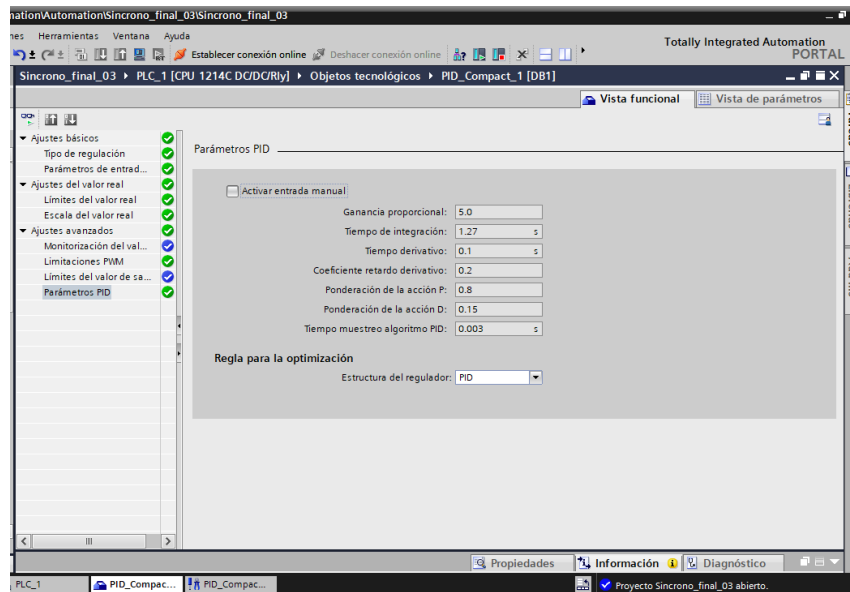


Figura 49. Parámetros del controlador PID On Line en una optimización fina

3.5.3 El sistema de control de frecuencia se desarrolló un esquema

Para desarrollar este objetivo de regulación de frecuencia se utilizó un variador de frecuencia marca SINAMICS-V20, que es controlado por el regulador, la realimentación se ha realizado mediante el sensor analógico taco generador inductivo, que censa la velocidad angular del eje del motor primario que impulsa al generador síncrono mediante una faja tipo V, dicha señal de la PV es adaptado por el controlador PLC, procesado y realimentado al proceso.

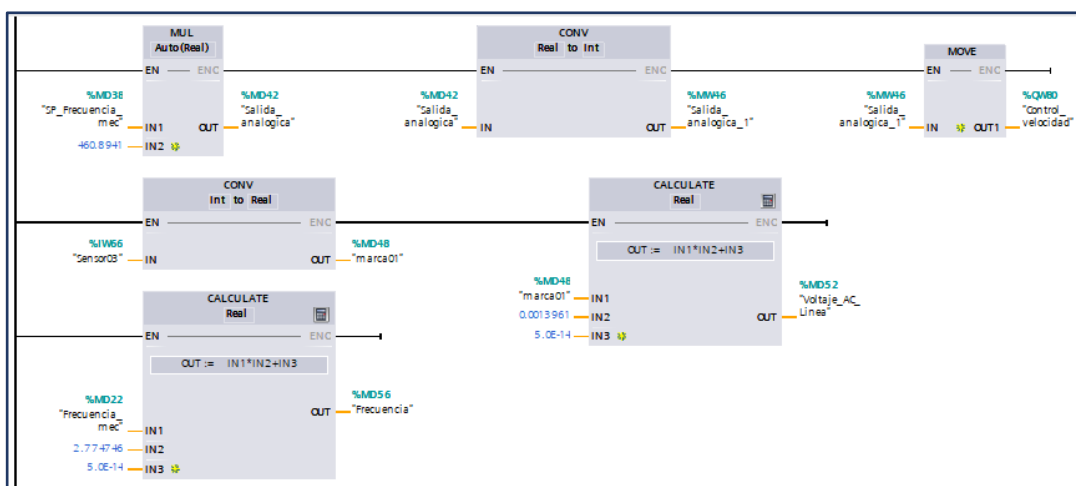


Figura 50. Programación para control de frecuencia eléctrica del generador síncrono

En el controlador PLC se ha sincronizado a una frecuencia del variador que es 20 Hz, para obtener una frecuencia eléctrica de 60 Hz en la salida del generador síncrono,

dicha configuración se realiza en tiempo real. obteniéndose una velocidad síncrona de 600 rad/s para un generador de 12 polos.

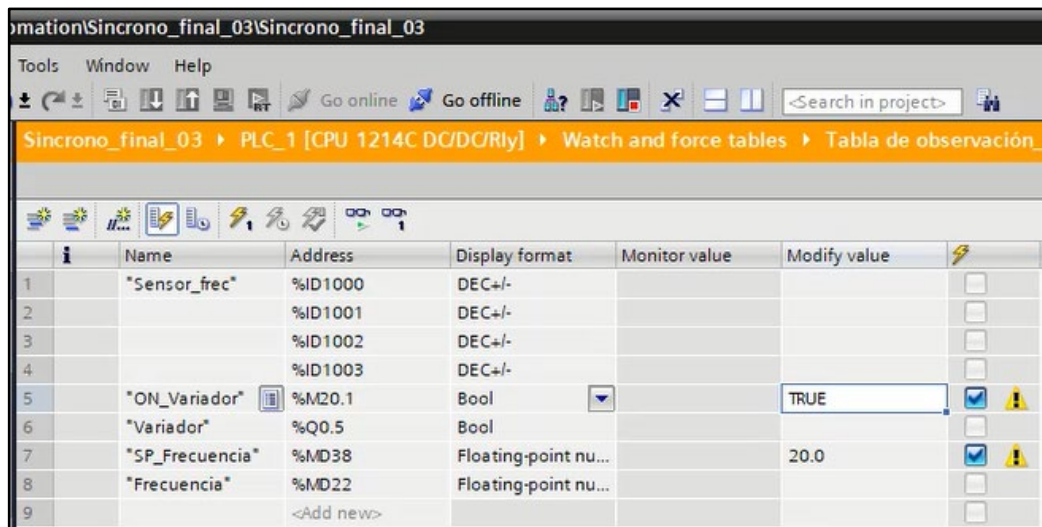


Figura 51. La frecuencia del variador es configurada a 20 Hz en el Interfaz TIA Portal

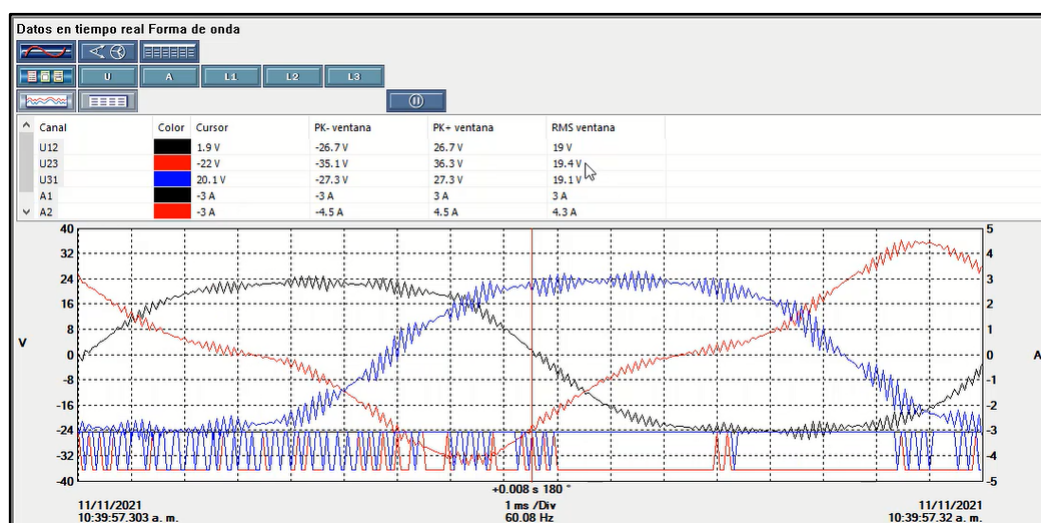


Figura 52. Frecuencia en la salida del Generador Síncrono es de 60.08 Hz

En la figura se visualiza las ondas de tensión de las tres fases en la salida del generador síncrono, visualizado en el interfaz del analizador de red CA 8335 Qualistar, el software de procesamiento Power Analyzer Transfer para la supervisar los parámetros en línea.

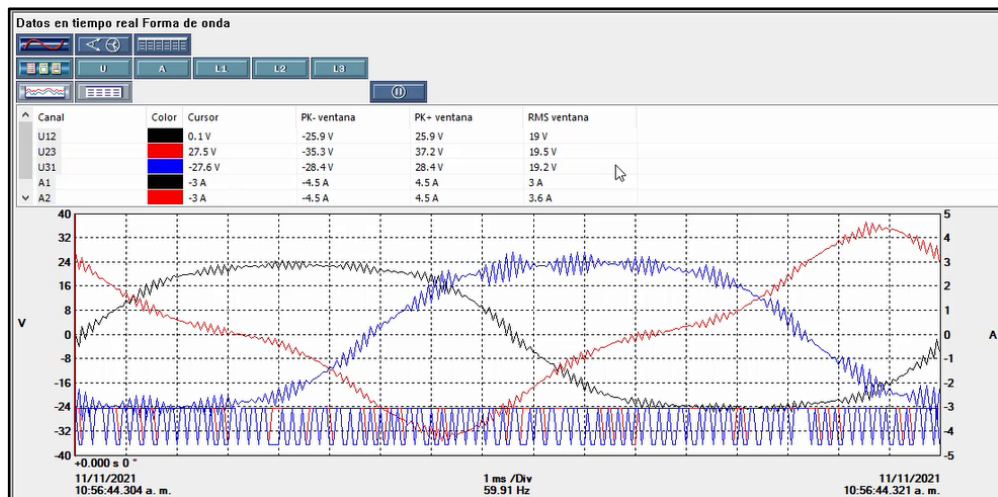


Figura 53. La frecuencia en la salida del generador síncrono a una frecuencia de 59.91 Hz

Como se puede observar en los gráficos anteriores la frecuencia oscila en valores próximo a la frecuencia nominal de 60 Hz, la frecuencia es regulado, configurando el controlador PID, para un valor de consigna o SP: de frecuencia eléctrica, como variable controlada CV: la frecuencia mecánica y PV como la frecuencia es la variable del proceso.

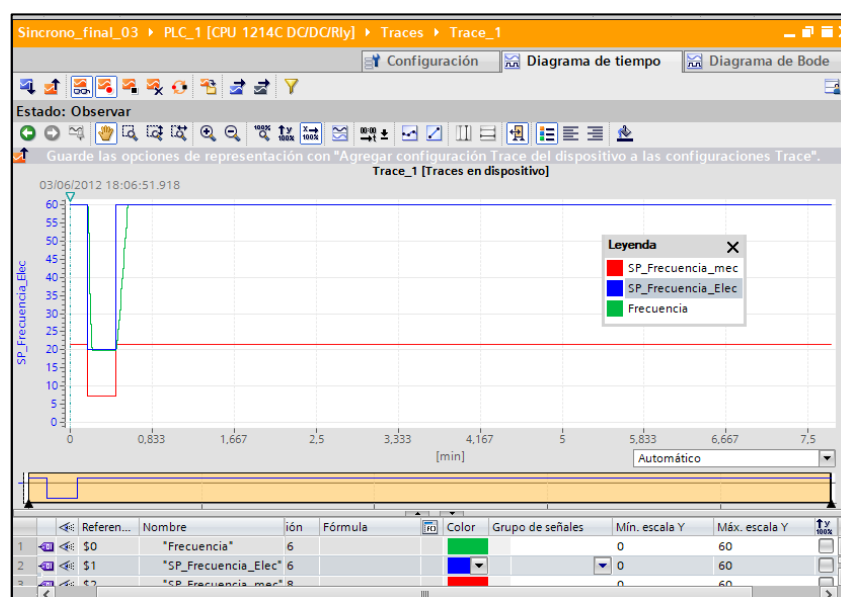


Figura 54. Regulación de frecuencia a 60 Hz en la salida del generador

En la figura se puede observar que el SP frecuencia eléctrica es la línea de color azul el valor de consigna, la señal de la línea verde es la PV señal de respuesta que a una señal de escalón alcanza la consigna después de un tiempo, como se puede observar, una vez alcanzado la optimización de los parámetros del controlador, la frecuencia se mantiene constante.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se describe los resultados obtenidos en las diferentes etapas desde el diseño, montaje y las pruebas en el módulo de regulación de tensión y control de frecuencia

4.1 Sistema de regulación de tensión de un generador síncrono

Mediante el uso de transductor los parámetros de tensión de línea son adaptados por el microcontrolador, que envían las señales de control para ajustar la corriente de campo del rotor por medio del sistema de regulación de tensión, utilizando una fuente de alimentación de corriente continua variable para magnetizar el devanado de campo, los parámetros son monitoreados en tiempo real en la computadora mediante la plataforma de Tía portal dando robustez al sistema de generación.

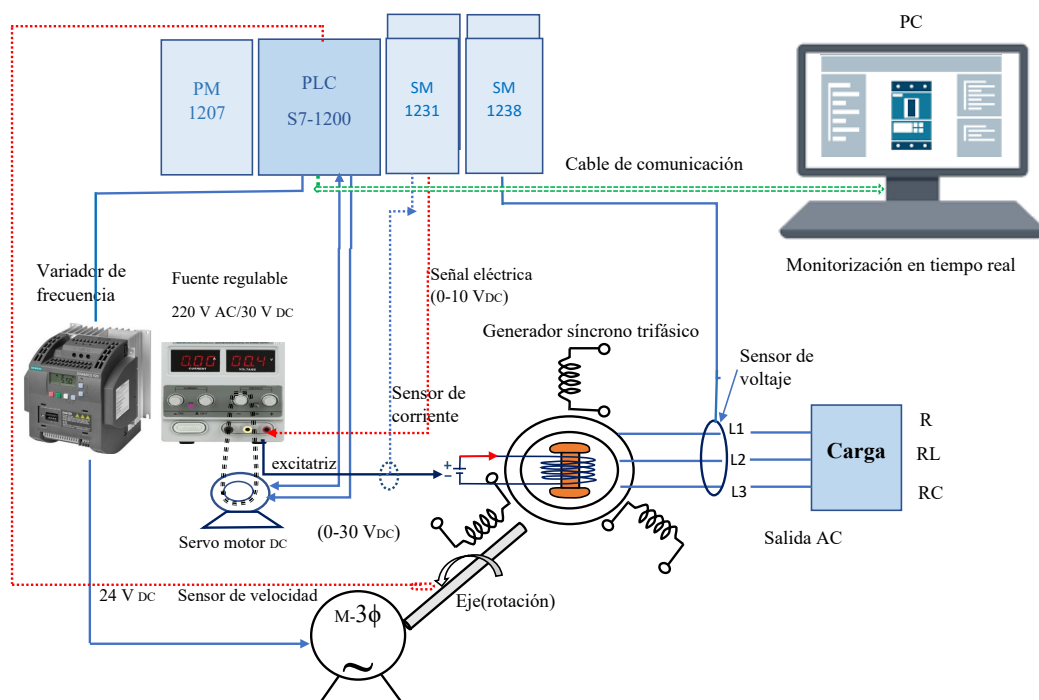


Figura 55. Sistema de regulación de tensión y frecuencia de un generador

4.2 Se determina el sistema control PID de tensión para un generador síncrono

Para la regulación de tensión de esta investigación se utilizó el control PID compact que contiene el PLC S7-1200 Siemens, que se adapta para controlar la tensión de salida en el generador síncrono y la frecuencia, el generador funciona en forma aislada.

Tabla 7

Parámetros temporales de tensión visualizados 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

Respuesta del controlador a una carga resistiva de 75 vatios, se puede visualizar en la gráfica que se presenta a continuación.

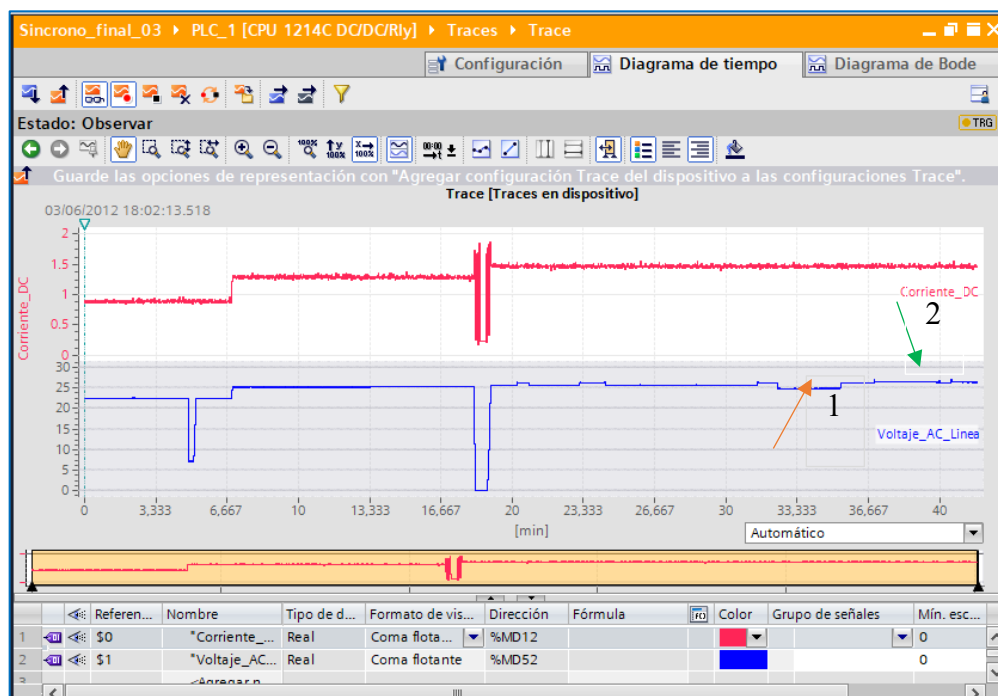


Figura 56. Regulación de tensión de línea AC y control de corriente de excitación

En la figura se puede observar la variación de tensión en la salida del estator:

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

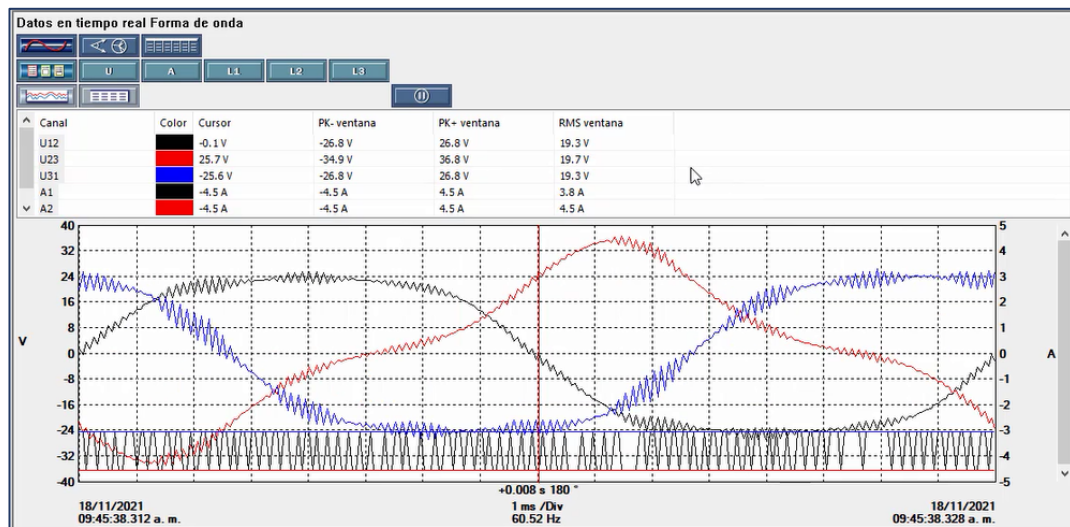


Figura 57. Perfil de tensión en la salida del generador en vacío con carga resistiva 75W

Como se puede observar en la figura 53 y figura 54, para una carga resistiva de 75 vatios hay una caída de tensión de más de 1 voltio.

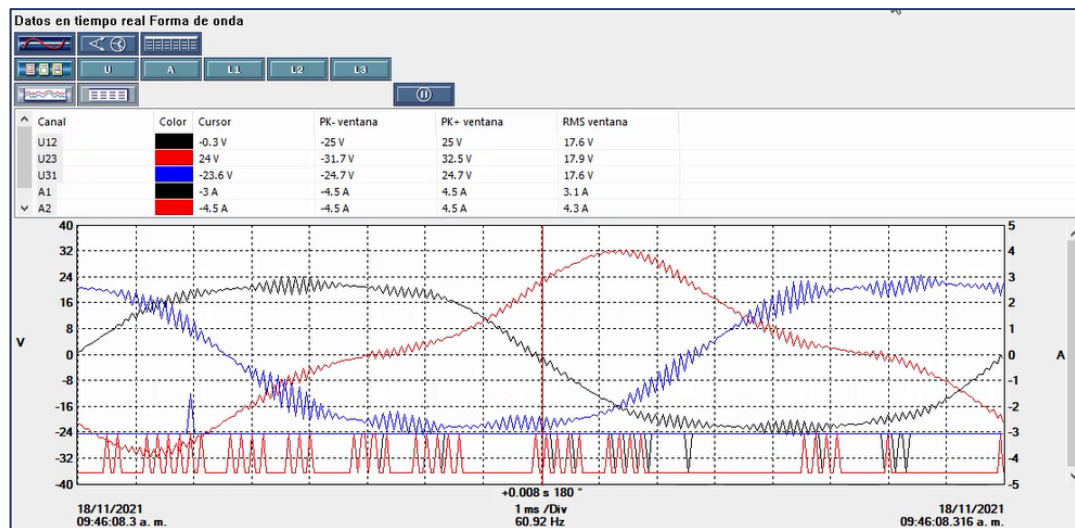


Figura 58. Perfil de tensión en el estator del generador con carga resistiva 75 W

Para cargas inductivas en el punto 1 se puede observar que la carga inductiva pura 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, ver datos detallados en la figura 56, y anexo 14.

Para las cargas capacitivas en la gráfica se puede visualizar en el punto 2, se genera un efecto contrario al anterior, significa que las cargas capacitivas ayudan a las f.e.m. de inductor generando un efecto magnetizante en el campo de los polos, 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, se utilizó un capacitor de 4 μ f, de 250 Voltios.

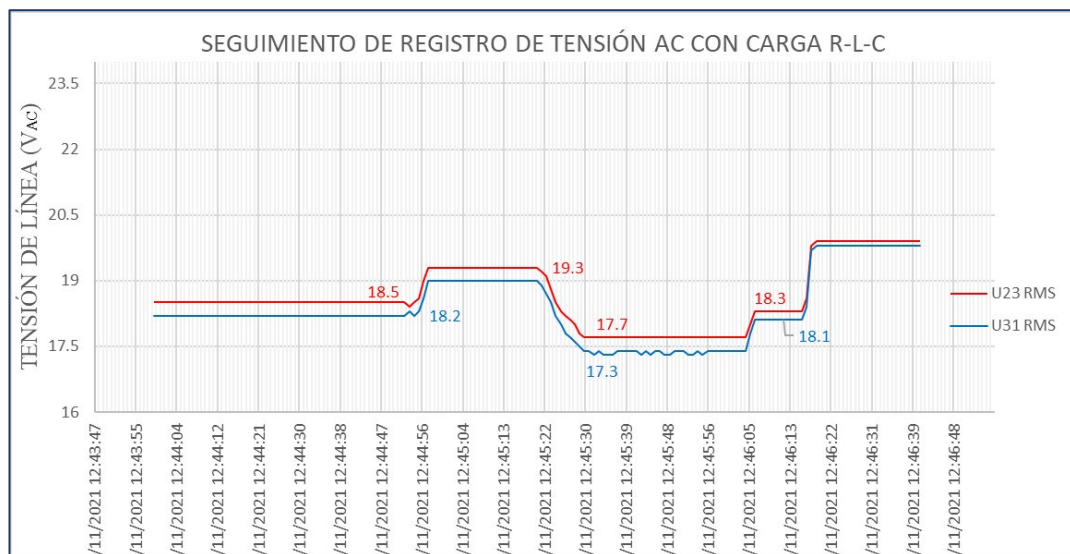


Figura 59. Registro de la variación de tensión para las cargas R-L-C

ID	Nombre	Dirección	Formato visualiza..	Valor de observac..	Valor de forzado	Comentario
1	*Sensor_freq*	%ID1000	DEC+/-	0		
2		%ID1001	DEC+/-	0		
3		%ID1002	DEC+/-	0		
4		%ID1003	DEC+/-	0		
5	*ON_Variador*	%M20.1	BOOL	TRUE	TRUE	⚠
6	*Variador*	%Q0.5	BOOL	TRUE		
7	*Voltaje_AC_Linea*	%MD52	Número en coma...	22.34039		
8	*Corriente_DC*	%MD12	Número en coma...	0.8687019		
9	*Frecuencia*	%MD56	Número en coma...	59.9315		
10	*SP_Voltaje_AC*	%MD60	Número en coma...	24.0	24.0	⚠
11	*Corriente_AC*	%MD72	Número en coma...	0.06076336		
12	*SP_Frecuencia_El..	%MD76	Número en c...	60.0	60.0	⚠
13	<Agregar>					

Figura 60. Parámetros de entrada al controlador PID Compact

En la gráfica se observa los parámetros de entrada al controlador tanto de frecuencia como de SP de tensión y la corriente de excitación, la supervisión de los parámetros se visualiza en tiempo real.

4.3 Evaluar el sistema de control de frecuencia de 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 analógico de proximidad como taco generador, para detectar el número de vueltas que gira el motor primario.

Para la gestión de los bloques de sistema de controlador PID de frecuencia se ha configurado en el microcontrolador PLC S71200 Siemens, con unidad central de proceso CPU 1214, 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.

Tabla 8

Parámetros temporales de frecuencia

Valor deseado	Valor de respuesta
SP: Frecuencia Eléctrica	60
PV: Frecuencia	60.08614

En esta tabla se muestra el valor inicial de entrada SP de la frecuencia y el valor de la variable del proceso PV, son los parámetros que se visualiza en el panel de interfaz de Tía Portal, estos datos se ajustan automáticamente con el control PID compact, configurando antes en modo automático.

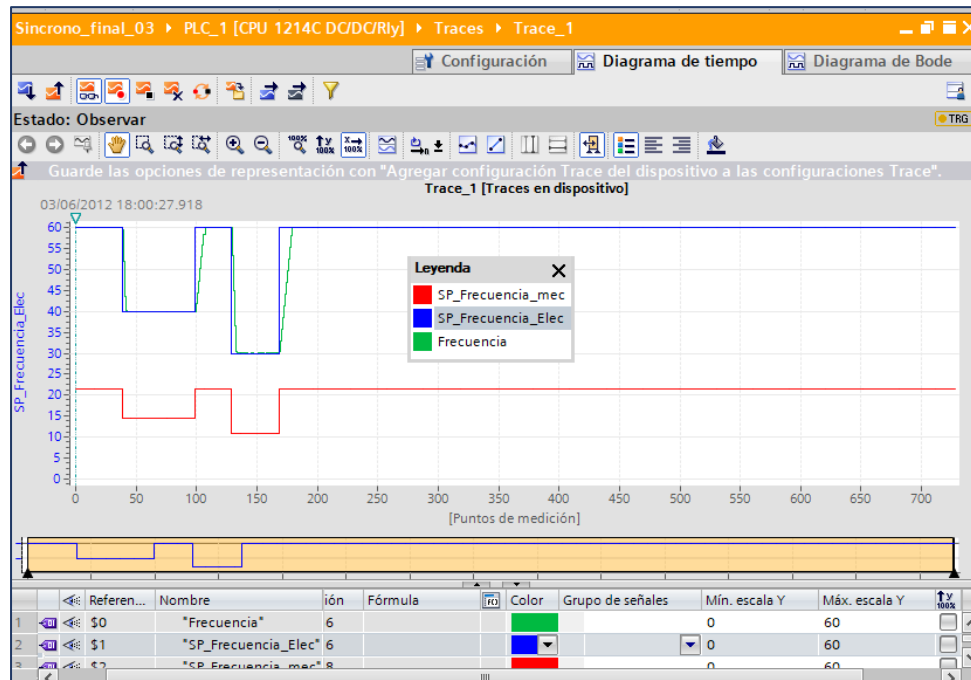


Figura 61. Regulación de frecuencia con una optimización fina para una carga de 75 W

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 60 Hz, en el primer impulso no logra a estabilizar la frecuencia al SP, en el segundo impulso alcanza una estabilidad la frecuencia nominal, este comportamiento es a una carga resistiva de 75 W

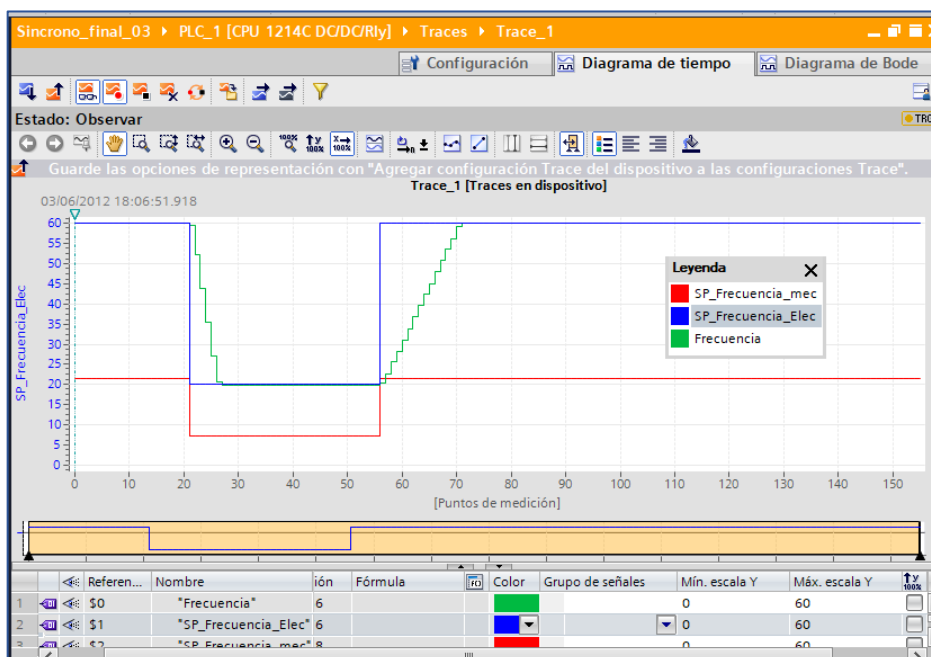


Figura 62. Respuesta al escalón del controlador PID para una carga de 300 W



Una vez que el controlador ya sintonizado anteriormente ya tiene los parámetros almacenados, porque es un proceso interno dentro de la CPU del PLC, para la carga resistiva de 300 vatios en la figura anterior se puede observar que la frecuencia alcanza el SP en el primer impulso.

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 como se puede ver en la figura.

Este sistema de controlador PID se encargó de controlar la corriente de excitación, para regular la tensión ante una posible variación de carga, siendo la carga experimental, resistivo inductivo y capacitivo.

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.

CONCLUSIONES

Se logro con el diseño y la implementación del módulo, 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 la reactancia síncrona $X_s=1.13 \Omega$. También se ha realizado las pruebas del generador funcionando con carga resistiva, con carga inductiva y capacitiva pura.

En el módulo de regulación de tensión se ha logrado regular la 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 seria la diferencia de esos dos valores $E=0.08614$, es el valor con que ajusta el controlador.



RECOMENDACIONES

Para las futuras investigaciones en el área de generación de energía, se recomienda:

Se recomienda que se trabaje con un generador síncrono con datos en la placa, para que no se tenga problemas en el momento de las pruebas, para que se pueda obtener los parámetros de salida nominales o estandarizados que facilite en encontrar datos aproximados.

También es recomendable hacer un estudio más profundizado, sobre la regulación de tensión, en estos últimos años la tendencia mundial es en la inserción de la energía renovable, como generación distribuida, crecimiento de demanda, conexión de cargas no lineales, crecimiento de parque industrial, genera problemas de mala calidad de tensión e inestabilidad en el sistema.

Es también importante considerar, que para los ensayos en laboratorio se utilice equipos de medición calibrados, para que se pueda obtener datos confiables.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahcene, F., & Bentarzi, H. (2020). *Automatic Voltage Regulator Design Using Particle Swarm Optimization Technique. 1*, 0–5.
- Arnoux, C. (2012). *Manual de instrucciones de analizador de redes eléctricas trifásicas* (Chauvin Arnoux Ibérica S.A. (ed.); Ed. 1). <http://www.chauvin-arnoux.com>
- Atwa, O. S. E. (2019). Generators and Motors: Theory and Testing. In *Practical Power System and Protective Relays Commissioning* (pp. 31–47). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816858-5.00004-6>
- Batmani, Y., & Golpîra, H. (2019). Automatic voltage regulator design using a modified adaptive optimal approach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 104(May 2018), 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.001>
- Bevrani, H., Golpîra, H., Messina, A. R., Hatziargyriou, N., Milano, F., & Ise, T. (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.epsr.2021.107114>
- Blondin, M. J., Sicard, P., & Pardalos, P. M. (2019). Controller Tuning Approach with robustness, stability and dynamic criteria for the original AVR System. *Mathematics and Computers in Simulation*, 163, 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.02.019>
- Boldea, I. (2016). *Synchronous generators* (2da Ed.). CRC Press.
- Bolton, W. (2001). Ingeniería de control. In *AlfaOmega* (2da .Ed). Barcelona.
- Breeze, P. (2017). Introduction to Electricity and the Environment. In *Electricity Generation and the Environment* (pp. 1–11). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101044-0.00001-9>
- Breeze, P. (2018). Hydropower Generators. In *Hydropower* (pp. 47–52). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812906-7.00005-3>
- Chapman, S. J. (2012). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS* (S. A. D. C. V. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES (ed.); Quinta edi). The McGraw-Hill Companies.
- Chatterjee, A., Mukherjee, V., & Ghoshal, S. P. (2009). Velocity relaxed and craziness-based swarm optimized intelligent PID and PSS controlled AVR system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 31(7–8), 323–333.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.03.012>
- Cheema, K. M., Milyani, A. H., El-Sherbeeney, A. M., & El-Meligy, M. A. (2021). Modification in active power-frequency loop of virtual synchronous generator to improve the transient stability. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 128(January), 106668. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106668>
- Chen-Ching, L., Khoy, T., & Yixin, Y. (2000). Generators. In R. C. Dorf (Ed.), *Electrical Machine* (Boca Raton, p. 42).
- Demillon, R., & Leal, H. (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. <https://www.ecorfan.org/taiwan/>
- Diaz-Rodriguez, I. D., Oliveira, V. A., & Bhattacharyya, S. P. (2015). Modern design of classical controllers: Digital PID controllers. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2015-Sept(5), 1010–1015. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2015.7281610>
- Efendi, M. Z., Dwi Murdianto, F., & Baweani, H. N. (2019). Robustness Analysis of PID-Cuckoo Search Algorithm to Voltage Control in Three Phase of Synchronous Generator with Dynamic Load Condition. *2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications, IES-ETA 2018 - Proceedings*, 133–138. <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2018.8615486>
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery Fundamentals - 6th ed.*
- Fjarstedt, E. (2019). *Implementation of an Automatic Voltage Regulator for Synchronous Machines on an FPGA* [UPPSALA UNIVERSITET]. [https://doi.org/ISSN: 1654-7616, UPTEC E 19013](https://doi.org/ISSN:1654-7616,UPTEC%20E%2019013)
- Fraile, J. (2008). *Máquinas eléctricas* (S. A. U. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA (ed.); 6ta. Ed).
- Gaing, Z.-L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384–391. <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.821821>
- Gerling, D. (2015). *Electrical Machines* (Springer (ed.)).
- Grover, H., Verma, A., & Bhatti, T. S. (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, R. (2010). Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicación y simulación con MATLAB. In *Pearson Educación de México* (1st ed., Vol. 01, Issue 01). https://dlscrib.com/download/introducci-oacute-n-a-los-sistemas-de-control-conceptos-aplicaciones-y-simulaci-oacute-n-con-matlab-ricardo-hern-aacute-ndez-gavi-ntilde-o_58a76d906454a7d052b1e929_pdf
- Huang, X., Liu, Y., Liao, Y., Jiang, Z., He, J., & Li, Y. (2018). Multiple Energy Complementation. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 1–6.
- Jerković Štil, V., & Mehmedović, M. (2018). Interconnection and damping assignment automatic voltage regulator for synchronous generators. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *101*(September 2017), 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.03.022>
- Jittapramualboon, S., & Assawinchaichote, W. (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>
- Khrushchev, Y. V., Khrushchev, I. Y., Prokhorov, A. V., Belyaev, N. A., & Vasiliev, A. S. (2020). Programmed trajectory motion control for synchronous generators. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *119*(September 2019), 105884. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105884>
- Krishna, V. . M., Sandeep, V., Murthy, S. S., & Yadlapati, K. (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*, 431–441. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.06.051>
- Kumar, L., kumar, P., Satyajeet, & Narang, D. (2018). Tuning of Fractional Order PI λ D μ Controllers using Evolutionary Optimization for PID Tuned Synchronous Generator Excitation System. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(4), 859–864. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.121>
- Kumavat, M., & Thale, S. (2022). *Analysis of CSTR Temperature Control with PID* ,

- MPC & Hybrid MPC- PID Controller*. 01001, 1–7.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1051/itmconf/20224401001>
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control* (N. J. Balu & M. G. Lauby (eds.); McGraw-Hil). <http://www.loc.gov/catdir/toc/mh022/93021456.html>
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático* (7ma.Ed.). Prentice Hall Inc. Copyright MCMXCV.
- László, R. B., & Jenő, C. B. (2017). *Control Engineering* (Springer). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-8297-9>
- Ledesma, P. (2020). *Análisis dinámico y control de sistemas eléctricos* (1ra. Ed). Universidad Carlos III de Madrid.
- Londoño, P., & Milena, S. (2005). Utilización de una técnica adaptativa en el control de la excitación de una máquina síncrona. *Redalyc.Org*, 9. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021014007>
- Luis, F., & Moncayo, G. (2020). *Instrumentación y control de procesos* (Ediciones UNL (ed.); 3a ed.).
- Mandali, A., Dong, L., & Morinec, A. (2020). Robust Controller Design for Automatic Voltage Regulation. *Proceedings of the American Control Conference, 2020-July*, 2617–2622. <https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147208>
- Modabbernia, M., Alizadeh, B., Sahab, A., & Moghaddam, M. M. (2020). Robust control of automatic voltage regulator (AVR) with real structured parametric uncertainties based on H_{∞} and μ -analysis. *ISA Transactions*, 100, 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.01.010>
- Murray, W., Adonis, M., & Raji, A. (2021). Voltage control in future electrical distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146(August 2020), 111100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111100>
- Murty, P. S. R. (2017). Chapter 22 - Synchronous Machine. In P. S. R. B. T.-E. P. S. Murty (Ed.), *Electrical Power Systems* (pp. 701–730). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101124-9.00022-X>
- Nahas, N., Abouheaf, M., Sharaf, A., & Gueaieb, W. (2019). A Self-Adjusting Adaptive AVR-LFC Scheme for Synchronous Generators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(6), 5073–5075. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2920782>
- Nguyen, N. H., & Nguyen, P. D. (2018). Overshoot and settling time assignment with PID for first-order and second-order systems. *IET Control Theory and Applications*,

- 12(17), 2407–2416. <https://doi.org/10.1049/IET-CTA.2018.5076>
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna* (3ra Ed.). PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A.
- Padiachy, V., Mehta, U., Azid, S., Prasad, S., & Kumar, R. (2021). Two degree of freedom fractional PI scheme for automatic voltage regulation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.08.003>
- Park, S. H., Lee, S. K., Lee, S. W., Yu, J. S., Lee, S. S., & Won, C. Y. (2009). Output voltage control of a synchronous generator for ships using compound type digital AVR. *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, 417–421. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5352002>
- Pham, D. A., Essounbouli, N., Noller, F., & Hamzaoui, A. (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)*, 1–6.
- Rodríguez, M. (2015). *Máquinas Eléctricas I - G862*.
- Roy, T. K., Mahmud, M. A., M.T. Oo, A., & Pota, H. R. (2017). Nonlinear Adaptive Backstepping Excitation Controller Design for Higher-Order Models of Synchronous Generators. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 4368–4373. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.879>
- Salih, A. M., Humod, A. T., & Hasan, F. A. (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, T. (2017). A survey on industry impact and challenges thereof. *IEEE Control Systems*, 37(1), 17–18. <https://doi.org/10.1109/MCS.2016.2621438>
- Sanampudi, N., & Kanakasabapathy, P. (2019). Integrated voltage control and frequency regulation for stand-alone micro-hydro power plant. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 5027–5031. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.403>
- Santos, R. R. R. ;, & Navas, D. M. (2017). *Generadores Sincronos En Paralelo*. September, 0–11.
- Shayeghi, H., Shayanfar, H. A., Safari, A., & Aghmasheh, R. (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. (2018). *Manual de sistema, V4.2.3, 08/2018, A5E02486683-AL* (2019th ed.).
- Siemens AG. (2019). *Manual de funciones Regulación PID* (Siemens.com (ed.)).
- Uluocak, İ., & Yavuz, H. (2022). Artificial Intelligence Based PID Controller for an Eddy Current Dynamometer. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 33(2), 1229–1243. <https://doi.org/10.32604/iasc.2022.023835>
- Vukosavic, S. N. (2013). *Electrical Machines* (Springer (ed.)). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0400-2>
- Wang, L. (2020). *PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink* (1a ed.). WILEY.

ANEXOS

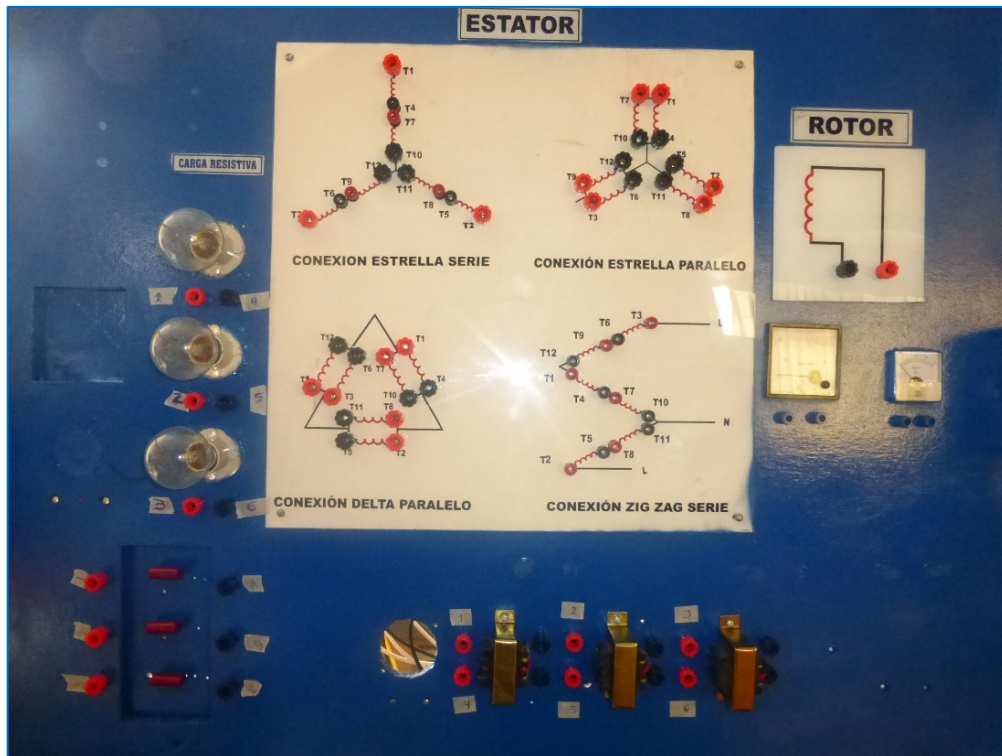
Anexo 1. Sistema de generación síncrono y el motor primario



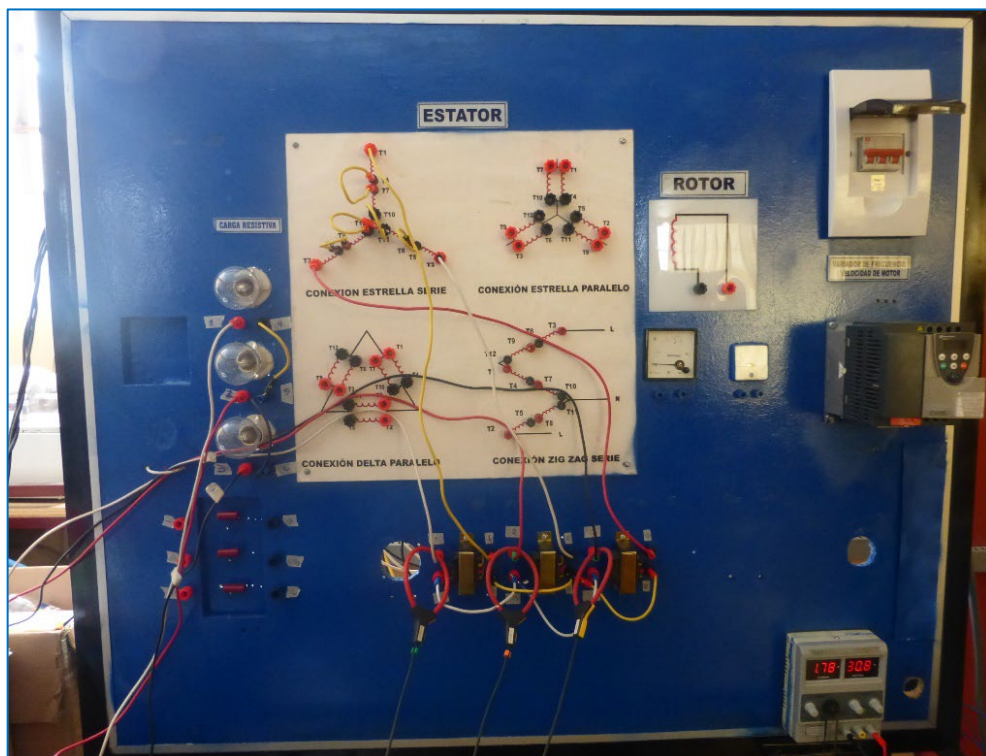
Anexo 2. Módulo de control PLC S71200 para implementar el PID y el variador



Anexo 3. Módulo de regulación en la etapa de acondicionamiento de componentes



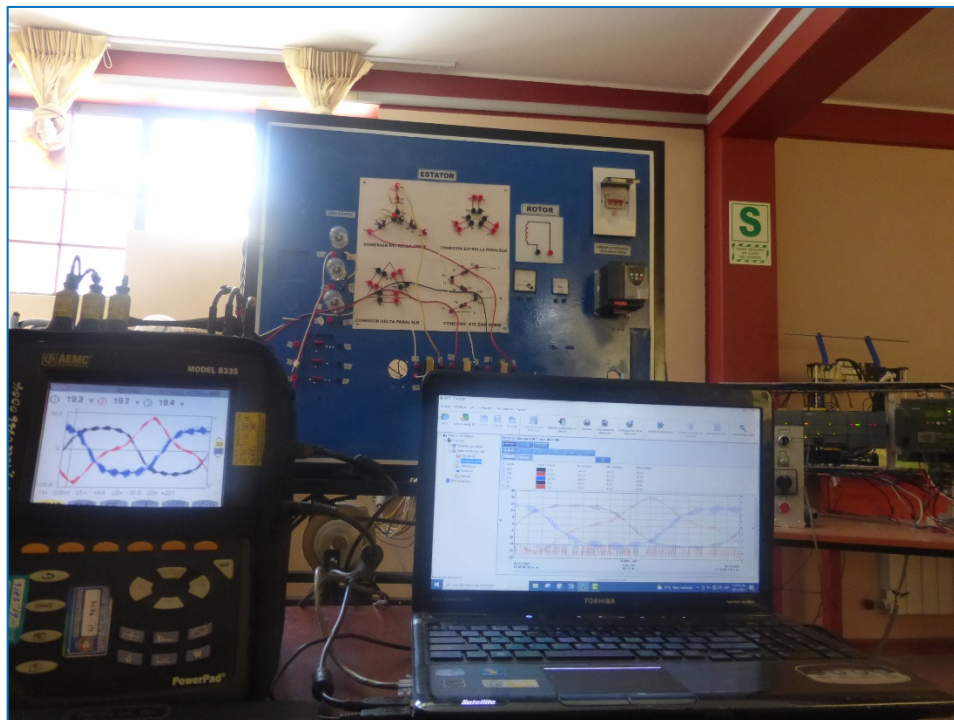
Anexo 4. Configurado y cableado de circuito para el ensayo



Anexo 5. Módulo de control terminado en operación



Anexo 6. Monitorización en línea de la regulación de tensión y frecuencia



Anexo 7. Servomotor que regula la corriente de excitación



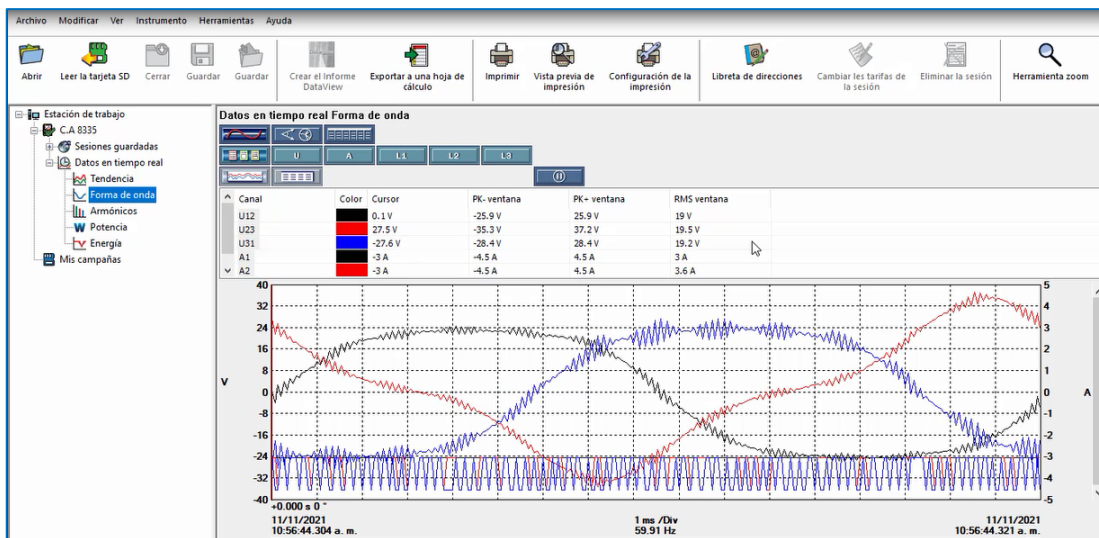
Anexo 8. Analizador de red y sus accesorios como sensor de corriente y tensión



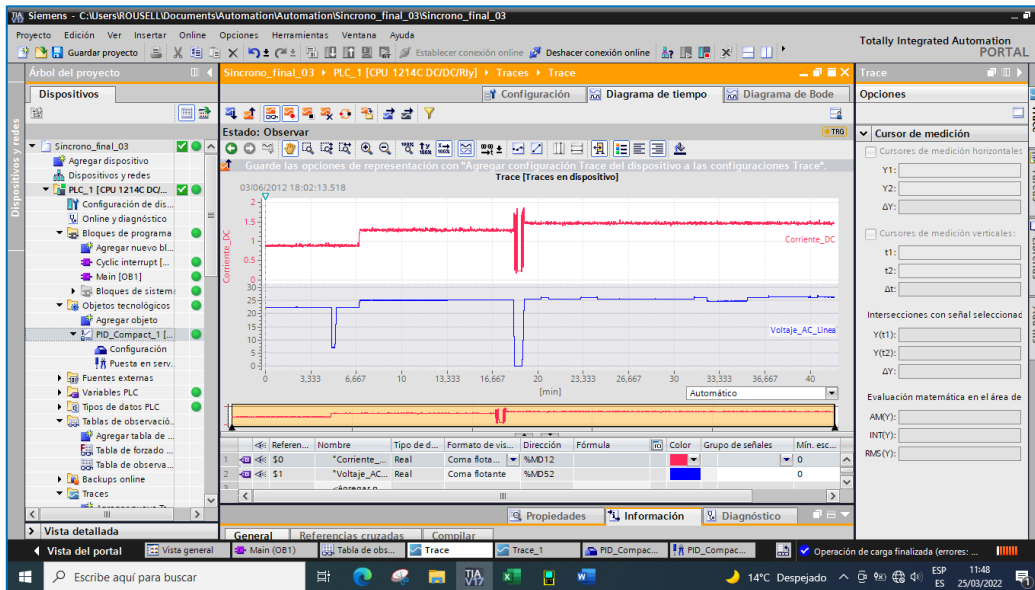
Anexo 9. Pinza amperímetro Fluke para la toma de medición de la corriente y tensión



Anexo 10. Registro y visualización en línea de la tensión y corriente



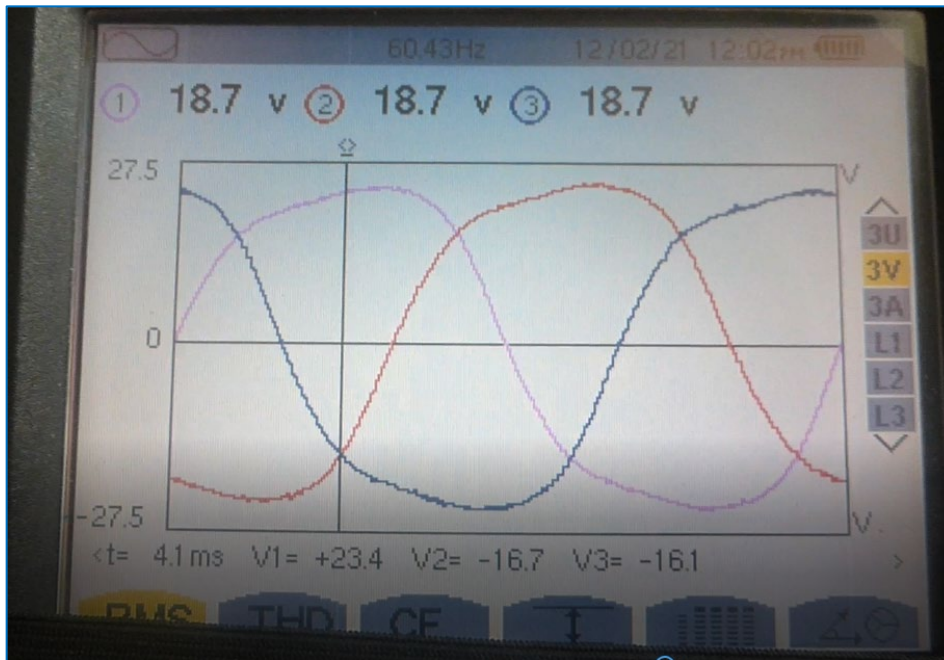
Anexo 11. Perfil de tensión regulado y la corriente de excitación



Anexo 12. Datos registrados en tiempo real de la regulación de tensión y frecuencia

Nombre	Dirección	Formato visualiza.	Valor de observ.	Valor de alarma
Sensor_freq	%ID1000	DEC+-	0	
	%ID1001	DEC+-	0	
	%ID1002	DEC+-	0	
	%ID1003	DEC+-	0	
ON_Variador	%M20.1	BOOL	TRUE	TRUE
Variador	%Q0.5	BOOL	TRUE	TRUE
Voltaje_AC_Linea	%MD52	Número en coma	22.50094	
Corriente_DC	%MD12	Número en coma	0.8954564	
Frecuencia	%MD56	Número en coma	60.08614	
SP_Voltaje_AC	%MD60	Número en coma	24.0	24.0
Corriente_AC	%MD72	Número en coma	0.05208288	
SP_Frecuencia_EI	%MD76	Número en c...	60.0	60.0

Anexo 13. Tensión en la salida del generador registrado por el analizador



Anexo 14. Importación de los datos registrados en el analizador al formato Excel

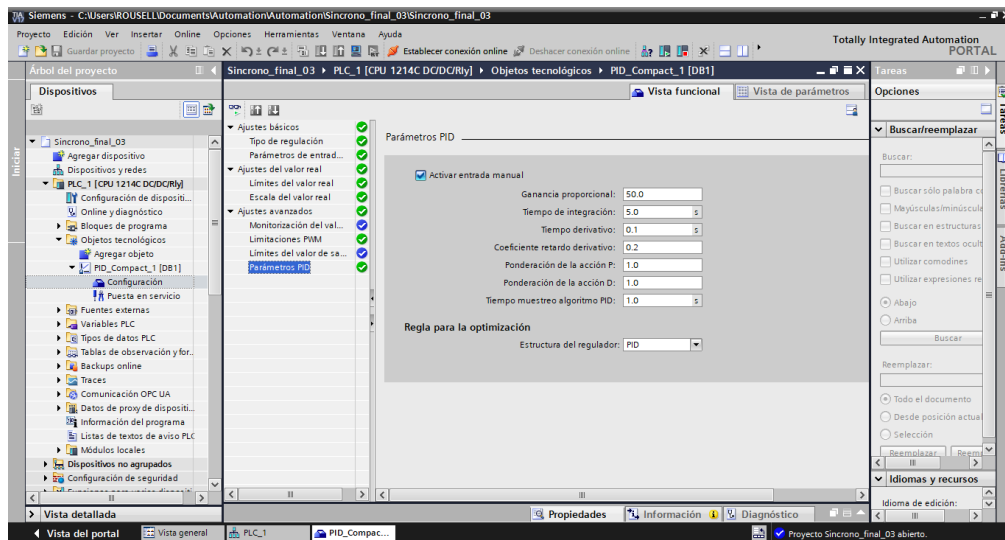
	A	B	C	D	E	F	G
1	Información Config						
2	C.A 8335	Número de serie del instrumento	211078	Rev. material 1.1.1.1	Firmware 4.3		
3							
4	Dia de inicio	Hora de inicio	Dia de fin	Hora de fin			
5	25/11/2021	12:39:11	25/11/2021	12:46:42			
6							
7	Tipo de conexión	Trifásica 3 hilos 3 vatímetros					
8	Sensores	A193/MA193 AmpFLEX (6500 A)					
9	Cálculo de valores reactivos Q (var) o N (var)	Q: Separado (sin los armónicos)					
10	Distorsión armónica de la fase	Valor de la fundamental como referencia (%)					
11	Flicker de larga duración (Plt)	Ventana deslizante					
12	Factor K del transformador	k = 1.7 e = 0.10					
13	Relación de las corrientes	1:1					
14	Ratio de las tensiones entre fases	1:1					
15	Agregación	1 s					
16	Medidas U guardadas	CF, RMS, THDr, THDf, DC, pk+, pk-					
17	Medidas V guardadas	Pst, PIt					
18	Medidas A guardadas	CF, FHL, RMS, THDr, THDf, unb (u2), FK, DC, pk+, pk-					
19	Otras medidas guardadas	Cos φ (DPF), F, PF, Tan φ, S (VA), Q (var), P (W), P DC (W), D (var)					
20	Armónicos U guardados	0 - 50					
21	Armónicos A guardados	0 - 50					
22	Armónicos S (VA) guardados	0 - 50					
23							
24							
25							
26							

Anexo 15. Datos registrados en el analizador de la tensión RMS en la salida

Registrando		U23 RMS	U31 RMS	lexc
Fecha:	Hora:			
25/11/2021	12:44:56	19	18.6	
25/11/2021	12:44:57	19.3	19	
25/11/2021	12:44:58	19.3	19	
25/11/2021	12:44:59	19.3	19	
25/11/2021	12:45:00	19.3	19	
25/11/2021	12:45:01	19.3	19	
25/11/2021	12:45:02	19.3	19	
25/11/2021	12:45:03	19.3	19	
25/11/2021	12:45:04	19.3	19	
25/11/2021	12:45:05	19.3	19	1.7
25/11/2021	12:45:06	19.3	19	
25/11/2021	12:45:07	19.3	19	
25/11/2021	12:45:08	19.3	19	
25/11/2021	12:45:09	19.3	19	
25/11/2021	12:45:10	19.3	19	
25/11/2021	12:45:11	19.3	19	
25/11/2021	12:45:12	19.3	19	
25/11/2021	12:45:13	19.3	19	
25/11/2021	12:45:14	19.3	19	
25/11/2021	12:45:15	19.3	19	
25/11/2021	12:45:43	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:44	17.7	17.3	
25/11/2021	12:45:45	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:46	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:47	17.7	17.3	
25/11/2021	12:45:48	17.7	17.3	
25/11/2021	12:45:49	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:50	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:51	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:52	17.7	17.3	
25/11/2021	12:45:53	17.7	17.3	1.8-1.9
25/11/2021	12:45:54	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:55	17.7	17.3	
25/11/2021	12:45:56	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:57	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:58	17.7	17.4	
25/11/2021	12:45:59	17.7	17.4	
25/11/2021	12:46:00	17.7	17.4	
25/11/2021	12:46:01	17.7	17.4	
25/11/2021	12:46:02	17.7	17.4	
25/11/2021	12:46:03	17.7	17.4	
25/11/2021	12:46:04	17.7	17.4	
25/11/2021	12:46:05	18	17.8	
25/11/2021	12:46:06	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:07	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:08	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:09	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:10	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:11	18.3	18.1	1.71
25/11/2021	12:46:12	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:13	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:14	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:15	18.3	18.1	
25/11/2021	12:46:16	18.3	18.1	

Para la configuración del regulador tecnológico PID_Compact, para la sintonización con método autotuning se tiene que tener en cuenta o tener en claro del ciclo de escan del PLC y modo de ajuste del PID_Compact funcionando OF Line son los parámetros que tiene el PID del programa, y en funcionamiento On Line son los parámetros que se obtienen en funcionamiento en el PLC físico.

Anexo 16. Parámetro de ajuste del PID_Compact funcionando OF Line



Anexo 17. Parámetros de ajuste del PID_Compact funcionando ON Line

