



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA,
ELECTRONICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA
ELECTRICA



**“REGULACION DE TENSION DE UN GENERADOR SINCRONO
UTILIZANDO UN CONTROLADOR DIFUSO EN EL
LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACION DE LA
EPIME”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JEFERSON PILCO QUISPE

Bach. DANY HEBER GEMIO YUJRA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

Quiero aprovechar este párrafo, para sellar mi profundo agradecimiento a mi mamá Luisa Quispe Phalaḥ, que debido a ella soy quien soy en la vida, y gracias a ella se pudo concluir esta tesis. Los días de sufrimiento que compartí en aquel hospital me golpearon tan duro, y son los únicos bellos recuerdos que jamás podré sacar de mi mente. Descansa en paz mamá.

A mi papá Hector Pilco Copacati, por su gran apoyo y por los valores que me inculco desde niño, a mis hermanas Jessica y Elva Magaly, y a mis tíos que siempre han sido muy considerados conmigo.

Jeferson Pilco Quispe



DEDICATORIA

A mis padres; Ricardo Gemio Quispe y Holga Yujra Añamuro por el esfuerzo y apoyo incondicional que me brindaron en mi formación académica, sin sus consejos que me daban cada vez que me veían mal y sacrificios que hacían para que nunca falte nada en casa, no lo hubiese logrado. pido a Dios me los Cuide y bendiga siempre.

Dany Heber Gemio Yujra



AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios por la guía y protección que nos brinda cada día. Así también expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, por permitir nuestra formación profesional al servicio de la sociedad.

Agradecer a M.SC. José Manuel Ramos Cutipa asesor del presente trabajo de investigación por su gran apoyo incondicional y paciencia que tiene, en el desarrollo de este proyecto de investigación. Así como también agradecer de manera especial al ing. Elmer Rodrigo Aquino Larico por el apoyo en la realización del módulo.

Agradecer también a nuestros jurados

- *Dr. Leonidas vilca callata,*
- *M.sc.Roberto Jaime Quiroz sosa,*
- *M.sc. Angel Mario Hurtado Chavez*

por la orientación y sugerencias que tuvieron para la mejora y culminación de esta tesis. Y a toda la familia de Ingeniería Mecánica Eléctrica, agradecidos con ustedes.

Jeferson Pilco Quispe
Dany Heber Gemio Yujra



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 15

1.2 JUSTIFICACIÓN 16

1.3 ALCANCES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 18

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 18

1.4.1 Objetivo general 18

1.4.2 Objetivo específico..... 18

1.5 HIPÓTESIS 19

1.5.1 Hipótesis específico 19

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES 20

2.1.1 A nivel Internacional 20

2.1.2 A nivel Nacional 23

2.1.3 A nivel local 24

2.2 MARCO TEORICO 26



2.2.1	Generador síncrono	26
2.2.2	Logica difusa	38
2.2.3	Control difuso.....	55

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	60
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	60
3.3	UBICACIÓN	61
3.4	MATERIALES.....	61
3.4.1	PLC S7 1200 SIEMENC.....	61
3.4.2	Simatic s7-1200, Módulo de Entradas Analógicas, sm 1231.....	62
3.4.3	SM 1238 Energy Meter 480VAC	64
3.4.4	Detector de proximidad inductivo.....	65
3.4.5	Fuente de alimentación profesional BAKU BK-305D 0-30V 5	66
3.4.6	Variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20.....	68
3.4.7	Analizador de redes eléctricas trifásicas	69
3.4.8	Convertor Analógico Isolado.....	70
3.4.9	Motor de inducción trifásico	71
3.4.10	Generador síncrono	72
3.4.11	Matlab Simulink Fuzzy Logic Toolbox	76
3.4.12	Tía portal	77
3.5	DISEÑO DEL PROTOTIPO PARA LA APLICACIÓN DEL CONTROLADOR.....	78
3.6	DISEÑO DE LA SIMULACIÓN EN MATLAB SIMULINK.....	79
3.6.1	Método de Inferencia	80
3.6.2	Definición de entrada y salida del sistema de control.....	81
3.6.3	Definición de las variables lingüísticas.....	82



3.6.4	Reglas difusas.....	87
3.6.5	Defusificación	88
3.6.6	Control difuso.....	88

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	RESULTADOS.....	90
4.1.1	Superficie de Control	90
4.1.2	Respuesta de reglas de control	91
4.1.3	Respuesta de sistema de excitación.....	91
4.1.4	Respuesta de voltaje de salida del generador síncrono	92
4.1.5	Respuesta del controlador difuso	93
4.2	RESULTADOS DE PRUEBA DEL MODULO.....	101
4.2.1	Respuesta frente a una carga resistiva.....	101
4.2.2	Respuesta frente a una carga capacitiva.....	102
4.3	DISCUSIÓN	104
V.	CONCLUSIONES.....	106
VI.	RECOMENDACIONES	107
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	108
	ANEXOS.....	113

Área : CONTROL Y AUTOMATIZACION

Tema : MAQUINAS ELECTRICAS

Fecha de sustentación: 28 de enero 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Generador síncrono	27
Figura 2: Circuito equivalente de una sola fase de un generador síncrono	30
Figura 3: Circuito equivalente trifásico de un generador síncrono	31
Figura 4: Conexión del generador en estrella	31
Figura 5: Conexión del generador en delta.....	32
Figura 6: Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga resistiva.....	32
Figura 7: Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga inductiva.	33
Figura 8: Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga capacitiva.....	33
Figura 9: Comportamiento del alternador	34
Figura 10: Generador síncrono sin carga conectado en un voltímetro	35
Figura 11: Curva característica de circuito abierto.....	36
Figura 12: Curva característica de corto circuito	37
Figura 13: Curva de regulación de un generador síncrono	37
Figura 14: Gráfica de la función de pertenencia	47
Figura 15: Modelo difuso mamdani	49
Figura 16: Modelo difuso mamdani	49
Figura 17: Valor de pertenencia del fuzzificador no unitario.....	51
Figura 18: Regla Si-entonces Mamdani	53
Figura 19: Configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno	54
Figura 20: Estructura de un controlador difuso	57
Figura 21: Ubicación del proyecto de investigación	61
Figura 22: PLC S7 1200	62
Figura 23: Módulo de entradas analógicas	64
Figura 24: Energy meter 480VAC	65



Figura 25: Detector de proximidad inductivo	66
Figura 26: Fuente de alimentación profesional	67
Figura 27: Variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20	68
Figura 28: Analizador de redes.....	69
Figura 29: Conversor analógico aislado.....	70
Figura 30: Motor de Inducción Trifásica.....	71
Figura 31: Generador síncrono	72
Figura 32: Curva de saturación.....	73
Figura 33: Curva de corto circuito.....	75
Figura 34: Triangulo de potencia	76
Figura 35: Matlab Simulink Fuzzy Logic	76
Figura 36: Tia portal.....	77
Figura 37: Modulo de regulación de tensión del generador síncrono	78
Figura 38: Programación en Tia portal.....	78
Figura 39: Esquema de conexonado del generador síncrono	79
Figura 40: Diagrama de Bloques del controlador difuso.....	80
Figura 41: Método de inferencia	80
Figura 42: Entrada y salida del sistema de control.....	81
Figura 43: Funciones del universo de Discurso del Error	82
Figura 44: Funciones del universo de discurso de cambio de error	83
Figura 45: Funciones del universo de discurso en la variación del voltaje de salida....	85
Figura 46: Esquema de control difuso.....	89
Figura 47: Superficie de reglas de control.....	90
Figura 48: Comportamiento de las reglas de control.....	91
Figura 49: Comportamiento del controlador difuso	92



Figura 50: Comportamiento voltaje de salida del generador síncrono.....	92
Figura 51: Comportamiento del controlador en el arranque del generador $t=0$ a $t=3s$.	93
Figura 52: Tensión de salida del generador en el arranque $t=0$ a $t=3s$	94
Figura 53: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización en el arranque .	94
Figura 54: Comportamiento del controlador con carga resistiva $t=3$ a $t=6s$	95
Figura 55: Tensión de salida del generador con carga resistiva $t=3$ a $t=6s$	96
Figura 56: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización con carga resistiva	96
Figura 57: Comportamiento del controlador con carga inductiva en $t=6$ a $t=9s$	97
Figura 58: Tensión de salida del generador con carga inductiva en $t=6$ a $t=9s$	98
Figura 59: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización con carga inductiva	98
Figura 60: Comportamiento del controlador con carga capacitiva en $t=9$ a $t=12s$	99
Figura 61: Tensión de salida del generador con carga capacitiva en $t=9$ a $t=12s$	100
Figura 62: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización con carga capacitiva	100
Figura 63: Comportamiento de la tensión frente a una carga resistiva	101
Figura 64: Datos en tiempo real de la tensión nominal frente a una carga resistiva ...	102
Figura 65: Comportamiento de la tensión frente a una carga capacitiva	103
Figura 66: Datos en tiempo real de la tensión nominal frente a una carga capacitiva	103



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: De verdad de la conjunción y la disyunción.....	45
Tabla 2: De verdad de una proporción condicional.....	46
Tabla 3: Especificaciones del motor de inducción trifásico	71
Tabla 4: Resultados de prueba de vacío	72
Tabla 5: Resultados de la prueba de cortocircuito.....	74
Tabla 6: Parámetros del generador síncrono	75
Tabla 7: Matriz de asociación difusa	87
Tabla 8: Distribución del tiempo de simulación.....	89



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- FVR : Regulador de Voltaje difuso
- AVR : regulador de voltaje automático
- PLC : control lógico programable
- FLC : controlador lógica difusa
- CC : corriente continua
- Dc : corriente directa
- Ac : corriente alterna
- V_0 : voltaje inducido interno del estator
- R_s : resistencia del estator
- X_s : reactancia de síncrona
- P : potencia Activa
- Q : Potencia reactiva
- S : potencia aparente
- V_{ref} : voltaje de referencia



RESUMEN

El presente proyecto de investigación se basa en el desarrollo de regulación de tensión de generador síncrono utilizando un Controlador Difuso, el objetivo fundamental es diseñar un controlador difuso para la regulación de tensión de un generador síncrono. Así mantener la tensión dentro de los límites establecidos, además de mantener la Tensión de salida estable, debe tener una respuesta rápida ante cambios repentinos de carga. En relación con el controlador Difuso, presenta la ventaja de permitir la operación de dispositivos de control, de diversas características debido a la capacidad de tomar decisiones y adaptarse al mecanismo sobre ciertas acciones que se presentan en su funcionamiento. Ya que el generador síncrono se caracteriza por ser una maquina no lineal y difícil de su modelamiento. Para realizar el proyecto de investigación se inició con la selección del generador síncrono se realizaron pruebas de vacío y cortocircuito con los resultados obtenidos se llevó a cabo un análisis de cálculo de potencia generada, luego se procedió a la simulación en Matlab simulink el controlador propuesto con el generador seleccionado con parámetros medidos y calculados. Para demostrar la aplicación del controlador propuesto se procedió con la adquisición de materiales y herramientas, finalmente se procedió a realizar las pruebas de tiempo de estabilización de la tensión y funcionamiento del generador a diferentes cargas utilizando el controlador propuesto. Llegando a la conclusión que, si es posible regular la tensión de un generador síncrono utilizando un controlador difuso, en el laboratorio de control y automatización, de la EPIME.

Palabras claves: Controlador Difuso, Excitatriz, Generador Síncrono, Regulación, Tensión.



ABSTRACT

This research project is based on the development of synchronous generator voltage regulation using a Fuzzy Controller, the main objective is to design a fuzzy controller for the voltage regulation of a synchronous generator. Thus, keeping the voltage within the established limits, in addition to keeping the output voltage stable, it must have a quick response to sudden load changes. In relation to the Fuzzy controller, it has the advantage of allowing the operation of control devices, of various characteristics due to the ability to make decisions and adapt to the mechanism on certain actions that occur in its operation. Since the synchronous generator is characterized by being a non-linear machine and difficult to model. To carry out the research project, the selection of the synchronous generator began with vacuum and short-circuit tests, with the results obtained, a power calculation analysis was carried out, which, generated, then proceeded to the simulation in Matlab simulink the controller proposed with selected generator with measured and calculated parameters. To demonstrate the application of the proposed controller, we proceeded with the acquisition of materials and tools, finally we proceeded to perform the voltage stabilization time tests and the generator operation at different loads using the proposed controller. reaching the conclusion that, if it is possible to regulate the voltage of a synchronous generator using a fuzzy controller, in the control and automation laboratory of EPIME.

Keywords: Fuzzy Driver, Exciter, Synchronous Generator, Regulation, Voltage



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene por objetivo regular la tensión del generador, que se ven afectadas directamente por las perturbaciones externas en los sistemas eléctricos de potencia. Estas perturbaciones son ocasionadas principalmente por operaciones normales de la red como conexión y desconexión de carga y por las fallas externas que son ajenas a los elementos que componen el sistema eléctrico. es por lo cual que se presenta alternativamente utilizar controlador difuso para regular la tensión del generador síncrono.

Para el desarrollo de la presente tesis se ha estructurado en seis capítulos: En el capítulo uno se menciona el planteamiento del problema, objetivos e hipótesis de la investigación. En el capítulo dos se consideró la revisión de literatura, recolectando información respecto a los antecedentes del presente proyecto. En el capítulo tres se hizo la metodología de investigación, los materiales usados para la toma de datos, el programa de diseño Matlab simulink y a la vez se consideró el cálculo, estudio y selección de materiales de los diferentes elementos del módulo a diseñar y en el capítulo cuatro se presenta la interpretación de resultados y discusiones, en el capítulo cinco se muestra las conclusiones. en el capítulo seis se presenta las recomendaciones. en el capítulo siete se presenta las referencias bibliográficas culminando así con los anexos.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

se tiene el siguiente planteamiento de problema:

- ¿Cómo regular la tensión del generador síncrono utilizando un controlador Difuso?



- ¿De qué manera podemos regular la tensión del generador síncrono utilizando un controlador Difuso?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La calidad de la energía es dependiente de las condiciones típicas de manejo del sistema eléctrico en términos de estabilidad (voltaje y frecuencia), distorsión de la señal y continuidad del servicio (Mercado et al., 2017).

La energía eléctrica, hoy en día, es una forma de energía de mayor consumo final en el mundo. Por lo que, se hace necesario generar la energía eléctrica, transportarlo y distribuirlo en forma económica y confiable (Blanco, 2009). No obstante, según la UNED (2008) esta no puede almacenarse, en grandes cantidades ni de manera económicamente rentable, por lo cual en cada momento debería generarse lo único que se consume (potencia demanda más pérdidas del sistema). La potencia eléctrica demandada cambia de un día a otro y en todo el día, por lo cual la generación debería continuar dicha misma alteración temporal, manteniendo el valor nominal de la frecuencia del sistema, 60 Hz, y otras condiciones que definen el estado de manejo regular del sistema eléctrico, todo ello con el fin económico del menor coste de producción.

Según Nizama (2013) “Las máquinas síncronas son máquinas cuyo estator se encuentra alimentado por corriente alterna, en tanto el rotor tiene alimentación continua ya sea a través de un enrollado de campo o bien mediante imanes permanentes”. Las máquinas más usadas para generar energía eléctrica son los generadores síncronos. Así mismo la frecuencia y el voltaje en los terminales se requiere que permanezcan constantes frente a diferentes disturbios que puedan presentarse en la generación de la energía (Barragan, 2008). Gracias a la enorme trascendencia que tiene ejercer control sobre máquinas eléctricas como lo son los generadores que son implementados en aplicaciones



a grado industrial en pluralidad de procesos, se diseñan controladores que como elección de control parten del estudio del comportamiento de la excitatriz de la máquina por lo cual se logre implantar la forma en la que se controle la tensión de salida conservando condiciones de consumo de corriente (Barrera et al., 2019). Con este fin, el propósito insustituible de los sistemas de regulación y control de los generadores instalados en las centrales eléctricas es afirmar que la generación se adapta a la potencia demandada de manera continua, manteniendo la continuidad del abastecimiento y los límites de desempeño del sistema en unos parámetros establecidos y procurando de que funcionen en cada instante los generadores que otorgan un buen económico (UNED, 2008). Por esta razón, se necesita sustituir al sistema con distintas herramientas que le permitan reaccionar de manera instantánea y idónea frente a situaciones adversas (Perez, 2005). Esta funcionalidad se hace automáticamente en los generadores y a partir de los centros de control por medio de la regulación automática de la tensión (AVR, del inglés “automatic voltage regulator”) y, más que nada, por medio del control automático de la generación (AGC, del inglés “automatic generation control”) (UNED, 2008).

Con la mejora de la tecnología de control mediante lógica difusa, pueden diseñar controladores para simular las actividades realizadas por expertos humanos ante sistemas físicos de manera enorme no lineales y obtener resultados satisfactorios. A diferencia del control tradicional, los controladores difusos son más eficientes, más robustos y más complicados, y tienen la posibilidad de implementarse en sistemas programables que facilitan el desarrollo de sistemas de control. Los sistemas de control difuso han demostrado sus ventajas en el control y reconocimiento de sistemas complicados y enormemente no lineales (Alzate, 2009). El aumento de técnicas usando controladores capaces aplicados en redes eléctricas, ha creado buenos resultados y cada vez más convincentes para los inconvenientes que implican el control de tensión en sistemas de



distribución de energía eléctrica. En especial, los sistemas basados en controladores fuzzy (lógica difusa), tiene alto potencial de aplicación en sistemas dedicados al control de tensión, debido a que las propiedades más atractivas de aquellos sistemas consisten en su alta destreza para solucionar inconvenientes no lineales e intentar las ocasionales faltas de certeza similares al proceso (Carrara & Aguirre, 2018).

1.3 ALCANCES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

- El presente proyecto se realizará en el laboratorio de control de la escuela profesional de ingeniería mecánica eléctrica de la UNAP
- En este proyecto se modelará un sistema de control difuso para la regulación de tensión de un generador síncrono en Simulink (Matlab).
- Se simulará utilizando el Simulink (Matlab)
- Se Demostrará la aplicación del controlador propuesto en un prototipo, en el laboratorio de control y automatización, de la EPIME.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un controlador difuso para la regulación de tensión de un generador síncrono.

1.4.2 Objetivo específico

- Modelar un sistema de control difuso para la regulación de tensión en un generador síncrono.
- Simular un modelo del sistema de control de tensión, en un generador síncrono.
- Demostrar la aplicación del controlador propuesto en un prototipo, en el laboratorio de control y automatización, de la EPIME.



1.5 HIPÓTESIS

Utilizando un controlador difuso, podemos regular la tensión del generador síncrono

1.5.1 Hipótesis específico

- Se puede modelar un sistema de control difuso para la regulación de tensión en un generador síncrono
- Se puede simular el sistema de control en el programa Matlab Simulink
- La aplicación del sistema de control difuso se puede demostrar utilizando un prototipo, en el laboratorio de control y automatización, de la EPIME.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 A nivel Internacional

El estudio realizado por Mehmet Kubilay Eker y Ismail H. Altas – 2006 Turquía. Titulada “UN GENERADOR DE VOLTAJE DIFUSO (FVR) PARA UN GENERADOR SÍNCRONO AUTÓNOMO”. Involucra el control de voltaje terminal de un generador síncrono independiente que utiliza un controlador basado en lógica difusa, como un regulador de voltaje difuso (FVR), en lugar del clásico regulador automático de voltaje (AVR). Para obtener el comportamiento de simulación del generador síncrono con mayor precisión, Para verificar la validez del modelo de simulación desarrollado, se establece un prototipo de ensamblaje experimental de laboratorio compuesto por un generador síncrono, una caja de resistencias trifásica y un motor de inducción trifásico que representa cargas lineales y no lineales. El controlador de la parte experimental de esta investigación adopta una computadora personal y una tarjeta de adquisición de datos PCL 818 de 12 bits para realización digital, con una velocidad de 100 kS / s. Llegando a la conclusión que el FVR propuesto ofrece un rendimiento de seguimiento rápido y bueno. Opera sobre la base de los pensamientos de un operador humano y ejecuta las reglas para ajustar la entrada del sistema simplemente midiendo la salida (Mehmet & Ismail, 2007).

El artículo presentado por Damir Sumina, Tomislav Idzotic, Igor Erceg de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación Departamento de Máquinas Eléctricas, Accionamientos y Automatización Unska 3, Zagreb, Croacia, titulada “CONTROL DE LÓGICA DIFUSA DEL GENERADOR SÍNCRONO BAJO LA CONDICIÓN DE



TRANSITORIO TRIFÁSICO CORTOCIRCUITO”, Este artículo se centra en la realización del control de accionamiento de lógica difusa de generadores síncronos. Se prueba un esquema de control de lógica difusa simple para el control de voltaje y la estabilización del generador en un modelo de laboratorio real que incluye un sistema digital de control de excitación (basado en cuatro DSP) y un generador síncrono conectado. Está conectado al sistema de CA a través de un transformador y dos líneas de transmisión paralelas. El experimento se lleva a cabo en el transitorio trifásico en la línea de transmisión. El comportamiento del sistema de excitación con controlador estabilizador de lógica difusa Excitación del controlador de voltaje PI y estabilizador de voltaje basado en sistema de energía convencional. Según las pruebas que realizaron concluyen que el controlador estabilizador de lógica difusa muestra un rendimiento mejorado del sistema de excitación en comparación con el controlador de voltaje PI y el estabilizador del sistema de potencia convencional. Se reduce el tiempo de estabilización de la oscilación de la potencia activa (Sumina et al., 2007).

El artículo presentado por Ahmed MH Al-Yousif del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela de ingeniería, Universidad de Mosul – 2019 Irak. Titulado “REGULADOR AUTOMATICO DE VOLTAJE BASADO EN LOGICA DIFUSA” El principal beneficio de este trabajo que existe en el diseño e implementación de un controlador de lógica difusa (FLC) es la facilidad y flexibilidad del diseño, se aplicó lógica difusa para diseñar un Regulador de voltaje automático (AVR) de un generador síncrono. El Controlador de lógica difusa constituye una poderosa herramienta para mejorar la calidad del voltaje eléctrico entregado por el Sistema de Generación. La simulación se llevó a cabo utilizando el programa Matlab para obtener la respuesta de salida del sistema. Los resultados de la simulación mostraron que la respuesta general del



sistema se había mejorado significativamente al utilizar un controlador PID basado en Lógica difusa (Ahmed, 2019).

Según el artículo presentado por R. Ramya becario de doctorado, Dr. K. Selvi profesor asociado, del Departamento de EEE Thiagarajar College of Engineering Madurai, 2011 India. Titulado “UN SIMPLE SISTEMA DE CONTROL DE EXITACION DIFUSSA PARA GENERADOR SINCRONICO”, Se propone un método sistemático de diseño de control de lógica difusa. Suprime y suprime la oscilación cuando se perturba el generador. Evaluación del rendimiento del estabilizador del sistema de energía desde una sola unidad hasta un sistema de energía de bus infinito en diferentes condiciones de trabajo y perturbaciones para demostrar su efectividad. Llegando a la conclusión que, en comparación con el estabilizador del sistema de potencia tradicional a 1,46 segundos, el sistema que funciona con el estabilizador del sistema de potencia de lógica difusa alcanza el valor de potencia activa deseado en 1,33 segundos. Esto significa que el estabilizador del sistema de energía de lógica difusa alcanza el tiempo de estabilización más rápido que el estabilizador del sistema de energía tradicional (Ramya & Selvi, 2011)

Según el artículo presentado por Diego J. Barrera, Aldo Pardo García. Universidad de Pamplona - Colombia y Oscar J. Suarez – CINVESTAV, Unidad Guadalajara, México, 2019. titulado “DISEÑO DE CONTROLADORES FUZZY PARA EL CONTROL DE LA EXCITATRIZ EN UNA MAQUINA SINCRONA” Describe una comparación entre tres controladores difusos diferentes diseñados para controlar el excitador en un generador síncrono. Los controladores están diseñados con tres, cinco y siete reglas, respectivamente, que toman en cuenta los datos obtenidos usando la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 para el controlador de motor síncrono en el sistema de generador



de motor. usando Matlab® Simulink para mostrar los resultados de la simulación y la realización en tiempo real de las pruebas realizadas Se aprecia que el controlador difuso de siete reglas se presenta de manera relativa una respuesta mejorada en comparación con los controladores difusos de tres y cinco reglas (Barrera et al., 2019).

2.1.2 A nivel Nacional

Según la tesis “CONTROL DIGITAL DE LA EXCITACIÓN DE UN GENERADOR SINCRONO” presentada por Juan Carlos Nizama Valdez para optar el Título de Ingeniero Mecánico – Eléctrico Piura, Julio 2013 Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura. Propone el uso de microcontroladores para el control digital de la excitación del generador síncrono, y el uso de técnicas de control como la optimización del lazo de control CALDWELL en el dominio Z. de las pruebas realizadas se puede apreciar que al regulador le toma 17 segundos para estabilizarse a pesar de que llega a regular. las variaciones de voltaje están $\pm 10\%$ del valor del voltaje nominal del generador (Nizama, 2013).

Según la tesis “ANÁLISIS DEL DEFECTO DE LA PÉRDIDA DE EXCITACIÓN EN SISTEMAS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA” presentado por el bachiller Cristhian Johel Aliaga Aduato para optar el título profesional de Ingeniero Electricista - Universidad Nacional del Centro del Perú - Huancayo – 2010. Analizaron el efecto de la pérdida de campo en máquinas síncronas para evaluar el rendimiento de los sistemas de protección de pérdida de campo utilizados en los sistemas de generación de energía. Se produjo un modelo de la máquina síncrona y el sistema de excitación. Los estudios en esta tesis han demostrado que las pérdidas de excitación son generalmente más bajas que los niveles de sobrecorriente y caída de voltaje después de un cortocircuito trifásico cerca de la generación de energía. Aunque aparece después de



unos segundos, en casos severos conduce a una aparente pérdida de sincronización por un aborto espontáneo o una caída prolongada de la tensión aplicada al inductor por un cortocircuito o desconexión repentina del cable de alimentación (Aliaga, 2010).

2.1.3 A nivel local

Según la tesis “IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE VOLUMEN DEL NIVEL DE LÍQUIDO DE UNA BOMBA DE 1/4 HP UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA EPIME” presentado por Wilder Luis Cusi Quenta, Yues Antony Cusi Quenta para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista - Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas - Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica – UNAP - 2018. Esta investigación involucra el diseño e implementación de un controlador difuso, el cual será utilizado en un módulo que permita estudiar y analizar las características operativas del controlador FUZZY LOGIC (algoritmo autorregulador), mientras se controla el flujo de fluido en el tanque principal. Software LABVIEW El sistema Scada permite el control y supervisión del control y recogida de datos EPIME en laboratorios automatizados. El sistema consta de tanque de combustible principal, tanque de combustible de retroalimentación, bomba de CA, sensor ultrasónico, sensor de flujo, myRIO (tarjeta de datos), variador de frecuencia (VTL) y software LABVIEW instalado en la computadora. La estructura (parámetros de ajuste) del controlador difuso está diseñada para estabilizar las condiciones, y el flujo y el nivel de agua del agua que ingresa a la planta (tanque principal) del sistema se controlan en el lugar donde se controla el nivel de agua requerido. después de las pruebas realizadas concluyeron que La lógica difusa se puede utilizar para diseñar e implementar el módulo de control de nivel para mejorar el proceso de llenado y medición. Esto se debe a que el error de nivel se reduce



en un 5% (con un sensor flotante) al 1%, lo que proporciona 0.5 El tiempo de respuesta. en segundos permite trabajar con mayor seguridad (Cusi & Cusi, 2016).

Según la tesis “DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID - DIFUSO EN LA PLATAFORMA DE LABVIEW PARA EL CONTROL DE NIVELES DE AGUA APLICADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA EPIME” presentada por Luis Alberto Mayta Mamani, Edwin Ronald Tintaya Gutierrez para optar el título profesional de ingeniero mecánico electricista UNAP – 2018. Diseñaron el controlador PID y el controlador PID difuso en la plataforma LabVIEW para control de nivel de agua aplicados en el laboratorio de control de automatización EPIME analizados y comparados. Primero, procesaron la señal de entrada del sensor y configuraron cada componente. El sistema de control está diseñado en la plataforma Labview con su propia scada. El controlador PID fue desarrollado en el software Matlab utilizando herramientas de Simulink, lo que nos permitió realizar ajustes a través de prueba y error, y obtuvo un cierto grado de confiabilidad en este caso. 92%. También diseñaron un controlador PID difuso en el software Labview. La parte difusa se diseñó utilizando la caja de herramientas de lógica difusa de Labview. El ajuste del controlador se llevó a cabo sobre la base de prueba y error. Llegando a las siguientes conclusiones: Comparado con el controlador PID, el controlador PID difuso obtiene un mejor tiempo de respuesta con un tiempo de mejora de 10 segundos. En comparación con el controlador PID, el controlador PID difuso puede obtener una mejora menor. El uso de un controlador PID difuso puede obtener una mejor estabilidad que el controlador PID (Mayta & Tintaya, 2018).

Según la tesis “METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO APLICADO A HORNOS INDUSTRIALES DE PETRÓLEO” presentada por Wuildo Felipe Quenta Ccaso, Eloy Rubén Hancco Chambi para optar el título profesional



de Ingeniero Mecánico Electricista UNAP-2019. El objetivo principal de esta investigación es controlar y monitorear la corriente, temperatura y contaminación generada por el horno de aceite industrial en el prototipo de prueba mediante la implementación del controlador difuso. Para el desarrollo del control difuso se utilizan sistemas tipo Mamdani y Tsukamoto, los cuales son diseñados e implementados a través de herramientas FuzzyLogicDesigner y / o Labview. Los principales resultados obtenidos muestran que aplicando el control Mandani con servo problemas, las emisiones de gases de combustión se pueden reducir en 77.00 PPM de CO y 0.00 PPM de CH₄ en 40 segundos a una temperatura de 200 ° C. Al aplicar el control Mandani, el CO se puede reducir en 27 PPM y el CH₄ se puede reducir en 0 PPM en 75 segundos. Con el control Tsukamoto, puede reducir 37,00 PPM de monóxido de carbono a una temperatura de 130 ° C en 100 segundos concluyendo que el control difuso se puede aplicar en cualquier proceso o sistema a controlar donde permite evaluar una mayor cantidad de variables que deben ser medibles así como de entradas y salidas, además permite definir variables lingüísticas no numéricas que asemejan al conocimiento humano, también permite relacionar las variables de entradas y salidas, sin tener que entender todas las variables, permitiendo que el sistema pueda ser más confiable y estable que un control convencional (Quenta & Hancco, 2019).

2.2 MARCO TEORICO

2.2.1 Generador síncrono

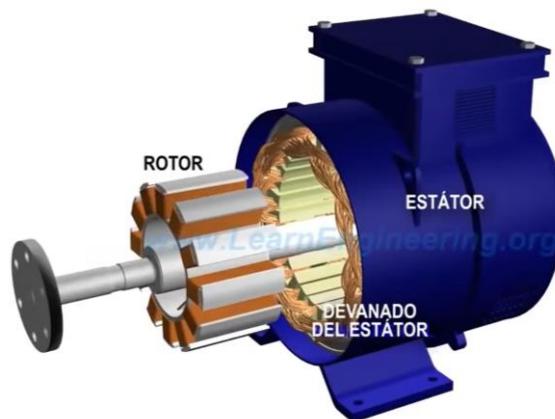
2.2.1.1 Definición.

El Generador Síncrono o (Alternador), es un tipo de máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa mediante inducción electromagnética, se hace rotar un electroimán respecto a una espira estacionaria, La excitación del generador se puede obtener de dos formas diferentes. se

pueden conectar imanes permanentes al rotor en serie para obtener un campo magnético giratorio de tamaño constante. Los generadores que utilizan este tipo de excitación se denominan imanes o generadores de imanes permanentes. Por otro lado, la excitación se puede lograr conectando un generador de CC montado en el mismo eje que el alternador o, alternativamente, corriente CC de una fuente de CC separada que puede pasar a través de los devanados del rotor mediante anillos colectores y escobillas. Y cada vez que los polos N y S pasa por los devanados del estator este induce corriente alterna para luego poder ser dirigida a los terminales del generador, siendo estos terminales en la mayoría de los generadores trifásicos el R S T (Bobes, 2016).

Su velocidad de rotación es a la de velocidad del campo magnético, es decir la frecuencia angular mecánica es como la frecuencia eléctrica, a esta igualdad de frecuencias se le llama sincronismo (Rodríguez, 2018).

Figura 1: Generador síncrono



Fuente: (Berkel, 2019)

2.2.1.2 Características del Estator.

El estator es la parte fija del generador síncrono conocido también el inducido, está compuesto de un núcleo cilíndrico laminado que contiene un conjunto de ranuras donde portan un devanado trifásico imbricado.



El devanado conviene conectar en estrella, y el neutro a tierra, porque con una conexión estrella, los armónicos de línea a neutro distorsionantes desaparecen ya que estos se cancelan entre sí, pero cuando se conecta en conexión delta, los armónicos no se cancelan, por consiguiente, se acumulan y producen una corriente circulante de tercer armónico, el cual incrementa las pérdidas eléctricas (Wildi, 2007).

2.2.1.3 Características del Rotor.

El rotor de un generador síncrono es un electroimán que genera un campo magnético giratorio, que genera voltaje en los devanados del estator del generador.(Chapman, 2012).

Se aplica corriente continua a sus bobinas y debido a que crean un campo magnético dentro del generador, se les llama bobinas de campo, para suministrarles corriente continua. se utilizan anillos colectores y escobillas o también se pueden instalar directamente él-ella. El eje del generador está conectado por diodos e interruptores. (Morejón Noboa & Pérez Quintuña, 2015).

Los polos del rotor pueden ser convexos o cilíndricos. Los generadores de polo caliente tienen velocidades bajas y se utilizan principalmente en centrales hidroeléctricas, mientras que los generadores de polo cilíndrico tienen velocidades superiores a las 1800 rpm y se utilizan en electricidad para centrales térmicas (Hernandez et al., 2009).

2.2.1.4 Sistema de Excitación de Campo.

Para excitar el devanado de campo de rotor se debe suministrar corriente directa (cd), utilizando dos excitadores, un excitador principal y un excitador piloto, el excitador principal alimenta corriente de excitación a la armadura del generador síncrono, y el excitador piloto regula la corriente de salida del excitador principal, que se puede hacer



manual o automático mediante señales de control (Wildi, 2007). Esto se suministra de dos formas distintas:

- Por medio de anillos rozantes y escobillas desde una fuente externa
- Por medio de rectificadores y diodos conectados a un generador de campo estacionario, montado en el mismo eje del generador síncrono

2.2.1.5 Velocidad de Sincronismo.

Llamamos velocidad de sincronismo a la velocidad con lo que gira el rotor, este nombre se debe a que la frecuencia de la corriente eléctrica alterna del generador esta sincronizada con la velocidad del rotor.

El número de polos del rotor depende de esta velocidad, cada vez que un par completo de polos N y S del rotor barre los conductores del estator, el voltaje inducido realiza un ciclo completo, esto nos lleva a la siguiente ecuación (Wildi, 2007).

$$f = \frac{pn}{120}$$

Donde:

f = frecuencia eléctrica en Hz

p = número de polos del rotor

n = velocidad del rotor del generador

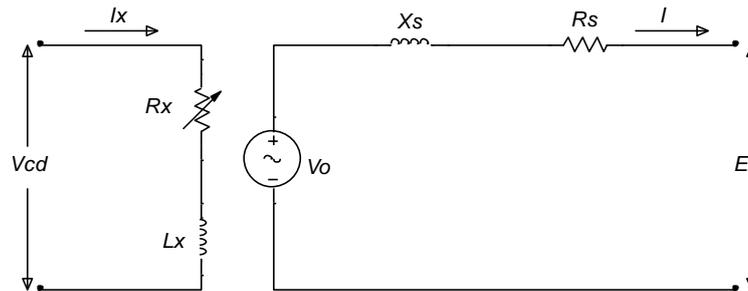
2.2.1.6 Circuito equivalente por fase del Generador Síncrono.

El voltaje inducido V_0 en los devanados del estator no es la misma que el voltaje de salida E , hay ciertos factores que afectan al momento de ser inducido, como la Reactancia del inducido (X_S), la resistencia del cobre (R_S).

El voltaje de salida del generador depende del voltaje interno generado V_O y de la reactancia síncrona X_S . Por lo tanto, el voltaje de salida del generador se escribe de la siguiente manera:

$$E = V_O - jX_S - R_S I$$

Figura 2: Circuito equivalente de una sola fase de un generador síncrono



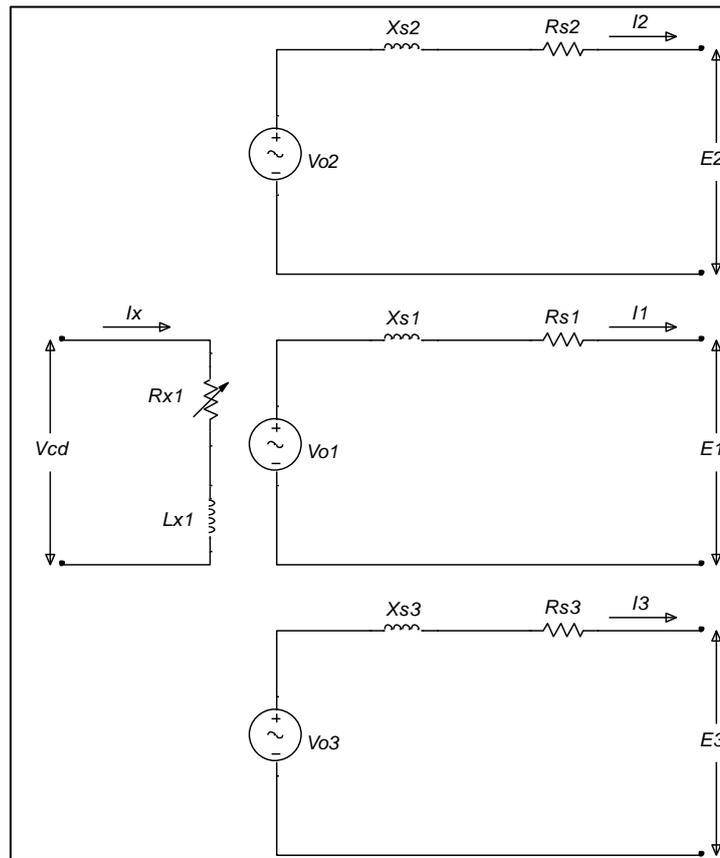
Elaborado por el equipo de trabajo

2.2.1.7 Circuito Trifásico equivalente de un Generador Síncrono.

Conforme el campo es excitado por corriente continua I_X , este produce un flujo ϕ . Mientras el rotor gira, induce un voltaje V_O en los tres devanados del estator, como se aprecia en la Figura 3. Cada uno de los devanados están desfasados 120° respecto a otra, cada uno del devanado del estator posee una resistencia propia R_S y cierta reactancia síncrona correspondiente (X_S , reacción del inducido y la autoinductancia) (Wildi, 2007).

En el siguiente esquema se puede ilustrar el circuito equivalente de un generador síncrono, con las tres fases.

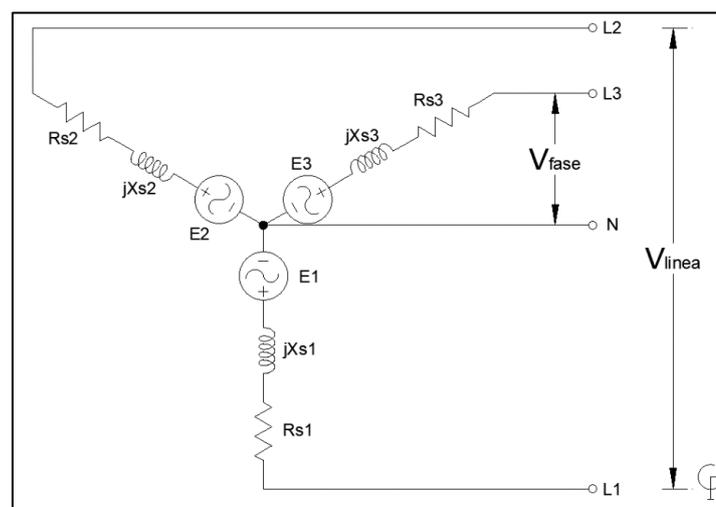
Figura 3: Circuito equivalente trifásico de un generador síncrono



Elaborado por el equipo de trabajo

2.2.1.8 Conexión de un Generador Síncrono en Estrella (Y).

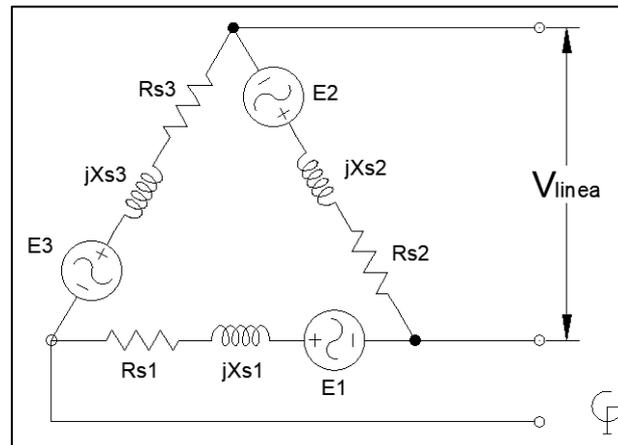
Figura 4: Conexión del generador en estrella



Elaborado por el equipo de trabajo

2.2.1.9 Conexión de un Generador Síncrono en Delta (Δ).

Figura 5: Conexión del generador en delta



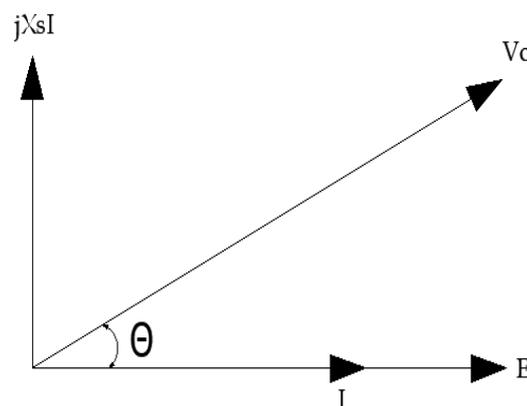
Elaborado por el equipo de trabajo

2.2.1.10 Diagrama Fasorial de un Generador Síncrono.

a) Diagrama Fasorial De Una Carga Resistiva

De acuerdo a la figura 2 la tensión de salida E es mucho menos que la tensión inducida a la armadura V_o , esto se debe a las caídas propias de la inductancia y la resistencia de los devanados de la máquina.

Figura 6: Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga resistiva

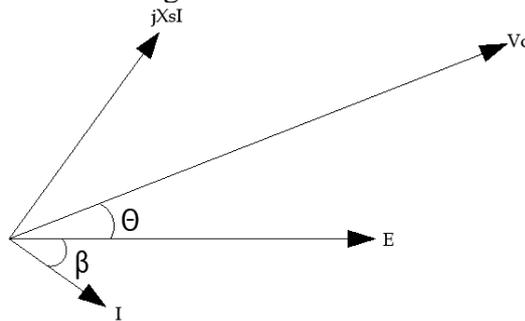


Elaborado por el equipo de trabajo

b) Diagrama Fasorial De Una Carga Inductiva

Se puede observar que la corriente I esta un tanto retrasada respecto a la tensión de salida E y esta tensión es menor que la tensión inducida V_o como se habría que esperar debido a la inductancia de la armadura $jX_s I$.

Figura 7: Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga inductiva.

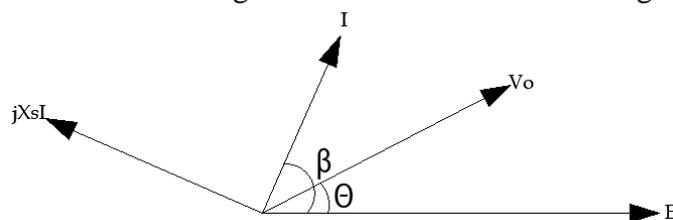


Elaborado por el equipo de trabajo

c) Carga Capacitiva

Ahora la corriente I va un tanto (β) adelantado respecto a la tensión de salida E , sin embargo, E es más grande que V_o , esto quiere decir que con una mínima corriente de excitación se puede producir un voltaje elevado.

Figura 8: Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga capacitiva.



Elaborado por el equipo de trabajo

2.2.1.11 Potencia suministrada por el Generador Síncrono.

Los generadores síncronos convierten potencia mecánica en potencia eléctrica, pero no toda la potencia mecánica que ingresa en un generador síncrono se convierte en potencia eléctrica que sale de la máquina. La diferencia entre la potencia que ingresa en

el generador y la potencia que se convierte en él, representa las pérdidas mecánicas, del núcleo y misceláneas de la máquina (Chapman, 2012).

La potencia activa suministrada de un generador síncrono, ya sea este, conectado en un bus infinito o conectado a una carga, se puede expresar de la siguiente manera.

$$P = \frac{EV_0}{X_S} \text{sen } \varphi$$

Donde:

- P : Potencia activa, por fase (W)
- V_0 : voltaje inducido, por fase (V)
- E : voltaje terminal, por fase (V)
- X_S : reactancia síncrona, por fase (Ω)
- φ : ángulo de par o momento de torsión entre V_0 y E ($^\circ$)

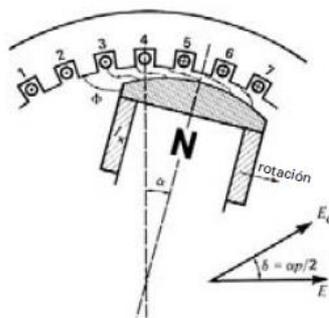
El Angulo de par o momento de torsión se puede calcular de la siguiente manera

$$\varphi = \frac{p\alpha}{2}$$

Donde:

- p : número de polos en el generador
- α : Angulo mecánico entre centros de los polos del estator y del rotor (ángulos mecánicos)

Figura 9: Comportamiento del alternador



Nota: Los polos N del rotor se desplazan un ángulo α respecto a los polos S del estator

Fuente: (Wildi, 2007)

2.2.1.12 Medición de los Parámetros.

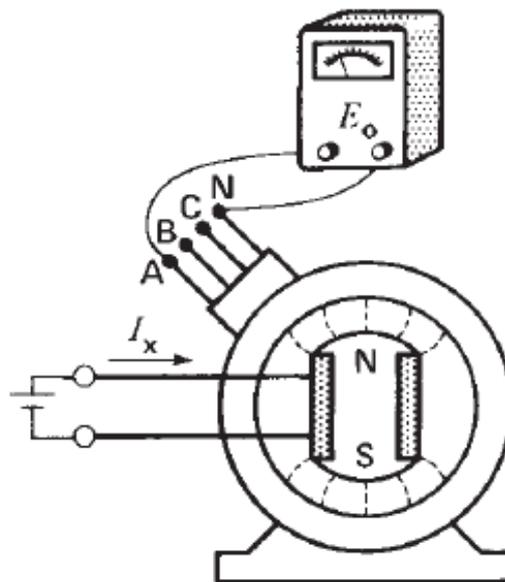
Para describir el comportamiento real de un generador síncrono se debe determinar los siguientes parámetros:

- La relación entre la corriente de excitación que se suministra al campo y el flujo.
- La reactancia síncrona del generador
- La resistencia del devanado del inducido

Para determinar estas cantidades se hace mediante la prueba de circuito abierto y cortocircuito.

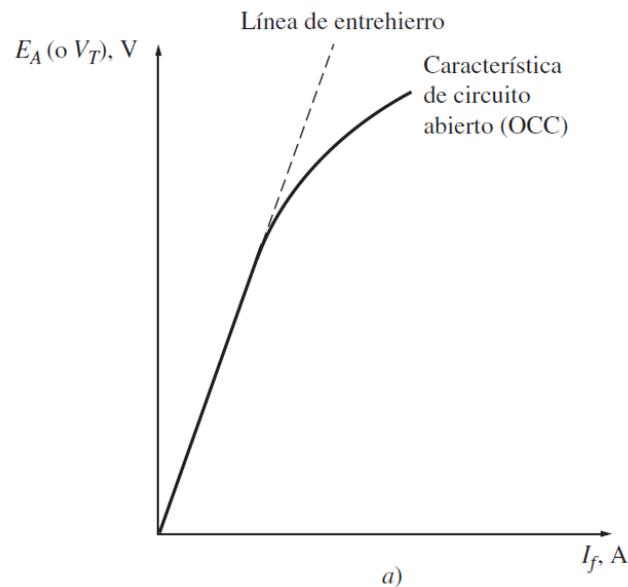
Paso 1: circuito abierto. - Se desconectan las terminales de cualquier carga, se gira el generador a velocidad nominal y se incrementa gradualmente la corriente de excitación hasta llegar a su valor nominal de línea. Se mide el voltaje en las terminales de línea a neutro y la corriente de excitación correspondiente.

Figura 10: Generador síncrono sin carga conectado en un voltímetro



Fuente: (Wildi, 2007).

Figura 11: Curva característica de circuito abierto



Nota: Fuente: (Chapman, 2012).

De la figura podemos decir que, conforme la corriente de campo I_x es más alta, el hierro comienza a saturarse, entonces el voltaje se eleva mucho menos con el mismo incremento de corriente de campo I_x . A esto se le conoce también como la curva de saturación sin carga del generador síncrono.

Paso 2: cortocircuito. -se reduce la excitación a cero y las terminales del generador se ponen en corto circuito por medio de amperímetros, y de nuevo se incrementa la corriente de excitación de campo hasta su valor nominal, luego se mide la corriente de línea o corriente del inducido del estator. Con este resultado se puede calcular la reactancia síncrona.

$$X_s = \frac{E}{I_{sc}}$$

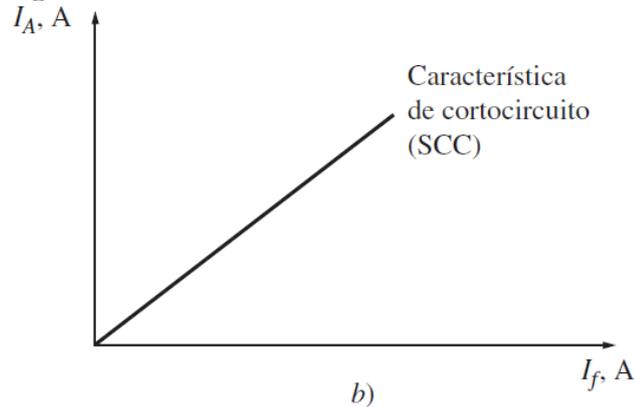
Donde:

X_s = reactancia síncrona por fase (Ω)

E = voltaje nominal de línea a neutro con circuito abierto (V)

I_{sc} = corriente de cortocircuito por fase (A)

Figura 12: Curva característica de corto circuito

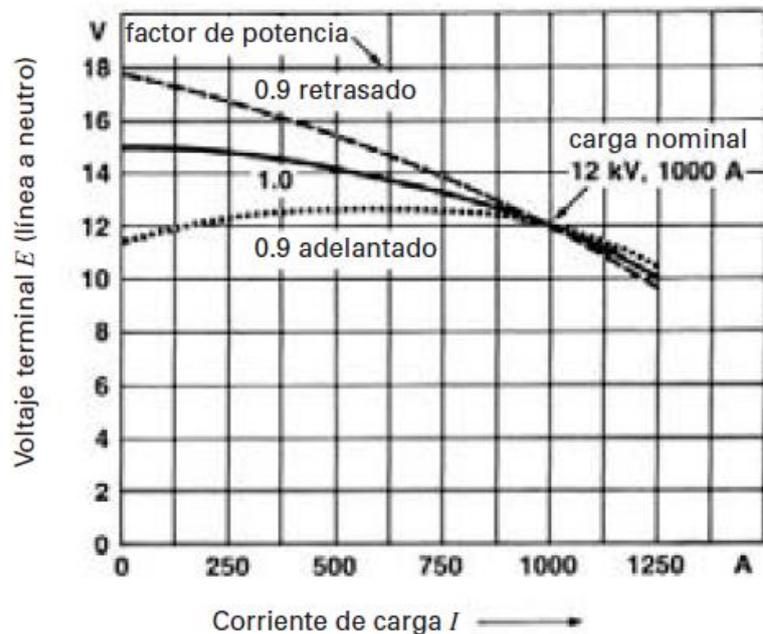


Fuente: (Chapman, 2012)

2.2.1.13 Curva de Regulación.

Cuando un solo generador síncrono alimenta una carga variable, nos interesa saber cómo cambia el voltaje terminal E como una función de la corriente I de la carga. La relación entre E e I recibe el nombre de curva de regulación. Las curvas de regulación se trazan con la excitación de campo fija y para un factor de potencia de carga dado (Wildi, 2007).

Figura 13: Curva de regulación de un generador síncrono



Fuente: (Wildi, 2007)



2.2.2 Lógica difusa

2.2.2.1 Origen de la Lógica Difusa.

La Teoría difusa fue introducida a partir de la publicación en 1965 del reporte llamado “Conjuntos Difusos” hecho por Lofti A. Zadeh, profesor de la Universidad de California en Berkeley (Herrera, 2003) (Lee, 1990). Antes de trabajar en la teoría difusa Zadeh se dedicó a la teoría de Control. A principios de los 60s Zadeh pensó que la teoría de control clásico puso demasiado énfasis en la precisión y por tanto no podía manejar los sistemas complejos.

Al comienzo las ideas publicadas por Zadeh no fueron seguidas por la comunidad científica del momento, pero con el tiempo comenzó a tener seguidores lo que produjo que sus teorías fuesen ampliadas y se asentaran sus conocimientos. La intención de Zadeh era la creación de un formalismo para manejar de forma más eficiente la imprecisión del razonamiento humano. Es en 1971, cuando realiza la publicación de “Quantitative Fuzzy Semantics” en donde aparecen los elementos formales que dan lugar a la metodología de la Lógica Difusa y de sus aplicaciones tal y como se conocen en la actualidad. A partir de 1973 otros investigadores comenzaron a aplicar la Lógica Difusa a diversos procesos haciendo grandes aportaciones tanto al desarrollo de la teoría de la Lógica Difusa como al estudio de sus aplicaciones.

En 1974 Hebrahim Mamdani en el Reino Unido desarrolla el primer controlador difuso diseñado para la regulación de un motor de vapor (Mamdani, 1974). La implantación real de un controlador de este tipo no fue realizada hasta 1980 por F.L. Smidth&Co. en una planta cementera en Dinamarca.

En 1985 Takagi y Sugeno aportan a la teoría del control difuso un nuevo método llamado Takagi-Sugeno-Kang (TSK), como alternativa del método Mamdani y



desarrollan la primera aproximación para construir reglas difusas a partir de datos de entrenamiento (observación).

En 1987 Hitachi usa un controlador fuzzy para el control del tren de Sendai, el cual usa uno de los sistemas más novedosos creados por el hombre. En 1993, Fuji aplica la Lógica Borrosa para el control de inyección química en plantas depuradoras de agua por primera vez en Japón. Ha sido precisamente aquí, en donde más apogeo ha tenido la Lógica Difusa (Zatarain, 2011).

2.2.2.2 Que es Lógica Difusa.

Se entiende por lógica difusa la forma de representar matemáticamente, razonamientos e ideas imprecisas o aproximadas. En ella, predomina el significado y esencia de un evento por encima de su descripción precisa (Matute y Suárez, 2017). El concepto de lógica difusa es muy común, está asociado con la manera en que las personas perciben el medio, por ejemplo ideas relacionadas con la altura de una persona, velocidad con la que se mueve un objeto, la temperatura dominante en una habitación, cotidianamente se formulan de manera ambigua y depende de quién percibe el efecto físico o químico, será su enunciado acerca de tal fenómeno, puede aplicarse con facilidad a los problemas del mundo real donde el grado de pertenencia a un conjunto de soluciones es gradual. Este aspecto facilita el diseño, la construcción e implementación de los diferentes sistemas de control utilizados en los sistemas eléctricos de potencia de una manera más simple y económica (Blanco, 2009).

Lógica difusa¹ (FL) es una lógica multi-valuada que permite (por medio de conjuntos de pertenencia) una forma más práctica de enfocar los problemas como se ven en el mundo real. Al contrario que la información binaria (si/no), la lógica difusa emula



la habilidad de razonamiento y hace uso de datos aproximados para encontrar soluciones precisas (Acosta, 2006).

La lógica difusa es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta, en general la lógica difusa imita como una persona toma decisiones basada en información con las características mencionadas. Una de las ventajas de la lógica difusa es la posibilidad de implementar sistemas basados en ella tanto en hardware como en software o en combinación de ambos. La lógica difusa se basa en lo relativo de lo observado. Este tipo de lógica toma dos valores aleatorios, pero contextualizados y referidos entre sí (Ponce, 2010).

La lógica difusa es una técnica que permite trabajar con información con alto grado de imprecisión, es una lógica multivaluada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones entre: 0 y 1, si y no, falso y verdadero, negro y blanco, caliente y frío, pertenece y no pertenece, etc.

La lógica difusa (Fuzzy Logic) ha surgido como una herramienta importante para el control de subsistemas y procesos industriales complejos, así como también para la electrónica de entretenimiento y hogar, sistemas de diagnóstico y otros sistemas expertos. En esencia un controlador lógico difuso, contiene un algoritmo que es capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una estrategia de control automático. Con la lógica difusa se pueden diseñar aplicaciones para que las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior, con lo que se busca imitar el comportamiento humano. La creación de una máquina con lógica difusa, es forjar un sistema experto, en donde el comportamiento de la máquina, va a estar basado



totalmente en el conocimiento del experto o de la persona que aporta sus conocimientos empíricos para el funcionamiento de ésta (Ponce, 2010).

En el área del control, la lógica difusa ha permitido obtener resultados espectaculares, resultados que han avalado la teoría. Si se hace un razonamiento con lógica difusa dentro de un sistema experto se obtiene una expresión también difusa, siendo usual tener que asignarle posteriormente un valor lingüístico. En cambio, cuando se realiza un razonamiento difuso para controlar un proceso, el resultado buscado es de una cualidad completamente diferente, ya que lo que ha de generarse es un conjunto de valores numéricos precisos a lo que una vez traducidos a las magnitudes físicas correspondientes: presión, voltajes, corrientes, etc.; han de introducirse a los actuadores de control (Ponce, 2010).

2.2.2.3 Controladores.

De la misma manera, la lógica difusa se aplica a través de controladores difusos para la calidad del agua, los sistemas de operación automática de trenes, los sistemas automáticos de operación de contenedores, los elevadores, los reactores nucleares, las transmisiones de automóviles y las computadoras, por mencionar diversos ejemplos interesantes (Ponce, 2010).

a) Sistemas de control en lazo abierto.

Son aquellos en que la variable de salida (variable controlada) no tiene efecto sobre la acción de control (variable de control). No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia). Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija. La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador. En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente (Ponce, 2010).



Suele aparecer en dispositivos con control secuencial, en el que no hay una regulación de variables, sino que se realizan una serie de operaciones de una manera determinada. Esa secuencia de operaciones puede venir impuesta por eventos (event-driven) o por tiempo (timed-driven). Se programa utilizando PLC (controladores de lógica programable) (Ponce, 2010).

b) Sistema de control en lazo cerrado.

Son aquellos en que la señal de salida del sistema (variable controlada) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control). Cuando opera en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia. Esta reducción se logra manipulando alguna variable de entrada del sistema, siendo la magnitud de dicha variable de entrada función de la diferencia entre la variable de referencia y la salida del sistema (Ponce, 2010).

2.2.2.4 Uso de lógica difusa en los sistemas de control.

Este conjunto de aplicaciones ha sido motivado por el deseo satisfacer uno o más de los siguientes objetivos:

- a) Mejorar la robustez que se obtiene con los métodos clásicos de control lineales.
- b) Diseño de control simplificado para modelos complejos.
- c) También se obtiene una implementación simplificada.
- d) Autonomía.
- e) Adaptabilidad.
- f) En el caso del control difuso, no es necesario un modelo matemático de la planta.

Una de las bondades de los sistemas difusos es que no necesitan el modelado de una planta ni la ejecución de la identificación en tiempo real. La esencia del control difuso



es que convierte la estrategia de control lingüístico, la cual se basa en el conocimiento de un experto, en una estrategia de control automático.

Es muy importante tener presente el hecho de que los controles difusos se basan en reglas de control empíricas, ya que el objetivo de esta sección es esbozar de una manera generalizada la lógica difusa. Para este punto es bien sabido que el modelado difuso es un método para escribir las características de un sistema usando reglas de inferencia difusas. Se hace especial referencia en el manejo de las reglas de control difuso, comúnmente extraídas de un experto, y de la sintonización de éstas. Para una mejor idea de por qué se suscitan algunos problemas en estos aspectos, en la siguiente sección se ofrece un panorama general de lo que es la lógica difusa usando como medio de explicación algunas comparaciones con la lógica tradicional (Ponce, 2010).

2.2.2.5 Teoría de Conjuntos difusos.

La lógica difusa permite tratar con información que no es exacta o con un alto grado de imprecisión a diferencia de la lógica convencional la cual trabaja con información precisa. El problema principal surge de la poca capacidad de expresión de la lógica clásica.

Conjuntos clásicos.

Los conjuntos clásicos surgen por la necesidad del ser humano de clasificar objetos y conceptos. Estos conjuntos pueden definirse como un conjunto bien definido de elementos o mediante una función de pertenencia μ que toma valores de 0 ó 1 de un universo en discurso para todos los elementos que pueden o no pertenecer al conjunto. Un conjunto clásico se puede definir con la función de pertenencia mostrada en la ecuación 1.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin A \\ 1 & \text{si } x \in A \end{cases}$$

2.2.2.6 Conjuntos difusos.

Primero es indispensable establecer cierta nomenclatura y terminología. Cuando se habla de conjuntos nítidos, la variable típica a usar es la X . En conjuntos difusos la función de pertenencia que se utiliza es la μ . Ésta toma los valores entre cero (0) y uno (1); como se mencionó, la forma de representación de los conjuntos difusos puede ser de dos maneras: de forma continua o discreta, como se presenta a continuación (Ponce, 2010).

Un conjunto difuso se escribe con una tilde arriba del nombre del conjunto:

$$\tilde{A} = \{a,, \}$$

Ésta se utiliza para diferenciarlos de los conjuntos nítidos.

En la lógica difusa los conjuntos se pueden presentar en forma continua o discreta.

a) Conjunto difuso discreto:

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_A(X_1)}{X_1} + \frac{\mu_A(X_2)}{X_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_t \frac{\mu_A(X_t)}{X_t} \right\}$$

En este punto es importante recordar que el signo (1) no indica suma sino unión. Dicha forma de representación es muy empleada en los sistemas digitales como los microcontroladores, computadoras, etcétera.

b) Conjunto difuso continuo:

$$\tilde{A} = \left\{ \int \frac{\mu_A(X)}{X} \right\}$$

Un conjunto convencional se define por una función característica, que se conoce también como función de pertenencia. El símbolo de integral denota \int unión de elementos del conjunto.

c) **Lógica simbólica**

La lógica difusa tiene sus bases en la lógica simbólica. La lógica simbólica permite el establecimiento de un lenguaje artificial empleando símbolos para de esta forma representar argumentos lógicos complicados. Partiendo de proposiciones, es decir, de oraciones verdaderas o falsas, es posible traducirlas a un lenguaje de símbolos y representaciones, para posteriormente simplificar y ejecutar operaciones, e incluso traducir nuevamente hacia proposiciones de lenguaje ordinario.

Una proposición puede ser simple, con valor de Verdadero o Falso, o compuesta, dependiendo de los valores de verdad de componentes simples conectados a partir de operadores como: y, o, no, entre otros. El operador y se denomina conjunción, y se simboliza con \wedge . El operador o se denomina disyunción, y se simboliza con \vee . A continuación, se muestran las definiciones de la conjunción y disyunción para dos proposiciones simples p y q (Ponce, 2010).

Tabla 1: De verdad de la conjunción y la disyunción

p	q	$p \wedge q$	$p \vee q$
V	V	V	V
V	F	F	V
F	V	F	V
F	F	F	F

Fuente: (Ponce, 2010).

La negativa de una proposición se denomina negación.

Ejemplo:

“Tengo un lápiz y una pluma” es una conjunción.

“Tengo un lápiz o una pluma” es una disyunción.

“No tengo un lápiz” es una negación.

Existen proposiciones condicionales de la forma “si p , entonces q ”; p es el antecedente o hipótesis, y q es el consecuente o la conclusión. Una forma de simbolizar las proposiciones condicionales es: $p \rightarrow q$, y su tabla de verdad se muestra a continuación.

Tabla 2: De verdad de una proporción condicional

p	q	$p \rightarrow q$
V	V	V
V	F	F
F	V	V
F	F	V

Fuente: (Ponce, 2010).

Ejemplo:

“Si $1 + 1 = 2$, entonces $4 > 0$ ” es una proposición condicional verdadera.

“Si $1 + 1 = 3$, entonces $4 > 0$ ” es una proposición condicional verdadera.

“Si $1 + 1 = 3$, entonces $4 < 0$ ” es una proposición condicional verdadera.

“Si $1 + 1 = 2$, entonces $4 < 0$ ” es una proposición condicional falsa.

2.2.2.7 Variables Lingüísticas

Una variable lingüística adopta valores con palabras que permiten describir el estado de un objeto o fenómeno; estas palabras se pueden representar mediante conjuntos difusos. Una variable numérica toma valores numéricos, por ejemplo: edad 5 65, mientras que una variable lingüística toma valores lingüísticos: edad es “viejo”. Todos los valores lingüísticos forman un conjunto de términos o etiquetas (Blanco, 2009).

Para desarrollar un control con estas características, es necesario un experto, en este caso el trabajador, del cual se tomará un registro de las situaciones que se le presentan, así como de la solución que él les da. Esta experiencia se traduce en reglas que usan variables lingüísticas.

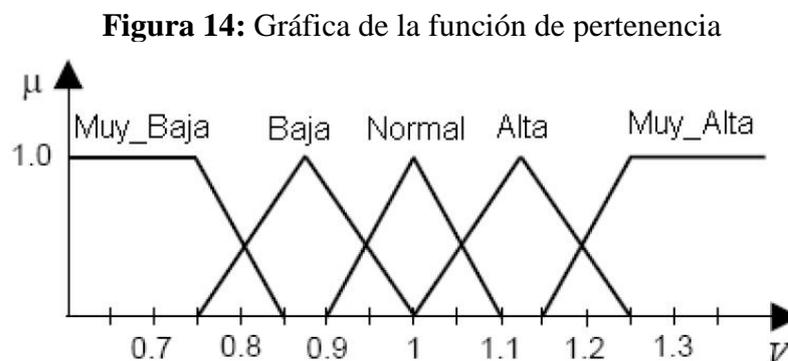
Para hacer este control es necesario tener las entradas del sistema y éstas se van a mapear a variables lingüísticas. A este mapeo se le llama difusificación. Con estas variables se forman reglas, las cuales serán las que regirán la acción de control que será la salida del sistema (Ponce, 2010).

Ejemplo 1, Sea la variable *Tensión*, suponiendo que esa variable puede asumir los valores lingüísticos Muy_Baja, Baja, Normal, Alta y Muy_Alta. El conjunto de valores asumidos por la variable lingüística es denominado *Conjunto de Términos* representado por $T(x)$, donde x es la variable. Los valores asumidos por la variable lingüística son representados por conjuntos difusos definidos por las correspondientes funciones de pertinencia.

Variable lingüística: Tensión (V)

Conjunto de términos: $T(V) = \{\text{Muy_Baja, Baja, Normal, Alta, Muy_Alta}\}$

Las funciones de pertenencia se muestran en las gráficas de la Fig. 14.



Fuente: (Ponce, 2010)



2.2.2.8 Funciones de Pertenencia

La definición de las funciones de pertenencia empleadas en una aplicación de sistemas difusos es una etapa fundamental y difícil en el desarrollo de esa aplicación. No existen reglas definitivas para la elección de dichas funciones las cuales representan el conocimiento de un especialista en el tema en cuestión o informaciones extraídas de un banco de datos (Blanco, 2009).

Algunas características de las funciones de pertenencia, son:

- a. **Formato:** Triangular, trapezoidal, Gaussiana, sigmoïdal, etc.
- b. **Obtención:** Elegida por los usuarios basados en su experiencia o a través de un proceso de optimización a partir de datos experimentales u obtenidos por simulación.
- c. **Solapamiento:** No es necesario, pero es importante para dar robustez al sistema difuso. En general el solapamiento es de dos funciones.
- d. **Normalización:** Generalmente las funciones de pertinencia son definidas en el intervalo $[0, 1]$. No es obligatorio más facilita la implementación de sistemas difusos.

2.2.2.9 Modelos Basados en Lógica Difusa

Los modelos ayudan a ver el comportamiento y la estructura básica de procesos complejos (Tong, 1977). Hay una variedad de modelos difusos de acuerdo a la forma de las reglas *IF THEN* involucradas en los modelos difusos, pero pueden ser clasificados en dos principales modelos: el propuesto por *Mamdani* en (Mamdani y Assilian, 1975) y el propuesto por (Takagi y Sugeno, 1985).

Los modelos basados en lógica difusa, son:

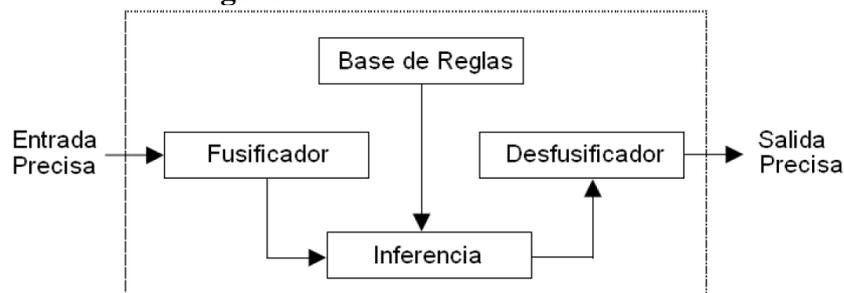
2.2.2.9.1 Modelos Difusos Lingüísticos ó Mamdani

Este sistema difuso es el más usado cuando se trabaja con la metodología Fuzzy y fue uno de los primeros sistemas de control que utilizo conjuntos difusos. El método de Mamdani fue propuesto en 1975 por Ebrahim Mamdani (Pantoja, 2013).

Las principales ventajas del modelo difuso de *Mamdani* se especifican a continuación. Primero, su simplicidad en la representación de las reglas difusas, tanto las premisas como los consecuentes tienen forma de conjunto difuso lo que facilita su interpretación. Segundo, su flexibilidad en la materialización debido a la posibilidad de seleccionar las operaciones del motor de inferencia, del fusificador o defusificador (Acosta, 2006).

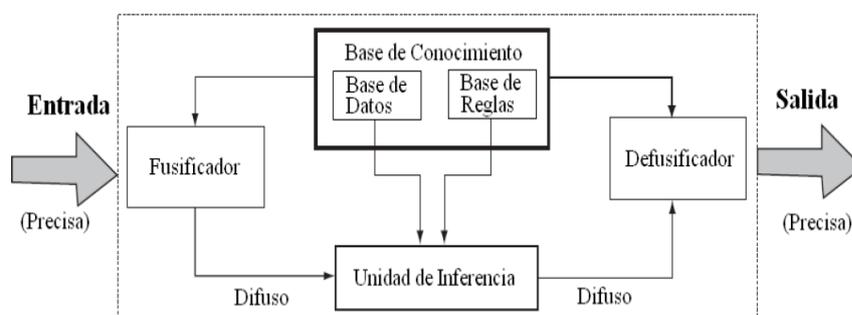
En la Fig. 3 y 4, se muestran el diagrama de bloques de este modelo.

Figura 15: Modelo difuso mamdani



Fuente: (Sáez, 2002)

Figura 16: Modelo difuso mamdani



Fuente: (Sáez, 2002).



A continuación, se describe cada elemento que conforma a este tipo de sistema difuso para dar una mejor idea de la interpretación de este sistema.

a) Fusificación

En general, la fusificación es el proceso mediante el cual se transforma un valor numérico concreto de una variable de entrada en un conjunto difuso que representa dicho valor.

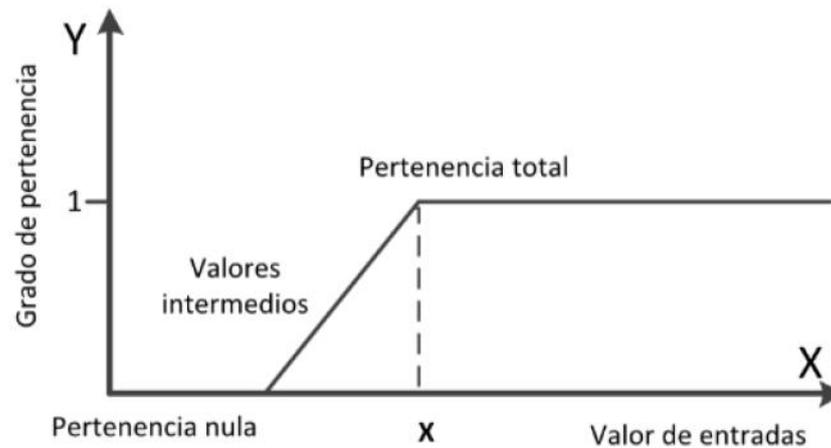
El primer paso consiste en tomar las entradas y determinar el grado al que ellos pertenecen con respecto a cada uno de los conjuntos difusos apropiados y la entrada siempre es un valor numérico limitado al universo del discurso de la variable de entrada.

Los fusificadores se pueden clasificar en dos categorías: el fusificador unitario y el no unitario. Un fusificador unitario produce un conjunto el cual se reduce a un punto, el correspondiente al valor preciso de la entrada y tiene grado de pertenencia máximo. Los restantes puntos del universo no pertenecen al conjunto en ningún grado. Para ello, se utiliza una función de pertenencia doblemente evaluada, ver la ecuación 2.23 (Pantoja, 2013).

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{x es x = y } \in \text{Univ} \\ 0 & \text{x es x } \neq \text{y } \in \text{Univ} \end{cases}$$

Un fusificador no unitario produce un conjunto difuso cuyo marco de trabajo contiene más de un punto. En estos fusificadores, el valor de pertenencia es máximo $\mu(x) = 1$ para $x = y$. Si la variable x se aleja de y , el valor de pertenencia decrece, ver Figura 4. (Pantoja, 2013).

Figura 17: Valor de pertenencia del fuzzificador no unitario



Fuente: (Pantoja, 2013).

b) Base de Reglas

La base de reglas es un conjunto de reglas difusas expresadas en forma lingüística. Estas expresiones son utilizadas para establecer relaciones causa-efecto entre dos proposiciones difusas las cuales son expresadas mediante variables lingüísticas y se expresan generalmente como:

si proposicion A entonces propocision B

En la teoría de control se estudian estas expresiones con la siguiente forma:

si A es B entonces C es D

Interpretando la expresión, se observa que la relación difusa está definida en los dominios de las variables lingüísticas A y C por lo que el grado de verdad de la implicación es:

- El antecedente de la proposición es A es B y es representado por un conjunto difuso B.
- El consecuente de la proposición es C es D y es representado por el conjunto D.

El significado de la evaluación de la expresión es una relación difusa que se expresa de la siguiente manera, ver ecuación 2.24 (Pantoja Laces, 2013, p.33)



$$(A,C)=(A,C) .\mu(A,C) (2.24)$$

En donde el operador puede ser un simple producto cartesiano o algún operador de implicación difuso. Si el antecedente o el consecuente son proposiciones compuestas, entonces se calcula primeramente la función de pertenencia de la proposición compuesta y el operador es aplicado a las funciones de pertenencia resultantes. Por lo que cualquier operación o relación en lógica difusa corresponde a operaciones y relaciones entre funciones de pertenencia que dan como resultado otras funciones de pertenencia (Pantoja, 2013).

c) Inferencia

Los sistemas difusos Mamdani reciben este nombre debido al método de inferencia que utiliza en este caso Mamdani. El mecanismo de inferencia es el encargado de disparar las reglas, es decir, obtener una salida difusa a partir de una entrada difusa. Existen dos tipos de inferencia, las cuales son (Ríos, 2005).

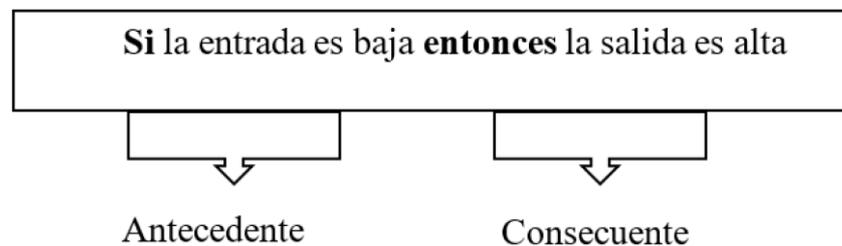
Inferencia basada en composición: las relaciones difusas que representan el significado de cada regla individual son agregadas a la relación difusa que describe el significado del conjunto de reglas. Esta operación se realiza mediante la composición entre la entrada difusa y la relación que describe el significado del conjunto de reglas. El resultado de la composición es el conjunto difuso que describe el valor de la salida de control (Ríos, 2005).

Inferencia basada en el disparo individual: en este caso, cada regla se dispara individualmente. El disparo puede interpretarse como el cómputo del grado de pertenencia que se asigna a la entrada no difusa en la función de pertenencia que describe el antecedente de la regla y enganchar el conjunto difuso que describe el significado de la consecuencia de la regla con el grado al cual el antecedente de la regla ha sido asociado

por la entrada no difusa. Finalmente, los valores enganchados (o recortados) para la salida de control son agregados para formar la salida final (Ríos, 2005).

El método Mamdani utiliza reglas tipo Si-entonces. Una regla de la base de reglas o base de conocimiento tiene dos partes: el antecedente y la conclusión, como se observa en la Figura 5. En un sistema difuso tipo Mamdani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas están dados bajo la forma de la expresión de la regla (Pantoja, 2013).

Figura 18: Regla Si-entonces Mamdani



Fuente: (Mayta y Tintaya, 2018).

d) Defusificación

Es un interfaz de defusificación que provee salidas discretas y determinísticas a partir de los conjuntos difusos C' obtenidos como resultado de la inferencia (Blanco, 2009).

Existen diferentes métodos de defusificación, algunos de los cuales se describen a continuación:

- **Método del máximo.** La salida corresponde al valor para el cual la función de pertenencia $^{\mu}C'$ alcanza su máximo.
- **Media del máximo.** La salida es el promedio entre los elementos del conjunto C' que tienen un grado de pertenencia máximo.

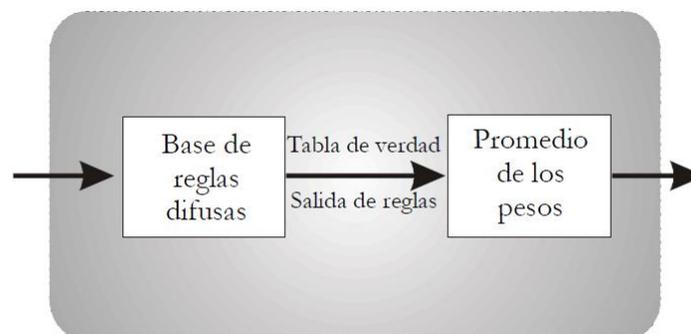
- **Centro de área.** Genera como salida el valor correspondiente al centro de gravedad de la función de pertenencia del conjunto de salida C' .

2.2.2.9.2 Modelos Difusos de Takagi y Sugeno

Estos modelos se caracterizan por relaciones basadas en reglas difusas, donde las premisas de cada regla representan subespacios difusos y las consecuencias son una relación lineal de entrada-salida (Blanco, 2009).

La principal ventaja de este modelo difuso es su poderosa capacidad de representar relaciones complejas y no lineales en un conjunto con un pequeño número de reglas difusas *IF-THEN*. En suma, los consecuentes en el modelo de Mamdani, con reglas difusas *IF-THEN*, son reemplazados por consecuentes en forma de relaciones lineales de Takagi-Sugeno (Acosta, 2006).

Figura 19: Configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno



Fuente: (Acosta, 2006).

Las variables de entrada en las premisas de cada regla son relacionadas por operadores "y" y la variable de salida es una combinación lineal de las variables de estado.

Por lo tanto, las reglas del modelo tienen la siguiente forma:

$$R_i : \text{Si } X_1 \text{ es } A_{1i} \text{ y } \dots \text{ y } X_k \text{ es } A_{ki}$$

$$\text{Entonces } Y_i = p_o^i + p_1^i X_1 + \dots + p_k^i X_k$$

Donde X_1, \dots, X_k son las variables de entrada o premisas de las reglas, A_{1i}, \dots, A_{ki} son los conjuntos difusos asociados a las variables de entrada,

p_o^i, \dots, p_k^i son los parámetros de la regla i , e Y_i es la salida de la regla i .

Por lo tanto, la salida del modelo, Y , se obtiene ponderando la salida de cada regla por su respectivo grado de cumplimiento W_i , es decir:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^M W_i Y_i}{\sum_{i=1}^M W_i}$$

Donde M es el número de reglas del modelo y W_i se calcula según el operador intersección.

2.2.3 Control difuso

La lógica difusa se aplica principalmente en sistemas de control difuso que utilizan expresiones ambiguas para formular reglas que controlen el sistema. El control difuso es un método alternativo conveniente para construir controles no lineales mediante el uso de información heurística que proviene de un experto. La metodología de diseño consiste en construir un conjunto de reglas orientadas a controlar determinado proceso, estas reglas son proporcionadas al controlador difuso con el fin de emular la toma de decisiones del experto (Bojadziev y Bojadziev, 1995). El control difuso puede aplicarse tanto en sistemas muy sencillos como en sistemas cuyos modelos matemáticos sean muy complejos.

El control difuso es una tecnología actualmente muy bien desarrollada que permite utilizar conocimiento de naturaleza heurística para controlar un sistema. Tiene la propiedad de poder manejar imprecisión y vaguedad en la información que utiliza.

Tienen una gran popularidad ya que, aún sin aprobar del todo la rigurosa métrica que la teoría de control impone, han captado el interés de fabricantes de equipos



electrónicos y de control al ser aplicados con éxito a un sinnúmero de aparatos y dispositivos (Blanco, 2009).

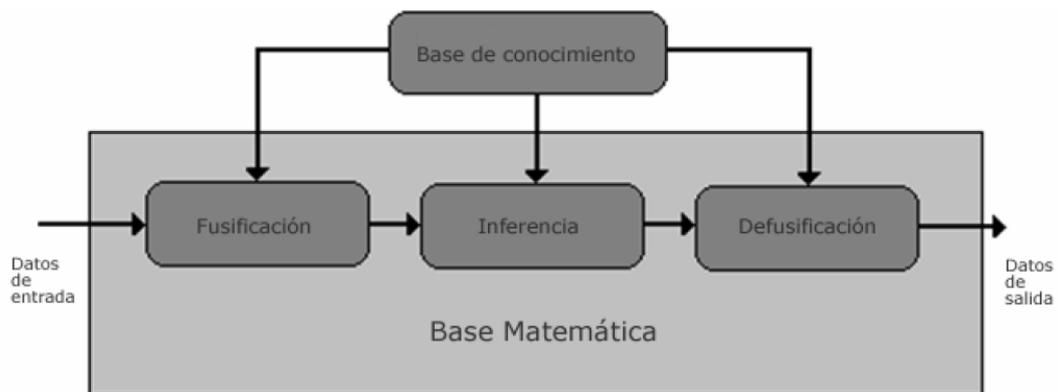
El control difuso es una estrategia que pertenece al Control Inteligente cuyas decisiones las toman utilizando un sistema de inferencia basado en lógica difusa. Un controlador difuso es por naturaleza no lineal y existen diversos tipos, en general se define un conjunto de estructuras básicas cuyo comportamiento se aproxima a los controladores clásicos del tipo Proporcional (P), Integral (I) o Derivativo (D). Donde estas denominaciones dependen del procesamiento que se realice sobre la señal de error antes de entrar al sistema de inferencia difuso (Blanco, 2009).

El desarrollo del control difuso tiene, su comienzo en los sistemas establecidos en reglas para la toma de decisiones y en la lógica difusa para la evaluación de aquellas.

Los controladores difusos, al igual que otros, toman los valores de entrada, cumplen algún procedimiento con ellas, deciden como variar las variables de salida y lo realizan, afectando así estas últimas a la planta. La diferencia notable es que no procesan ecuaciones ni tablas, procesan reglas para decidir cómo cambiar las salidas. Esto lo hace una tecnología muy viable, ya que las reglas están más cerca del sentido común que de las ecuaciones y los modelos (Saldaña *et al.* 2013).

Un controlador difuso está compuesto de cuatro partes principales: fusificación, base de conocimientos, Inferencia e defusificación, las cuales se detallan a continuación (Zadeh, 1965).

Figura 20: Estructura de un controlador difuso



Fuente: (Zadeh, 1965).

Para lograr que la estructura del control difuso funcione correctamente se debe recurrir a los siguientes pasos:

- ✓ Definir cuáles son las entradas.
- ✓ Definir cuáles son las salidas.
- ✓ Fusificar las entradas.
- ✓ Evaluar el sistema que cumpla con las reglas.

a) **Fusificación:**

Tiene como objetivo convertir valores reales en valores difusos. En la fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos.

El control difuso siempre involucra este proceso de fusificación, esta operación se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor.

b) **Base de conocimiento:**



Contiene el conocimiento asociado con el dominio de la aplicación y los objetivos del control. En esta etapa se debe definir las reglas lingüísticas de control que realizarán la toma de decisiones que decidirán la forma en la que deben actuar el sistema.

c) Inferencia (Evaluación de Reglas):

Relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definirán el sistema. En la inferencia se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones.

d) Defusificación:

Realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia en valores crisp, que posteriormente se utilizarán en el proceso de control. En la defusificación se utilizan métodos matemáticos simples como el método del centroide, método del promedio ponderado y método de membresía del medio máximo (Zadeh, 1965).

Se tienen dos (2) tipos de controladores, los que se caracterizan de acuerdo a la forma en que se definen las salidas difusas. Estos son los denominados Mamdani (Mamdani y Assilian, 1975) y Takagi-Sugeno (Takagi y Sugeno, 1985).

El control difuso tipo Mamdani se caracteriza por la siguiente forma general de sus reglas difusas:

Si “ u_1 ” es A_i y “ u_2 ” es B_i , entonces “ y ” es C_i

Es decir, la salida de dicho controlador es un conjunto difuso, por lo que será necesaria una etapa de defusificación para obtener un valor discreto en la salida del controlador.

Por su parte, el control difuso tipo Takagi-Sugeno está caracterizado por la siguiente forma de reglas difusas:



Si “ u_1 ” es A_i y “ u_2 ” es B_i , entonces $y = f(u_1, u_2)$

Lo que significa que la salida del controlador Takagi- Sugeno no necesitará una etapa de defusificación, debido a que se obtiene directamente un valor discreto.

2.2.3.1 Características del Control Difuso

El control difuso tiene tres características principales:

- Es un control lógico. El calificativo de lógico significa que el algoritmo de control usa expresiones IF-THEN, en las que se puede describir una amplia variedad de condiciones, combinando expresiones lógicas con IF y AND.
- Es un control disperso. Esta característica, que diferencia esencialmente los sistemas de control difuso de los sistemas de control basados en una sola ecuación, permite la coexistencia de controladores con lógicas distintas y su ejecución en paralelo.
- Es un control lingüístico. En efecto permite el uso de variables lingüísticas imprecisas, en particular en los antecedentes de las reglas. Este lenguaje cualitativo es fácil de entender, permite realizar el control mediante un diálogo con los operadores, utilizando sus ojos experimentados en la observación del proceso como entradas externas, e introducir cosas como las condiciones del proceso como información útil para el control.

Además, el control difuso no necesita de un modelamiento matemático y el algoritmo de control puede incluir los procedimientos inusuales que acompañan siempre las operaciones de un proceso real (Ponce, 2010).



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto de investigación es del tipo aplicativo debido a que con el conocimiento teórico se busca generar una solución alternativa aplicada a la calidad de energía. según (Lozada, 2016). La investigación de tipo aplicativo busca generar conocimiento que se aplique directamente a temas sociales o del sector productivo. Este es básicamente un proceso de conectar teorías y productos basados en los logros tecnológicos de la investigación básica. Nivel de investigación exploratorio por que se tiene pocos estudios referidos al tema en específico según (Arias, 2012). La investigación exploratoria es el estudio de temas u objetos desconocidos o poco estudiados, por lo que los resultados constituyen una visión aproximada del objeto. En otras palabras, un nivel de conocimiento superficial. Cuasi experimental según Palella & Martins (2012). Cuando no sea factible utilizar un verdadero diseño no experimental, se utiliza la investigación cuasi-experimental. Es un método Basado en la identificación de factores que puedan interferir con su efectividad interna y externa. Incluir experimentos con grupos completos de sujetos, porque no siempre es posible seleccionar sujetos al azar en la investigación.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

Población: Para el presente proyecto de investigación, se considera como población a investigar al prototipo experimental.

Muestra: este proyecto de investigación se enfoca principalmente en controlar y monitorear la tensión de salida del generador síncrono.

3.3 UBICACIÓN

El presente proyecto de investigación, regulación de tensión de un generador síncrono utilizando un controlador difuso, su ámbito de estudio y aplicación se desarrolló en el laboratorio de control y automatización de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, ubicado geográficamente en la Región Puno, a orillas del lago Titicaca. De la ciudad de Puno.

Figura 21: Ubicación del proyecto de investigación



Elaborado por el equipo de trabajo

3.4 MATERIALES

3.4.1 PLC S7 1200 SIEMENC

El controlador S7-1200 proporciona la flexibilidad y la capacidad de controlar varios dispositivos para satisfacer diferentes necesidades de automatización. Debido a su diseño compacto, configuración flexible y amplio conjunto de instrucciones, S7-1200 es muy adecuado para controlar varias aplicaciones. La CPU integra un microprocesador, fuente de alimentación incorporada, circuitos de entrada y salida, PROFINET

incorporado, E / S de control de movimiento de alta velocidad y entrada analógica incorporada, todo integrado en una carcasa compacta, formando un potente controlador. Una vez que el programa se carga en la CPU, la CPU contiene la lógica necesaria para monitorear y controlar los dispositivos en la aplicación. La CPU monitorea la entrada y cambia el estado de la salida de acuerdo con la lógica del programa de usuario, que puede incluir lógica booleana, instrucciones de conteo y temporización, funciones matemáticas complejas y comunicación con otros dispositivos inteligentes. La CPU contiene un puerto PROFINET para la comunicación en la red PROFINET. Se pueden utilizar módulos adicionales para la comunicación en redes PROFIBUS, GPRS, RS485 o RS232 (Siemens, 2017).

Figura 22: PLC S7 1200



Fuente: (Siemens, 2017)

3.4.2 Simatic s7-1200, Módulo de Entradas Analógicas, sm 1231

El controlador modular compacto S7-1200 Proporciona la potencia y flexibilidad para controlar una amplia variedad de para controlar una amplia variedad de dispositivos



de apoyo a sus necesidades de automatización. El diseño compacto, configuración flexible y potente conjunto de flexible y potente conjunto de instrucciones se combinan para hacer que el S7-1200 sea la solución perfecta para el control de una amplia variedad de aplicaciones.

EL S7-1200 CPU dispone de las siguientes áreas de memoria:

Memoria de carga - un área de almacenamiento no volátil para el programa de usuario, los datos y la configuración

- Memoria de trabajo Memoria de trabajo - un área de un área de almacenamiento volátil para algunos elementos del proyecto de usuario utilizado por la CPU mientras se ejecuta utilizado por la CPU mientras se ejecuta el programa de usuario

- Memoria retentiva - un área de almacenamiento no volátil que se utiliza almacenamiento no volátil que se utiliza para "retener" una cantidad limitada de valores de la memoria de trabajo durante una pérdida de potencia Sector Industria una pérdida de potencia

La memoria de usuario integrada

- Admite una frontera "flotante" entre el programa y de usuario, los datos de los programas y los datos de configuración

- Almacena los comentarios del programa y símbolos de usuario

- Almacena la información de configuración y general para cada dispositivo de y general para cada dispositivo de hardware

Su Rendimiento en La CPU S7-1200 combina un microprocesador, una fuente de alimentación integrada entradas alimentación integrada, entradas, salidas y en una carcasa compacta para crear un controlador muy potente. La CPU controla cambios de entradas/salidas y de acuerdo a la lógica del programa de usuario, que puede incluir lógica booleana contaje temporizador lógica booleana, contaje, temporizador, operaciones

matemáticas, y la comunicación con otros dispositivos Sector Industria inteligentes (Siemens, 2011).

Figura 23: Modulo de entradas analógicas



Fuente: (Siemens, 2021).

3.4.3 SM 1238 Energy Meter 480VAC

El medidor de energía SM 1238 480VAC está diseñado para implementación a nivel de máquina en un S7-1200 sistema. 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. Puedes determinar el consumo pronósticos y eficiencia a partir de los valores medidos. Las medidas de potencia son relevantes para gestión y mantenimiento de carga. Además, puede utilizar las medidas de energía informes y para determinar la huella de CO2 (Siemens, 2019).

Medición con medidor de energía SM 1238 480VAC

Una red de energía CA típica para una planta de producción se divide en tres rangos de voltaje:

- La entrada de toda la planta.
- La distribución, por ejemplo, a líneas individuales dentro de la planta.
- Las cargas eléctricas finales, como las máquinas en una línea de producción.

Figura 24: Energy meter 480VAC



Fuente: (Siemens, 2019)

3.4.4 Detector de proximidad inductivo

Los sensores de proximidad inductivos básicos se utilizan para detectar objetos metálicos sin contacto físico. Son de montaje empotrado de serie y aptos para todos los entornos metálicos, ya que aseguran una distancia máxima de detección, incluso si hay un fondo metálico

Estos sensores son resistentes y compactos, lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones (Schneider Electric Industries, 2019) , que incluyen:

- a) Manejo de materiales
- b) Equipo móvil
- c) Embalaje
- d) Máquinas herramientas
- e) Escaleras mecánicas

Figura 25: Detector de proximidad inductivo



Fuente: (Schneider Electric Industries, 2021)

3.4.5 Fuente de alimentación profesional BAKU BK-305D 0-30V 5

La unidad de potencia de laboratorio BK-305D está construida según el esquema clásico con un transformador potente y confiable, que hace posible alimentar una carga de al menos 150 W. Dicha fuente de alimentación se caracteriza por la capacidad de variar la corriente y el voltaje.

Para cada parámetro, se proporciona un par de perillas: para un ajuste grueso, para un ajuste fino. Controle con precisión los parámetros de salida de la fuente de alimentación del laboratorio RXN-305D permite indicadores digitales brillantes de color

rojo. El RXN-305D también puede suministrar energía con éxito a una amplia variedad de dispositivos y se ha utilizado durante muchos años: con fines de investigación, para reparación y ajuste de equipos electrónicos, como unidad de suministro de energía de entrenamiento (Celuinfo, 2021).

Características:

Modelo: PS-305D

Voltaje de entrada: 220 V / 110 V \pm 10% 50 / 60Hz

Voltaje de salida: 0-30V

Corriente de salida: 0-5A

Estado de voltaje constante:

Estabilidad del voltaje: $<0.01\% + 3\text{mV}$

Estado actual constante:

Estabilidad actual: $<0.2\% + 3\text{mA}$

Rizo y ruido: $<3\text{mArms}$

Figura 26: Fuente de alimentación profesional



FUENTE: (Celuinfo, 2021)

3.4.6 Variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20

El variador de frecuencia Siemens Sinamics V20 es un dispositivo compacto y una opción ideal para soluciones estándar para la automatización de procesos. Están disponibles en seis tamaños con potencias que van desde 0,12 kW hasta 15 kW, son robustos, fáciles de usar, económicos y energéticamente eficientes. Las diferentes posibilidades de instalación y conexión facilitan la puesta en servicio. El módulo de servidor de red de acceso inteligente Sinamics V20 opcional simplifica la configuración y el diagnóstico. Su punto de acceso integrado puede realizar una conexión inalámbrica con diferentes dispositivos móviles. De esta manera, el operador puede beneficiarse de prácticas funciones adicionales, como un asistente de puesta en marcha, un sistema de parametrización simple y diferentes opciones de monitoreo. Esta serie está equipada con un panel de control externo, resistencia de frenado, cable de conexión, adaptador de montaje y otros accesorios.

El variador de frecuencia se utiliza para el control de velocidad del motor. Modifica la tensión alterna, cambia la frecuencia y amplitud para optimizar el proceso y reducir la carga mecánica de la máquina. Estos dispositivos se utilizan en muchas aplicaciones industriales como bombas, ventiladores, compresores, cintas transportadoras o automatización de edificios (Automation24, 2021).

Figura 27: Variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20



Fuente: (OVK Komplekt LLC, 2013)

3.4.7 Analizador de redes eléctricas trifásicas

El C.A 8335 (Qualistar) es un analizador de redes trifásicas de visualización gráfica a color y con batería recargable incorporada.

Su función es triple. Permite:

- medir valores eficaces, potencias y perturbaciones de las redes de distribución de electricidad.
- obtener una imagen al instante de las principales características de una red trifásica.
- seguir las variaciones de los diferentes parámetros en el tiempo.

La incertidumbre de medida del instrumento es mejor que 1% (sin tener en cuenta las incertidumbres debidas a los sensores de corriente). A ello se añade una gran flexibilidad debida a la elección de los diferentes sensores para medidas de algunos miliamperios (MN93A) a varios kiloamperios (Chauvin Arnoux, 2012)

Figura 28: Analizador de redes



Fuente: (Chauvin Arnoux, 2012)

3.4.8 Conversor Analógico Isolado

Los convertidores de la serie analógica Harmony están diseñados para convertir El sensor o la medición eléctrica se convierte en una señal eléctrica estándar compatible. Con plataforma de automatización, controlador (proceso térmico, velocidad, etc.). También permiten la distancia de conexión entre el sensor y la medida Equipos de recogida a añadir: por ejemplo, en termopares y Controladores programables. Estos convertidores cumplen con los estándares IEC, las certificaciones UL y CSA, y son adecuados para Usado generalmente.

Las tensiones inducidas por termopares varían entre 10 y 80 mV / ° C, sondas Pt100 (100 ohmios a 0 ° C) producen aproximadamente 0,5 mV / ° C, con corrientes de medición de 1 mA. Dependiendo del sensor, la señal a medir varía desde unos pocos mV (termopar) a 250 y 700 mV para una sonda Pt100. Por lo tanto, es difícil transmitir estas señales de bajo nivel a través de largas líneas eléctricas sin encontrando problemas de interferencia, reducción de señal o errores (Schneider Electric, 2021b).

Figura 29: Conversor analógico aislado



Fuente: (Schneider Electric, 2021a)

3.4.9 Motor de inducción trifásico

Para este proyecto de investigación se utiliza un motor de inducción trifásico como fuente de energía mecánica con las siguientes características:

Tabla 3: Especificaciones del motor de inducción trifásico

Especificaciones Principales	
Potencia	2HP/1.5KW
Tensión de trabajo	220/380/60 HZ
Corriente de consumo	6.4/3.7 AMP
Conexiones	Delta/Estrella
r.p.m.	1680
Grado de Protección	IP44

Nota: especificaciones de fabricante.

Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 30: Motor de inducción trifásica



Elaborado por el equipo de trabajo

3.4.10 Generador síncrono

Para conocer los parámetros del generador síncrono se realizaron las siguientes pruebas y cálculos:

Figura 31: Generador síncrono



Elaborado por el equipo de trabajo

3.4.10.1 Prueba de Vacío.

Para realizar la prueba de vacío. Colocamos el generador en vacío sin carga en sus bornes de salida a velocidad nominal y la fuente de corriente de campo igual a cero aumentando gradualmente como podemos ver en la tabla.

Tabla 4: Resultados de prueba de vacío

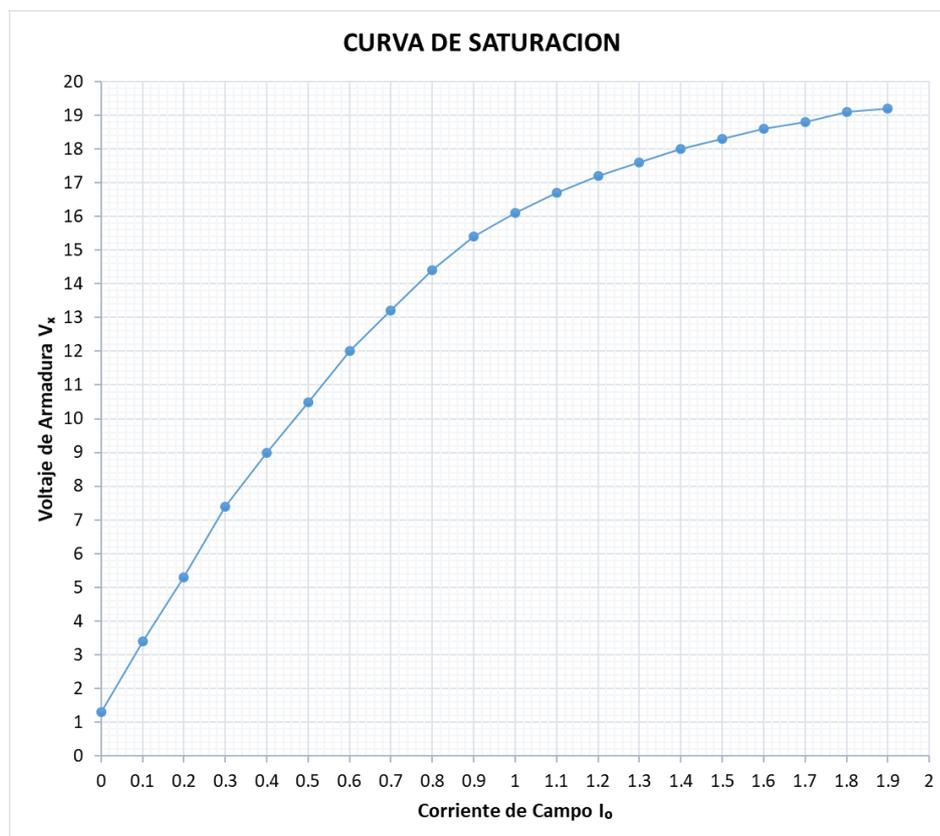
Corriente de Campo I_o	Voltaje de Armadura V_x
0	1.3
0.1	3.4
0.2	5.3
0.3	7.4
0.4	9
0.5	10.5
0.6	12
0.7	13.2

(continuación.....)

0.8	14.4
0.9	15.4
1	16.1
1.1	16.7
1.2	17.2
1.3	17.6
1.4	18
1.5	18.3
1.6	18.6
1.7	18.8
1.8	19.1
1.9	19.2

Nota: se presenta los resultados obtenidos de la prueba de vacío
Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 32: Curva de saturación



Elaborado por el equipo de trabajo

3.4.10.2 Prueba de cortocircuito.

Esta prueba se realiza conectando un amperímetro en serie con una de las tres líneas de cortocircuito. La corriente de excitación aumenta gradualmente y el valor de corriente correspondiente al registrar la corriente máxima de la armadura de cortocircuito no debe exceder el doble de la corriente especificada del generador.

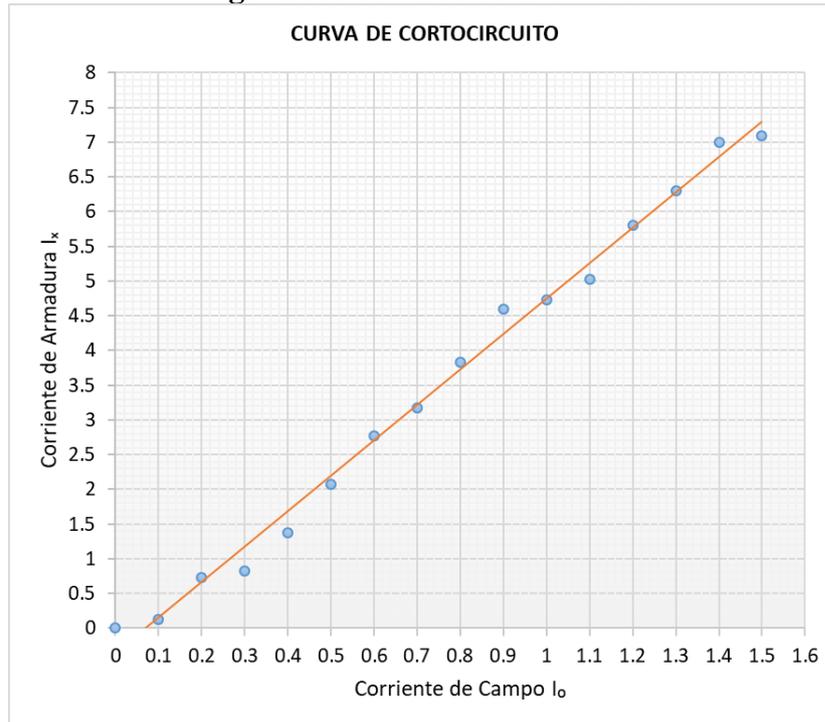
Tabla 5: Resultados de la prueba de cortocircuito

Corriente de campo I_o	Corriente de armadura I_x
0	0
0.1	0.13
0.2	0.73
0.3	0.83
0.4	1.37
0.5	2.07
0.6	2.77
0.7	3.17
0.8	3.83
0.9	4.6
1	4.73
1.1	5.03
1.2	5.8
1.3	6.3
1.4	7
1.5	7.1

Nota: se presenta los resultados de la prueba de cortocircuito

Elaborado por el Equipo de trabajo

Figura 33: Curva de corto circuito



Elaborado por el equipo de trabajo

3.4.10.3 Parámetros del Generador Síncrono.

De los resultados obtenidos de las pruebas de Vacío y Cortocircuito se procede a realizar los cálculos para obtener los parámetros del generador los cuales se presenta a continuación.

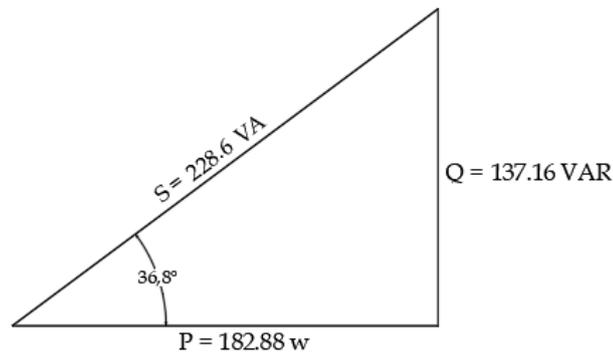
Tabla 6: Parámetros del generador síncrono

Parámetros	
Resistencia del Inducido (R_A)	1.1 Ω
Reactancia Síncrona (X_1)	3.219
Tensión Inducida (E_A)	26.193 $\angle 35^\circ$
Potencia Máxima (P_{total})	393.017 W
Potencia Activa (P)	182.883 W
Potencia Reactiva (Q)	137.163 VAR
Potencia Aparente (S)	228.604 VA
par inducido (τ)	3.119 N.M

Nota: se presenta las mediciones y cálculos realizados

Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 34: Triangulo de potencia

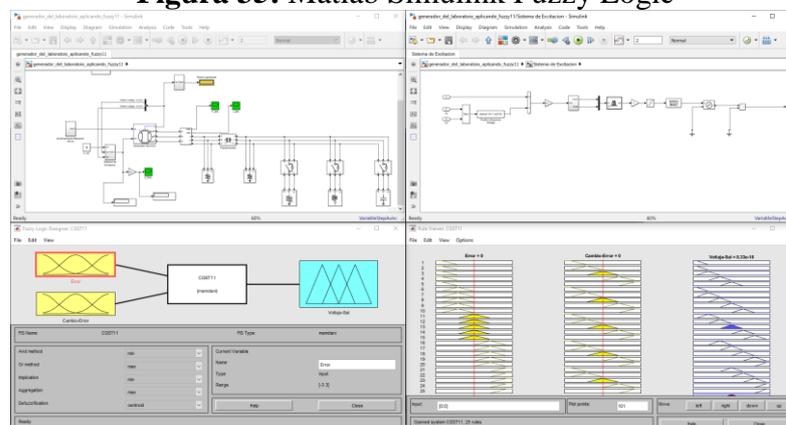


Elaborado por el equipo de trabajo

3.4.11 Matlab Simulink Fuzzy Logic Toolbox

proporciona funciones, aplicaciones y módulos Simulink® de MATLAB® para analizar, diseñar y simular sistemas basados en lógica difusa. Este producto lo guiará a través de los pasos para diseñar un sistema de inferencia difusa. Proporciona funciones para muchos métodos comunes, incluido el agrupamiento difuso. La caja de herramientas le permite usar reglas lógicas simples para modelar el comportamiento del sistema complejo y luego implementar estas reglas en un sistema de inferencia difuso. Puede usarlo como un motor de inferencia difuso independiente. Alternativamente, puede utilizar el bloque de inferencia difusa en Simulink y simular el sistema difuso en un modelo completo de todo el sistema dinámico (Mathworks, 2014).

Figura 35: Matlab Simulink Fuzzy Logic



Elaborado por el equipo de trabajo

3.4.12 Tía portal

TIA Portal es un sistema de ingeniería innovador que puede configurar de forma intuitiva y eficiente todos los procesos de planificación y producción. Es convincente con sus funciones probadas y un entorno de ingeniería unificado para todas las tareas de control, visualización y accionamiento. TIA Portal contiene nuevas versiones de software SIMATIC Step 7, WinCC y Stardrive para la programación, parametrización y diagnóstico de controladores, visualizadores y accionamientos SIMATIC, así como una nueva versión de proyectos SIMATIC STEP 7 para la planificación, programación y diagnóstico del sistema de controladores SIMATIC. Con una nueva generación de editores de programación más eficientes, se ha optimizado la calidad, la eficiencia y la coherencia de todo el proceso de producción. Por tanto, es posible utilizar texto estructurado, diagramas de escalera, diagramas de funcionamiento, listas de instrucciones y la posibilidad de programar la cadena de procesos.

Como parte integrante de TIA Portal, SIMATIC STEP 7 abre nuevas perspectivas para maximizar la eficiencia en la programación y calidad de la energía (Industrias GSL, 2020).

Figura 36: Tia portal

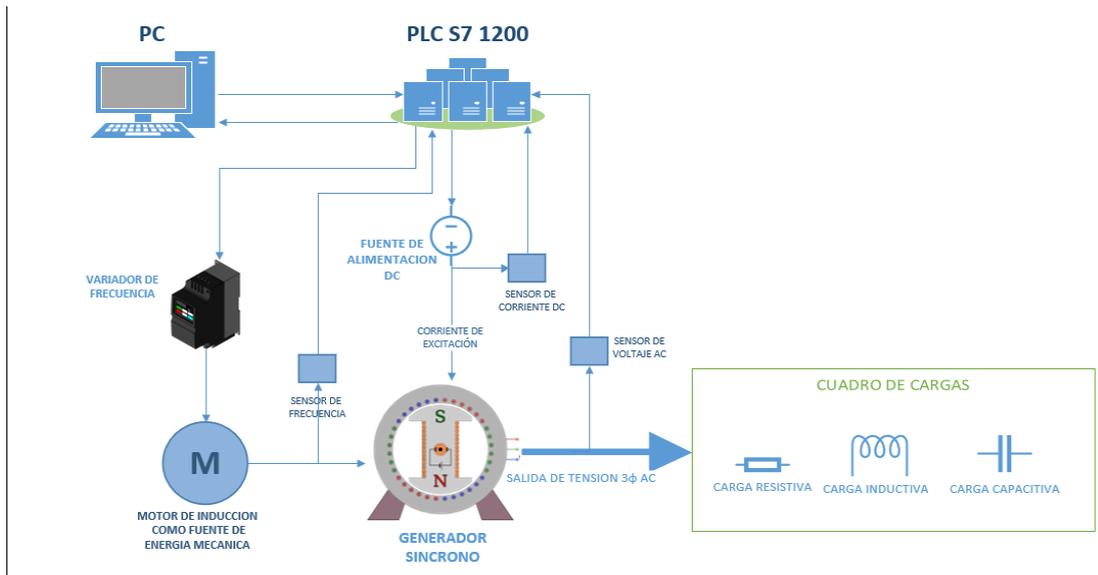


Fuente: (Industrias GSL, 2020)

3.5 DISEÑO DEL PROTOTIPO PARA LA APLICACIÓN DEL CONTROLADOR

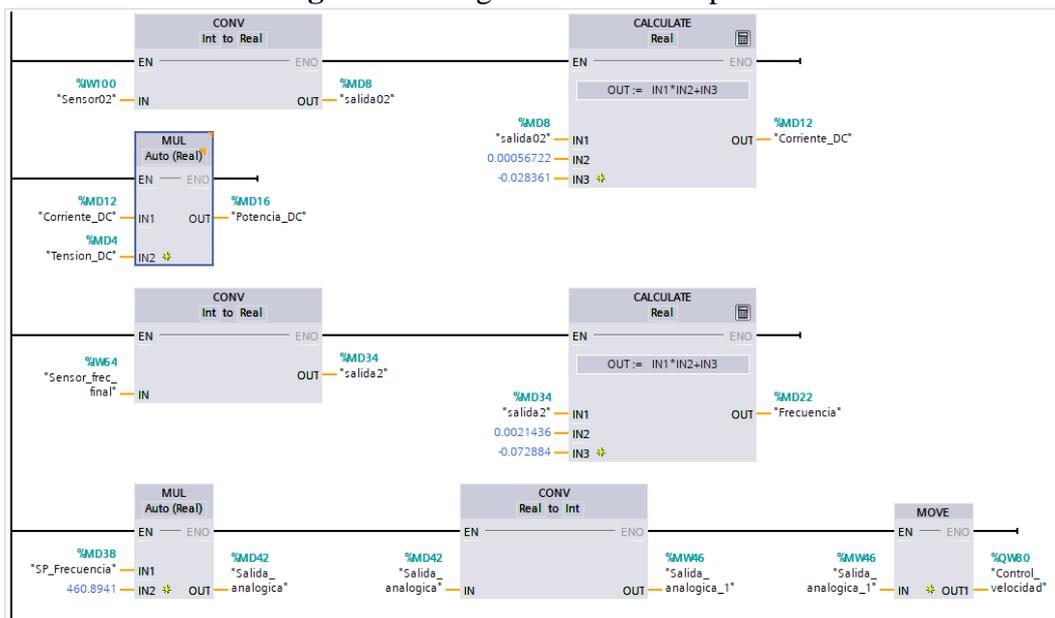
Para demostrar la aplicación del controlador difuso en la regulación de tensión de un generador síncrono, se diseñó un módulo de regulación de tensión utilizando como interfaz el PLC S7 1200.

Figura 37: Módulo de regulación de tensión del generador síncrono



Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 38: Programación en Tia portal

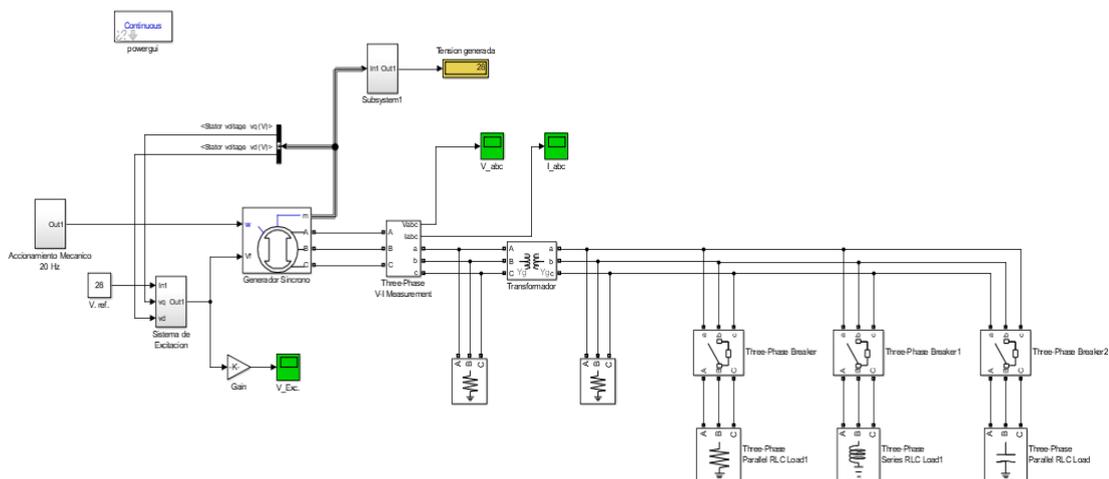


Elaborado por el equipo de trabajo.

3.6 DISEÑO DE LA SIMULACIÓN EN MATLAB SIMULINK

Para la implementación de control difuso se utilizó el programa Matlab Simulink, en el navegador de la biblioteca se puede encontrar el bloque de “fuzzy logic controller”, la implementación se hizo por método de Mandani, utilizando parámetros físicos obtenidos del generador síncrono del laboratorio de control de Ingeniería Mecánica Eléctrica Una – Puno. se realizó el esquema del generador síncrono, el accionamiento mecánico y el sistema de excitación, y para la prueba de cargas se añadió carga resistiva, inductiva, y capacitiva.

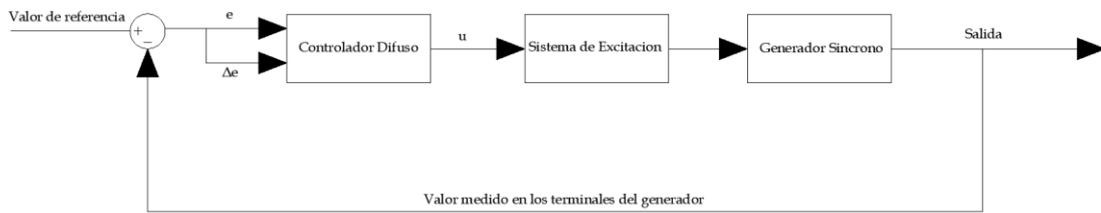
Figura 39: Esquema de conexionado del generador síncrono



Elaborado por el equipo de trabajo

El proceso para establecer el controlador difuso se realiza mediante el diagrama de bloques, utilizando un sensor de tensión en CA, en los terminales del generador síncrono se mide la tensión de salida, El valor medido se compara con un valor de referencia, obteniendo así el error de tensión y el cambio de error, que son las entradas al controlador difuso, y a la salida se tiene la tensión deseada (u) para excitar el campo.

Figura 40: Diagrama de bloques del controlador difuso



Elaborado por el equipo de trabajo

Donde:

e: error de voltaje

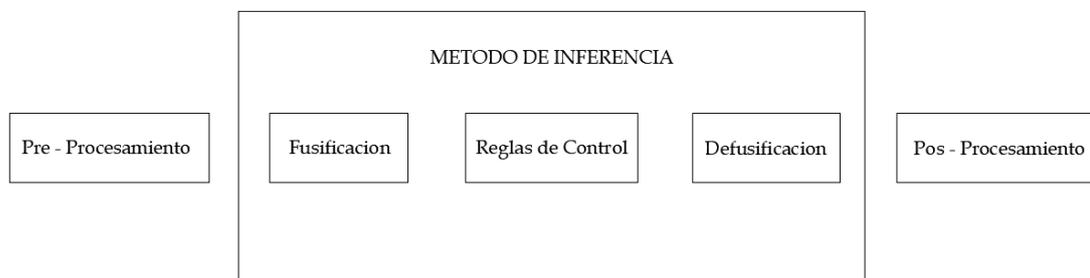
Δe : cambio de error

u : voltaje de excitación

3.6.1 Método de Inferencia

EL método de inferencia es el procedimiento que se sigue para construir un controlador difuso, es donde se procesa los valores de entrada para luego tener un único valor en el tiempo como respuesta que se necesita para tener estable y en condiciones de referencia al sistema. Los elementos que conforman el método de inferencia son lo siguiente:

Figura 41: Método de inferencia



Elaborado por el equipo de trabajo

- **Pre – procesamiento:** toma los valores de error de la salida del generador.

- **Fusificación:** convierte la magnitud de la señal obtenida del pre – procesamiento en términos lingüísticos obteniendo así la pertenencia que tiene.
- **Reglas de control:** es la base de conocimiento que se define como se debe controlar el sistema, mediante las reglas lingüísticas SI – ENTONCES.
- **Defusificación:** convierte el conjunto difuso resultante en una cantidad certera, para generar la señal de control.
- **Pos – procesamiento:** genera la señal del control a partir de la cantidad defusificada

3.6.2 Definición de entrada y salida del sistema de control

Las entradas del controlador son variables primordiales del proceso que le permiten monitorear la variable controlada, en función de estos parámetros error y cambio de error, es como va tomar las decisiones el control, por ello es importante formular bien la ecuación de error.

Figura 42: Entrada y salida del sistema de control



Elaborado por el equipo de trabajo

Error. - el error se obtiene de la diferencia entre el valor deseado y el valor leído en los terminales del generador síncrono, este variable permite observar el comportamiento de la maquina ante una falla o una perturbación en el sistema. $V(\text{ref.}) = 28 \text{ V}$

$$e = V_{\text{ref}} - V_{\text{leido}}$$

Cambio de error

$$\Delta e = \text{valor anterior} - \text{valor actual}$$

Salida (u)

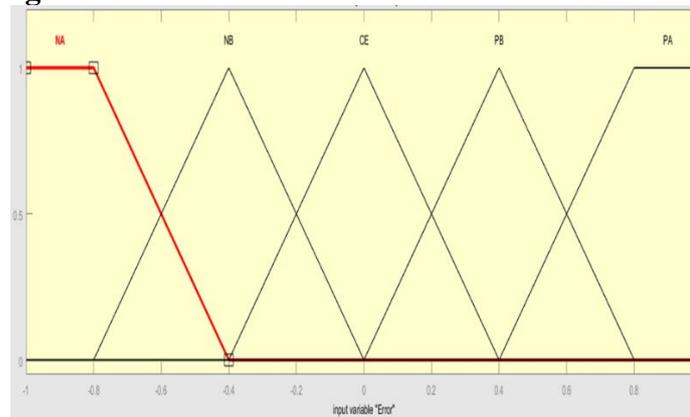
$u = \text{incremento de voltaje de excitacion}$

3.6.3 Definición de las variables lingüísticas

3.6.3.1 Error de voltaje.

El universo de discurso de error está contenido en $[-1;1]$ dentro del universo de discurso están las funciones de membresía cada uno con sus términos lingüísticos.

Figura 43: Funciones del universo de discurso del error



Elaborado por el equipo de trabajo

NA: Negativo alto

NB: Negativo bajo

CE: Cero

PB: Positivo bajo

PA: Positivo alto

Descripción de funciones

Negativo Alto: es una función semi-trapesoidal abierto por la izquierda

$$f(x; -1., -0.8, -0.4) = \begin{cases} 1 & x \leq -0.8 \\ \frac{-0.4 - x}{-0.4 - (-0.8)} & -0.8 \leq x \leq -0.4 \\ 0 & x \geq -0.4 \end{cases}$$

Negativo Bajo: es una función triangular

$$f(x; -0.8, -0.4, 0) = \begin{cases} 0 & x \leq -0.8 \\ \frac{x - (-0.8)}{-0.4 - (-0.8)} & -0.8 \leq x \leq -0.4 \\ \frac{0 - x}{0 - (-0.4)} & -0.4 \leq x \leq 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

Cero: es una función triangular

$$f(x; -0.4, 0, 0.4) = \begin{cases} 0 & x \leq -0.4 \\ \frac{x - (-0.4)}{0 - (-0.4)} & -0.4 \leq x \leq 0 \\ \frac{0.4 - x}{0.4 - 0} & 0 \leq x \leq 0.4 \\ 0 & x \geq 0.4 \end{cases}$$

Positivo bajo: es una función triangular

$$f(x; 0, 0.4, 0.8) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \frac{x - 0}{0.4 - 0} & 0 \leq x \leq 0.4 \\ \frac{0.8 - x}{0.8 - 0.4} & 0.4 \leq x \leq 0.8 \\ 0 & x \geq 0.8 \end{cases}$$

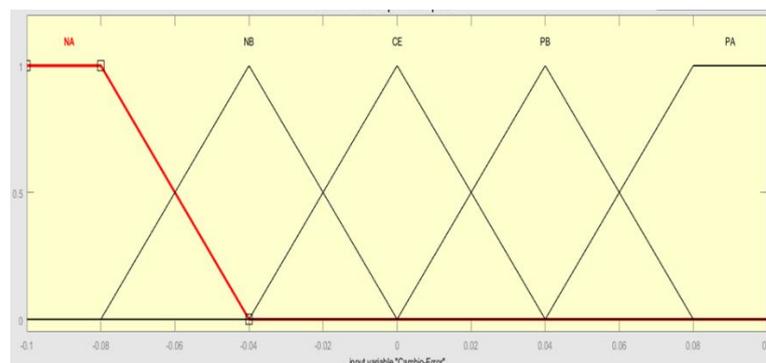
Positivo alto: es una función semi-trapesoidal abierto por la derecha

$$f(x; 0.4, 0.8, 1) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.4 \\ \frac{x - 1.25}{2.5 - 1.25} & 0.4 \leq x \leq 0.8 \\ 1 & x \geq 0.8 \end{cases}$$

3.6.3.2 Cambio De error.

El universo de discurso de cambio de error está contenido en $[-0.1; 0.1]$

Figura 44: Funciones del universo de discurso de cambio de error



Elaborado por el equipo de trabajo



NA: Negativo alto

NB: Negativo bajo

CE: Cero

PB: Positivo bajo

PA: Positivo alto

Descripcion de funciones

Negativo Alto: es una funcion semi-trapesoidal abierto por la izquierda

$$f(x; -0.1, -0.08, -0.04) = \begin{cases} 1 & x \leq -0.08 \\ \frac{-0.04 - x}{-0.04 - (-0.08)} & -0.08 \leq x \leq -0.04 \\ 0 & x \geq -0.04 \end{cases}$$

Negativo Bajo: es una función triangular

$$f(x; -0.08, -0.04, 0) = \begin{cases} 0 & x \leq -0.08 \\ \frac{x - (-0.08)}{-0.04 - (-0.08)} & -0.08 \leq x \leq -0.04 \\ \frac{0 - x}{0 - (-0.04)} & -0.04 \leq x \leq 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

Cero: es una función triangular

$$f(x; -0.04, 0, 0.04) = \begin{cases} 0 & x \leq -0.04 \\ \frac{x - (-0.04)}{0 - (-0.04)} & -0.04 \leq x \leq 0 \\ \frac{0.04 - x}{0.04 - 0} & 0 \leq x \leq 0.04 \\ 0 & x \geq 0.04 \end{cases}$$

Positivo bajo: es una función triangular

$$f(x; 0, 0.04, 0.08) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \frac{x - 0}{0.04 - 0} & 0 \leq x \leq 0.04 \\ \frac{0.08 - x}{0.08 - 0.04} & 0.04 \leq x \leq 0.08 \\ 0 & x \geq 0.08 \end{cases}$$

Positivo alto: es una función semi-trapesoidal abierto por la derecha

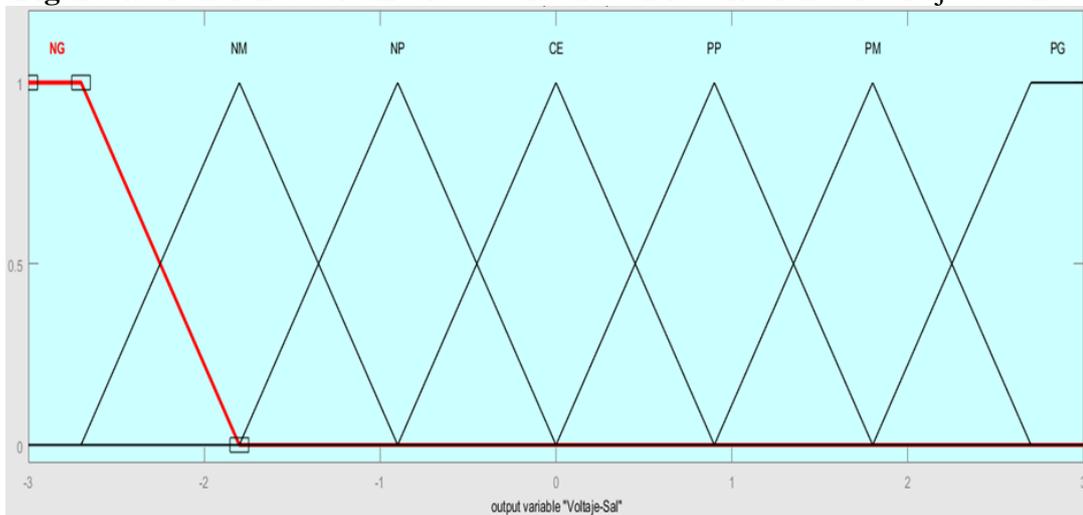
$$f(x; 0.04, 0.08, 0.1) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.04 \\ \frac{x - 0.04}{0.08 - 0.04} & 0.04 \leq x \leq 0.08 \\ 1 & x \geq 0.08 \end{cases}$$

3.6.3.3 Variación de voltaje de salida en el sistema de excitación

El universo de discurso de la variación de voltaje está contenido en $[-3,3]$, esta variación de voltaje se encarga de variar la corriente de excitación del sistema.

En este rango se distribuyen los términos lingüísticos y las funciones de pertenencia.

Figura 45: Funciones del universo de discurso en la variación del voltaje de salida



Elaborado por el equipo de trabajo

- NG: Negativo grande
- NM: Negativo mediano
- NP: Negativo pequeño
- CE: Cero
- PP: Positivo pequeño
- PM: Positivo mediano
- PG: positivo grande

Descripcion de Funciones

Negativo grande: es una función semi-trapesoidal abierto por la izquierda

$$f(x; -3, -2.7, -1.8) = \begin{cases} 1 & x \leq -2.7 \\ \frac{-1.8 - x}{-1.8 - (-2.7)} & -2.7 \leq x \leq -1.8 \\ 0 & x \geq -1.8 \end{cases}$$

Negativo mediano: es una función triangular

$$f(x; -2.7, -1.8, -0.9) = \begin{cases} 0 & x \leq -2.7 \\ \frac{x - (-2.7)}{-1.8 - (-2.7)} & -2.7 \leq x \leq -1.8 \\ \frac{-0.9 - x}{-0.9 - (-1.8)} & -1.8 \leq x \leq -0.9 \\ 0 & x \geq -0.9 \end{cases}$$

Negativo pequeño: es una función triangular

$$f(x; -1.8, -0.9, 0) = \begin{cases} 0 & x \leq -1.8 \\ \frac{x - (-1.8)}{-0.9 - (-1.8)} & -1.8 \leq x \leq -0.9 \\ \frac{0 - x}{0 - (-0.9)} & -0.9 \leq x \leq 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

Cero: es una función triangular

$$f(x; -0.9, 0, 0.9) = \begin{cases} 0 & x \leq -0.9 \\ \frac{x - (-0.9)}{0 - (-0.9)} & -0.9 \leq x \leq 0 \\ \frac{0.9 - x}{0.9 - 0} & 0 \leq x \leq 0.9 \\ 0 & x \geq 0.9 \end{cases}$$

Positivo pequeño: es una función triangular

$$f(x; 0, 0.9, 1.8) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \frac{x - 0}{0.9 - 0} & 0 \leq x \leq 0.9 \\ \frac{1.8 - x}{1.8 - 0.9} & 0.9 \leq x \leq 1.8 \\ 0 & x \geq 1.8 \end{cases}$$

Positivo mediano: es una función triangular

$$f(x; 0.9, 1.8, 2.7) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.9 \\ \frac{x - 0.9}{1.8 - 0.9} & 0.9 \leq x \leq 1.8 \\ \frac{2.7 - x}{2.7 - 1.8} & 1.8 \leq x \leq 2.7 \\ 0 & x \geq 2.7 \end{cases}$$

Positivo grande: es una función semi-trapesoidal abierto por la derecha

$$f(x; 1.8, 2.7, 3) = \begin{cases} 0 & x \leq 1.8 \\ \frac{x - 1.8}{2.7 - 1.8} & 1.8 \leq x \leq 2.7 \\ 1 & x \geq 2.7 \end{cases}$$

3.6.4 Reglas difusas

Las reglas difusas son combinaciones de tipo SI-ENTONCES, este paso es parte del método de inferencia y representa como va actuar el sistema ante posibles valores de error y cambio de error. La elaboración de la base de conocimientos se realiza mediante la tabla FAM (matriz de asociación difusa).

Tabla 7: Matriz de asociación difusa

<i>E</i>	ΔE	NA	NB	CE	PB	PA
NA		NG	NG	NM	NP	CE
NB		NG	NM	NP	CE	PP
CE		NM	NP	CE	PP	PM
PB		NP	CE	PP	PM	PG
PA		CE	PP	PM	PG	PG

Elaborado por el equipo de trabajo

Si (*e es negativo alto*) y (Δe es negativo alto) entonces (*VE es negativo grande*)

Si (*e es negativo alto*) y (Δe es negativo bajo) entonces (*VE es negativo grande*)

Si (*e es negativo alto*) y (Δe es cero) entonces (*VE es negativo mediano*)

Si (*e es negativo alto*) y (Δe es positivo bajo) entonces (*VE es negativo pequeño*)

Si (*e es negativo alto*) y (Δe es positivo alto) entonces (*VE es cero*)



- Si (*e es negativo bajo*) y (Δe es negativo alto) entonces (*VE es negativo grande*)
- Si (*e es negativo bajo*) y (Δe es negativo bajo) entonces (*VE es negativo mediano*)
- Si (*e es negativo bajo*) y (Δe es cero) entonces (*VE es negativo pequeño*)
- Si (*e es negativo bajo*) y (Δe es positivo bajo) entonces (*VE es cero*)
- Si (*e es negativo bajo*) y (Δe es positivo alto) entonces (*VE es positivo pequeño*)
- Si (*e es cero*) y (Δe es negativo alto) entonces (*VE es negativo mediano*)
- Si (*e es cero*) y (Δe es negativo bajo) entonces (*VE es negativo pequeño*)
- Si (*e es cero*) y (Δe es cero) entonces (*VE es cero*)
- Si (*e es cero*) y (Δe es positivo bajo) entonces (*VE es positivo pequeño*)
- Si (*e es cero*) y (Δe es positivo alto) entonces (*VE es positivo mediano*)
- Si (*e es positivo bajo*) y (Δe es negativo alto) entonces (*VE es negativo pequeño*)
- Si (*e es positivo bajo*) y (Δe es negativo bajo) entonces (*VE es cero*)
- Si (*e es positivo bajo*) y (Δe es cero) entonces (*VE es positivo pequeño*)
- Si (*e es positivo bajo*) y (Δe es positivo bajo) entonces (*VE es positivo mediano*)
- Si (*e es positivo bajo*) y (Δe es positivo alto) entonces (*VE es positivo grande*)
- Si (*e es positivo alto*) y (Δe es negativo alto) entonces (*VE es cero*)
- Si (*e es positivo alto*) y (Δe es negativo bajo) entonces (*VE es positivo pequeño*)
- Si (*e es positivo alto*) y (Δe es cero) entonces (*VE es positivo mediano*)
- Si (*e es positivo alto*) y (Δe es positivo bajo) entonces (*VE es positivo grande*)
- Si (*e es positivo alto*) y (Δe es positivo alto) entonces (*VE es positivo grande*)

3.6.5 Defusificación

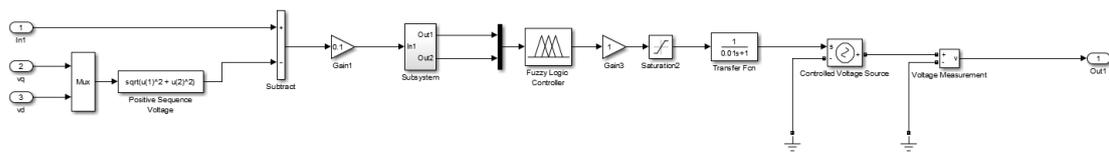
En la etapa de defusificación se ocupa de generar un único valor real de salida, antes de defusificación se tiene un conjunto de valores en el tiempo, para defusificar se optó por método centroide.

$$u = \frac{\sum u \mu_V(u)}{\sum \mu_V(u)}$$

3.6.6 Control difuso

Para ingresar estos datos calculados y ver que el sistema funciona se diseñó el controlador difuso, que también sería conocido como sistema de excitación

Figura 46: Esquema de control difuso



Elaborado por el equipo de trabajo

Como se ha mencionado el error es la diferencia entre V_{ref} - V_{leido} , luego de obtener el error se multiplica por 0.1 ajustándose así al universo de discurso de error, a la salida del controlador difuso se multiplica a la función de transferencia, y finalmente llegando este valor al excitador fuente variable DC de 15 V dc, que es el valor que necesita el generador síncrono para mantener la tensión de salida en 28 V. para alimentar al campo del generador síncrono.

Para la simulación del regulador de tensión se acondiciono cargas, resistiva, inductiva, capacitiva, de la siguiente manera.

Tabla 8: Distribución del tiempo de simulación

<u>TIEMPO</u>	<u>TIPO DE CARGA</u>
0s - 3s	generador arranca en vacío
3s - 6s	generador alimenta una carga resistiva
6s - 9s	generador alimenta una carga inductiva
9s - 12s	generador alimenta una carga capacitiva

Elaborado por el equipo de trabajo

De esta manera podemos afirmar que:

- ✓ Se modelo un sistema de control difuso para la regulación de tensión en un generador síncrono.
- ✓ Se realizo la simulación del sistema de control en el programa Matlab Simulink.
- ✓ Se demostró la aplicación del sistema de control difuso mediante un prototipo realizado en el laboratorio de control y automatización de la EPIME.

Viendo lo anterior podemos decir que se acepta nuestra hipótesis de investigación.

CAPITULO IV

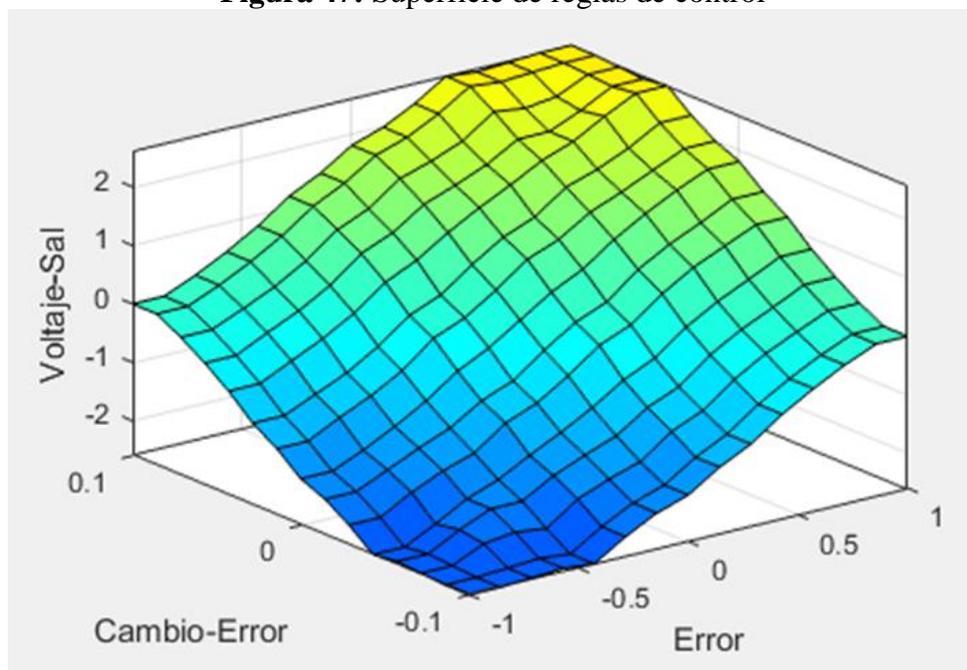
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Superficie de control

En la superficie de control se puede observar la relación de error, cambio de error y la salida voltaje de excitación.

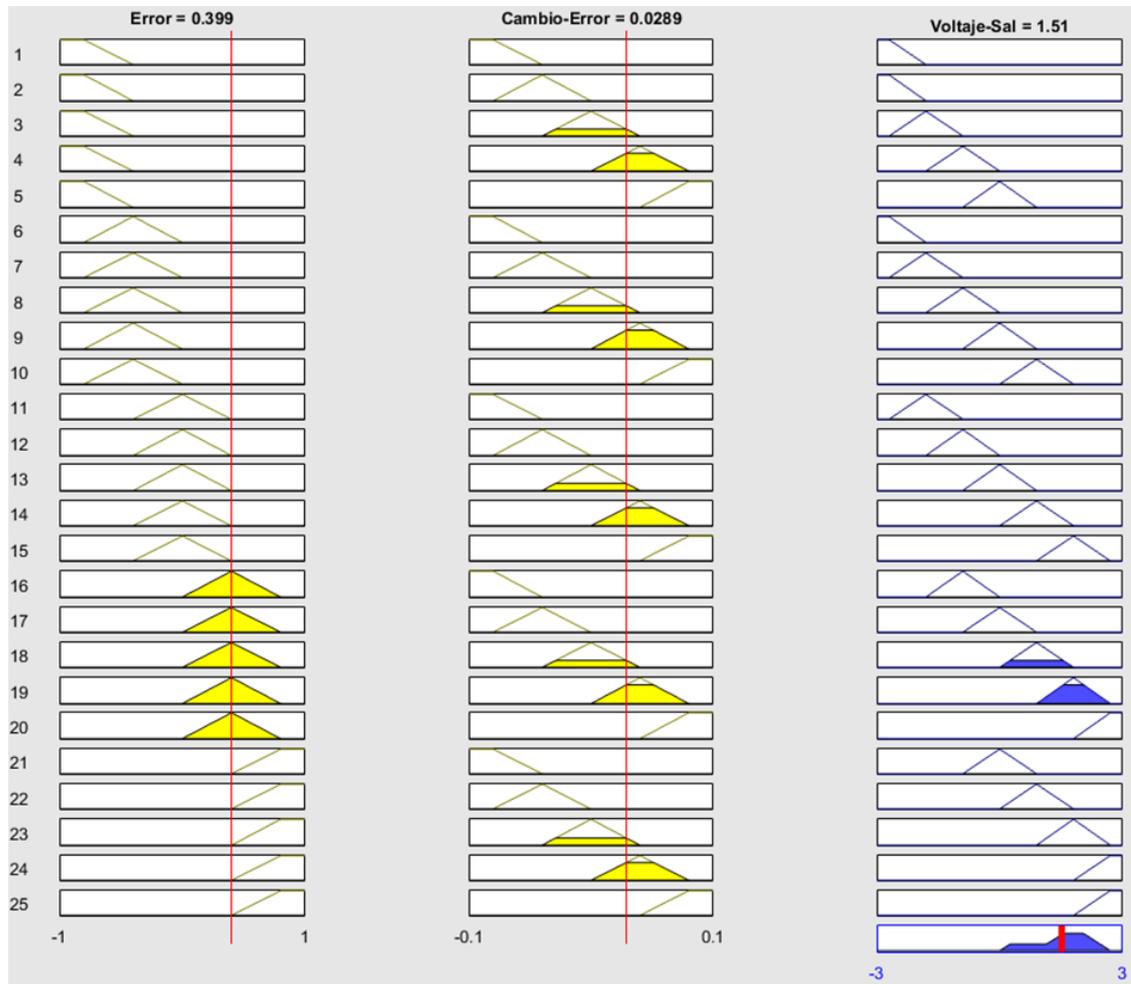
Figura 47: Superficie de reglas de control



Elaborado por el equipo de trabajo

4.1.2 Respuesta de reglas de control

Figura 48: Comportamiento de las reglas de control



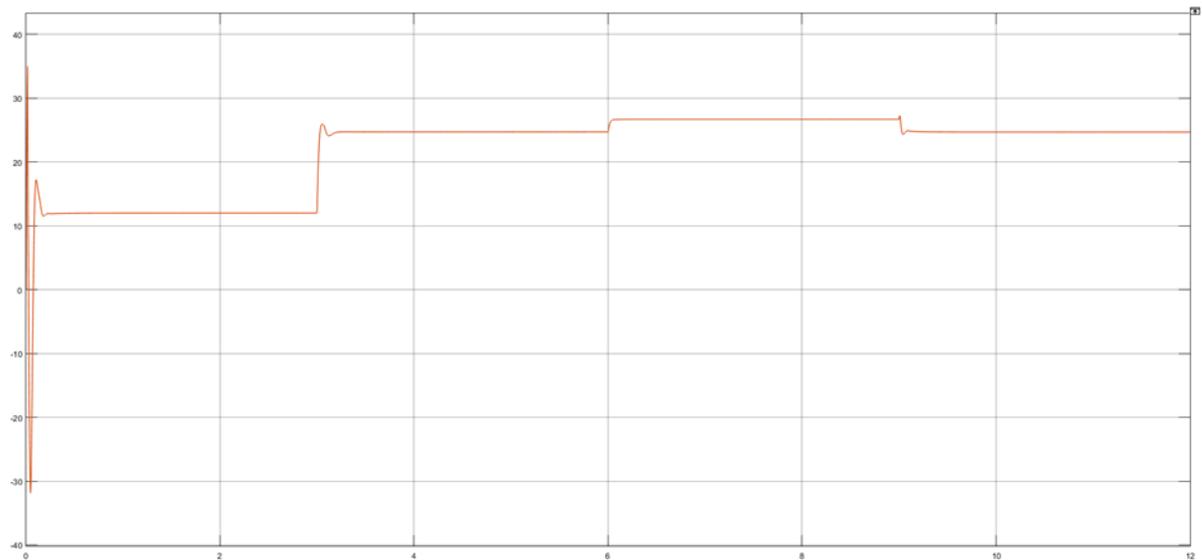
Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: En la figura podemos visualizar la respuesta del controlador difuso, voltaje de salida esto en función de las dos entradas de error y cambio de error

4.1.3 Respuesta de sistema de excitación

El comportamiento del excitador controlado por un control difuso, con un tiempo de muestreo de 12s, donde se ve el comportamiento del controlador difuso frente a las cargas resistivas, inductiva y capacitiva.

Figura 49: Comportamiento del controlador difuso

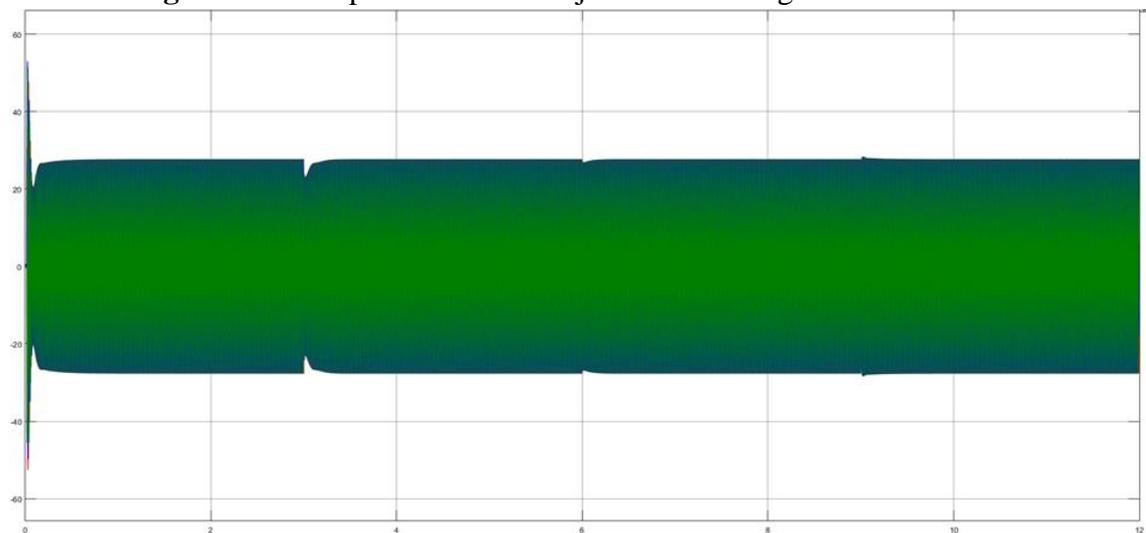


Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: en la figura podemos observar el comportamiento del controlador difuso frente a diferentes cargas.

4.1.4 Respuesta de voltaje de salida del generador síncrono

Figura 50: Comportamiento voltaje de salida del generador síncrono



Elaborado por el equipo de trabajo

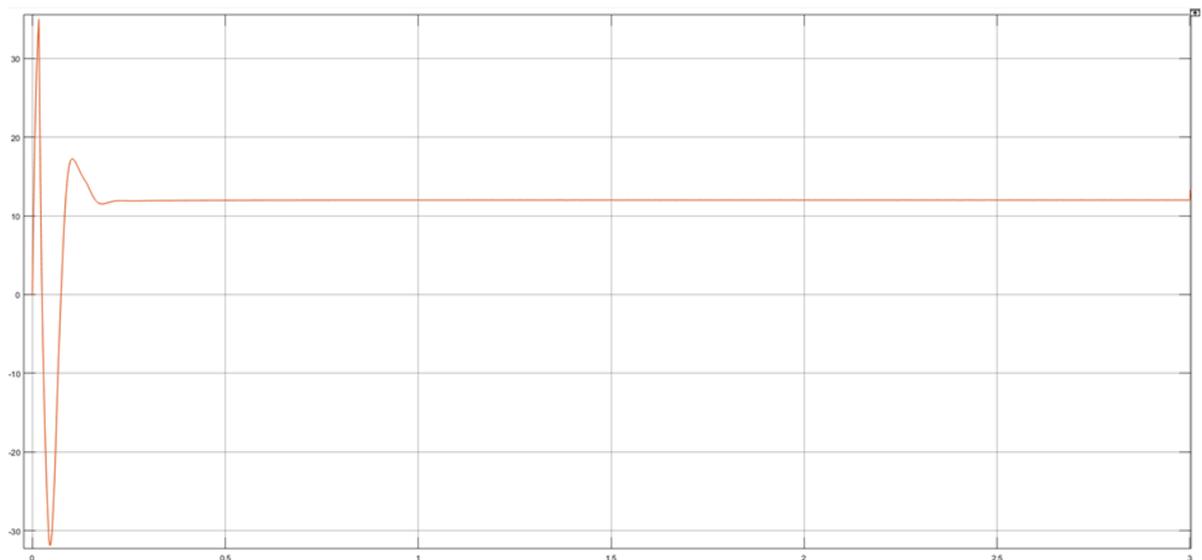
Nota: La figura representa el comportamiento del voltaje de salida trifásico como se puede visualizar que frente a las perturbaciones de las cargas el voltaje siempre retorna a su valor nominal a los pocos milisegundos.

4.1.5 Respuesta del controlador difuso

4.1.5.1 Respuesta del Controlador en el Arranque del Generador.

La primera Respuesta del Controlador se realiza en el arranque del accionamiento del motor a 20Hz y a la vez se inyecta corriente en el campo con $I_x=1$ amp. La simulación es de $t=3$ s.

Figura 51: Comportamiento del controlador en el arranque del generador $t=0$ a $t=3$ s

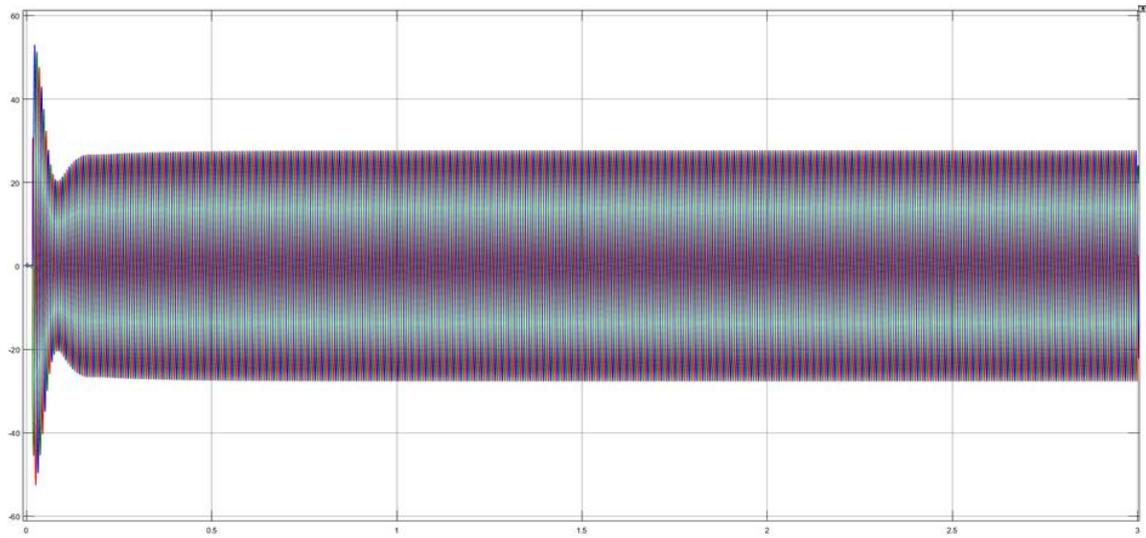


Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: En La figura podemos observar que al arrancar el generador hay un sobre pico en el $t=0.017$ s que llega hasta 35 Vdc, luego cae hasta -32Vdc en el $t=0.046$ s esta aproximación ayuda al controlador a que encuentre la rápidamente la estabilización, en 0.78s se estabiliza completamente.

Como resultado se puede afirmar que el controlador difuso logra estabilizarse en $t=0.78$ s, esto cuando el generador síncrono arranca desde un tiempo muerto $t=0$ s.

Figura 52: Tensión de salida del generador en el arranque $t=0$ a $t=3s$



Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 53: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización en el arranque



Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: en la figura podemos observar que al arrancar el generador llega a un valor pico de 53Vac en el tiempo $t=0.02s$, luego desciende rápidamente hasta 20.8Vac en $t=0.08s$ alcanzando un valor mínimo inmediatamente después asciende hasta encontrar el valor nominal, en $t=0.78s$ alcanza el valor nominal 28 Vac deseado y empieza a ser constante la señal de onda.

Como resultado se puede afirmar que la tensión de salida logra estabilizarse en $t=0.78s$, esto cuando el generador síncrono arranca desde un tiempo muerto $t=0s$.

4.1.5.2 Respuesta del Controlador con Carga Resistiva

Para la prueba de carga resistiva se añade una carga resistiva de 50W, la simulación dura 3s, antes de los 3s el generador opera en vacío. en $t=3s$ se conecta la carga resistiva hasta $t=6s$.

Figura 54: Comportamiento del controlador con carga resistiva $t=3$ a $t=6s$

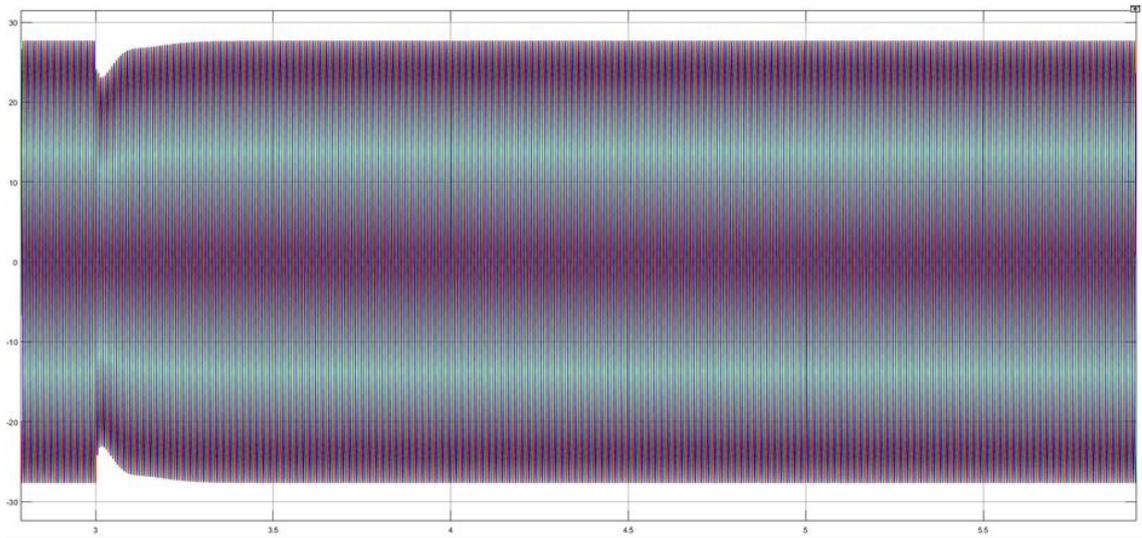


Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: en la figura se puede observar que en el tiempo $t=3.052s$ alcanza el valor más alto, luego desciende hasta encontrar un valor nominal, logrando así la estabilización en el $t=3.36s$

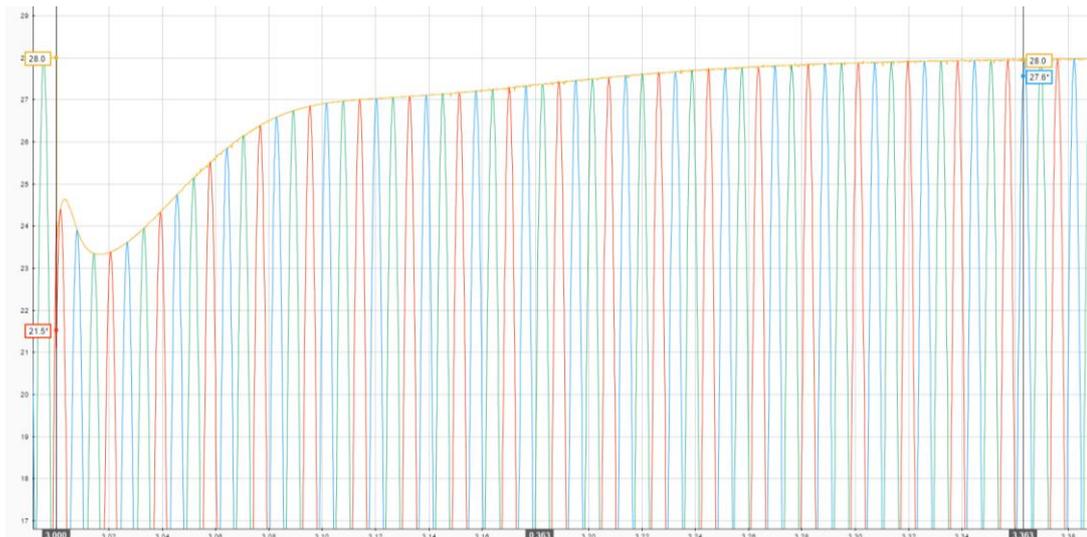
Como resultado se puede afirmar que el controlador logra estabilizarse en $t=0.36s$, esto después de la perturbación al conectarse la carga resistiva cuando el generador venía funcionando en vacío.

Figura 55: Tensión de Salida del generador con carga resistiva $t=3$ a $t=6s$



Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 56: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización con carga resistiva



Elaborado por el equipo de trabajo

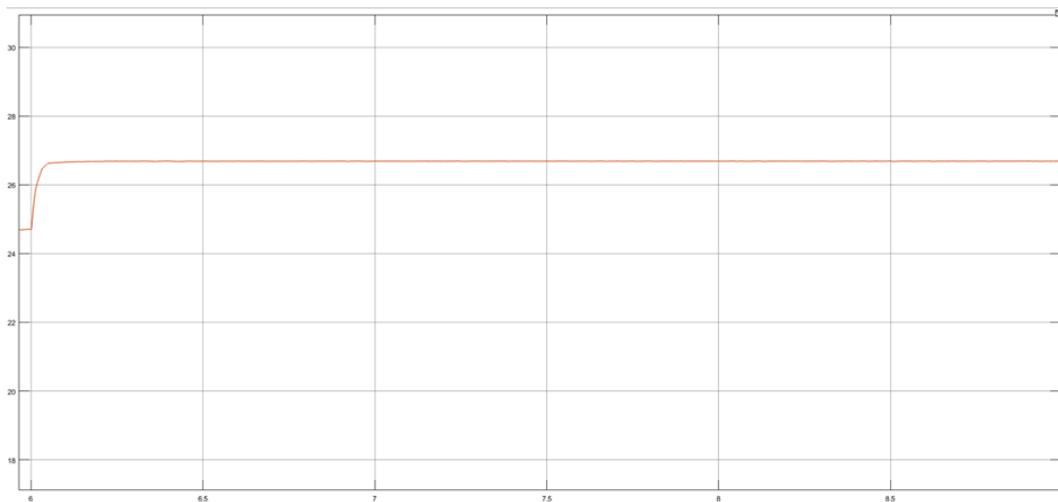
Nota: en la figura se puede observar la perturbación cuando se conecta una carga resistiva y el Voltaje de salida del generador cae de inmediato hasta 23.32Vac, como la respuesta del controlador difuso es progresivo, la salida de voltaje del generador busca estabilizarse en 28Vac, logrando este valor en el tiempo $t= 3.36s$.

Como resultado se puede afirmar que la tensión de salida logra estabilizarse en $t=0.36s$, esto después de la perturbación al conectarse la carga resistiva cuando el generador venía funcionando en vacío.

4.1.5.3 Respuesta del Controlador con Carga Inductiva

Para la prueba de carga inductiva se consideró una carga inductiva solo con fines de estudio de esta simulación, $P= 50 \text{ VAR}$, la prueba dura 3s, el generador viene funcionando en carga resistiva de 50W , pero en $t=6\text{s}$ entra la carga inductiva y termina en $t=9\text{s}$.

Figura 57: Comportamiento del controlador con carga inductiva en $t=6$ a $t=9\text{s}$

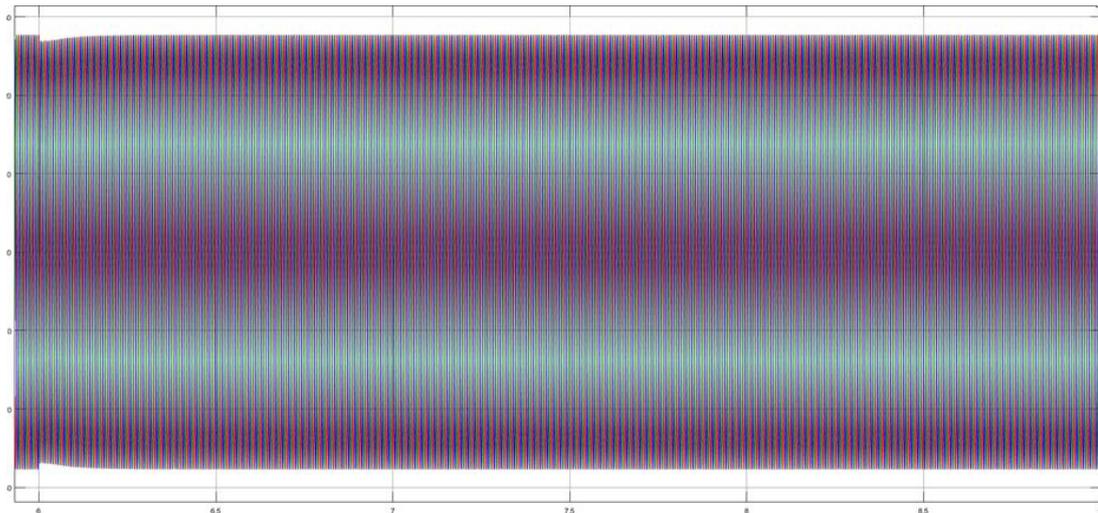


Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: en la figura se puede observar que el controlador responde al cambio de voltaje, aumenta la tensión de excitación aceleradamente buscando el valor nominal para mantener la tensión en los límites establecidos llegando así en el tiempo $t=6.25$ logrando estabilizar el voltaje necesario para mantener la tensión de salida del generador en 28V ac .

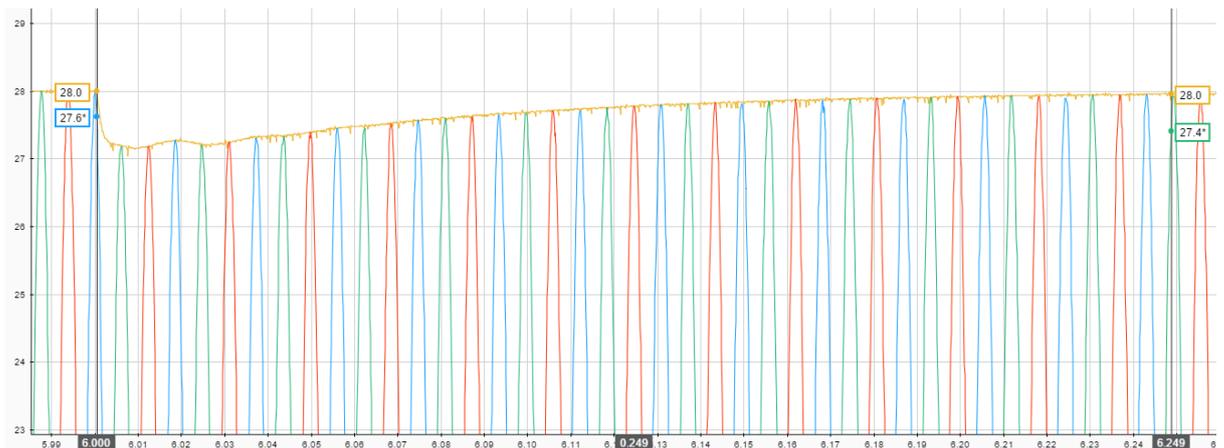
Como resultado se puede afirmar que el controlador logra estabilizarse en $t=0.25\text{s}$, esto después de la perturbación al conectarse la carga Inductiva.

Figura 58: Tensión de salida del generador con carga inductiva en $t=6$ a $t=9$ s



Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 59: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización con carga inductiva



Elaborado por el equipo de trabajo

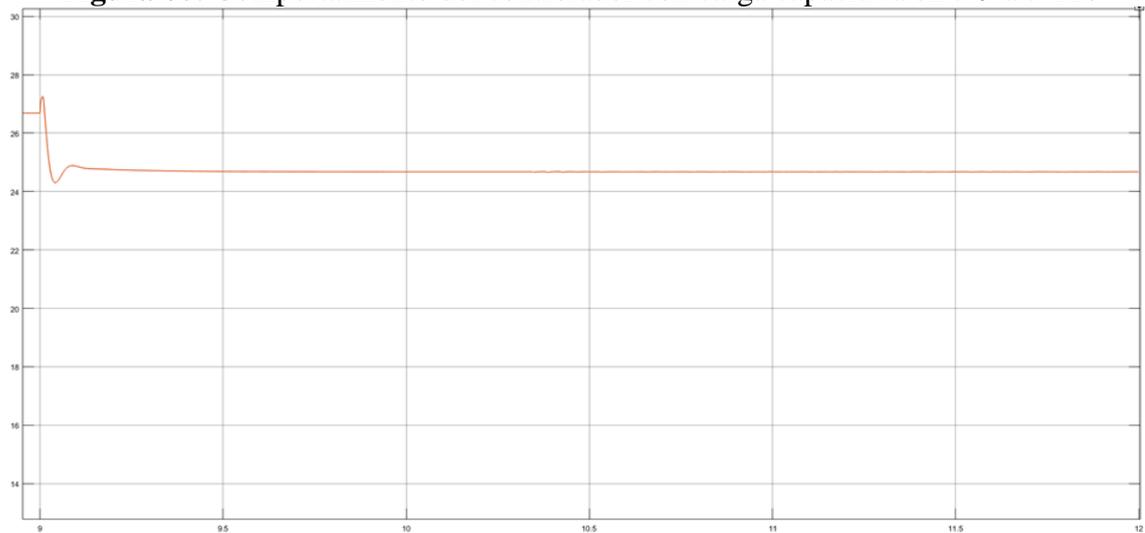
Nota: en la figura se puede observar que la curva de tensiones desciende al conectarse la carga Inductiva hasta un valor de 27Vac, frente a esta perturbación el controlador aumenta la corriente de excitación hasta que la tensión de salida del generador llega a estabilizarse en $t=6.25$ a su valor nominal

Como resultado se puede afirmar que la tensión de salida logra estabilizarse en $t=0.25$ s, esto después de la perturbación al conectarse la carga Inductiva.

4.1.5.4 Respuesta del Controlador con Carga Capacitiva

Para la prueba de carga capacitiva se consideró una carga capacitiva solo con fines de estudio y simulación, la carga es de $P=50 \text{ VAR}$, la simulación es de 3s, empieza en $t=9\text{s}$ y termina en $t=12\text{s}$, el generador viene funcionando con una carga inductiva de 50VAR .

Figura 60: Comportamiento del controlador con carga capacitiva en $t=9$ a $t=12\text{s}$

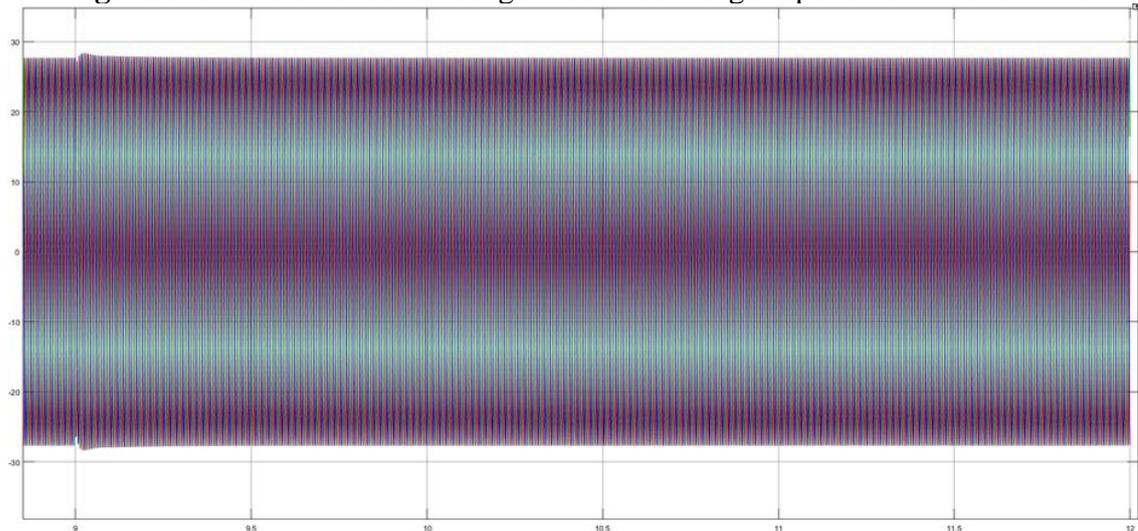


Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: En la figura se puede observar que el controlador reacciona inmediatamente al conectarse una carga capacitiva, descendiendo así hasta encontrar el valor nominal del generador síncrono, así en $t=9.40$ logra estabilizarse.

Como resultado se puede afirmar que controlador logra estabilizarse en $t=0.40\text{s}$, esto después de la perturbación al conectarse la carga Capacitiva.

Figura 61: Tensión de salida del generador con carga capacitiva en $t=9$ a $t=12$ s



Elaborado por el equipo de trabajo

Figura 62: Vista zoom de la tensión hasta el tiempo de estabilización con carga capacitiva



Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: En la figura se puede observar que luego de que entra la carga capacitiva en $t=9.00$ s, la tensión sufre una sobretensión llegando hasta un valor de 28.7Vac en $t=9.02$ s, frente a ello el controlador disminuye la excitación como se puede visualizar en la fig. 60 Con lo cual logra estabilizar en su tensión nominal de 28.0 Vac en $t=9.40$.

Como resultado se puede afirmar que el controlador difuso logra estabilizar la tensión de salida en $t=0.40$ s, esto después de la perturbación al conectarse la carga Capacitiva.

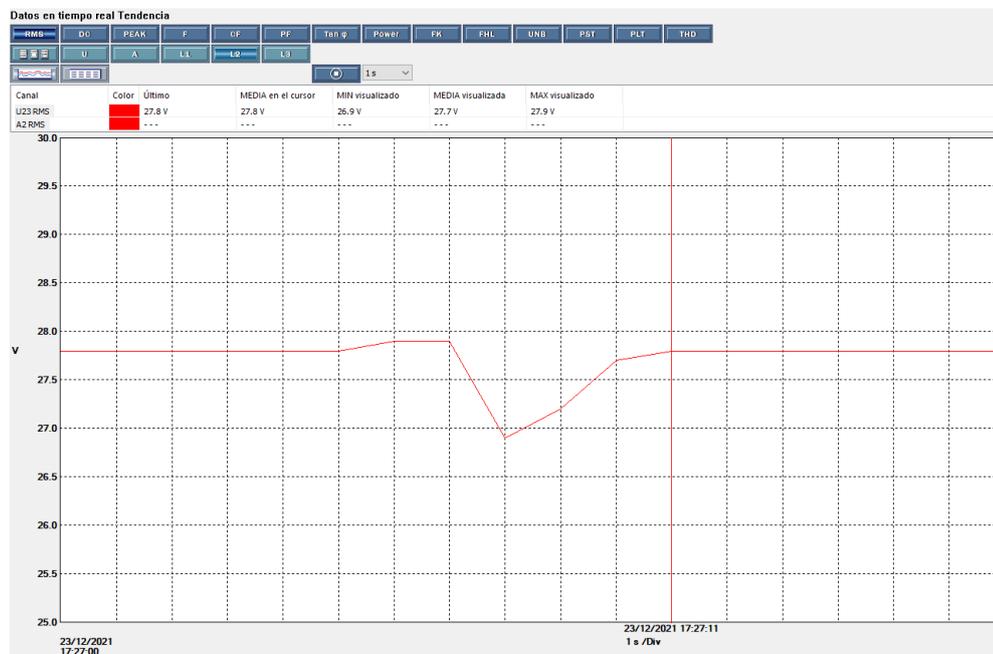
4.2 RESULTADOS DE PRUEBA DEL MODULO

Se realizaron las pruebas del módulo de control difuso modelado en laboratorio utilizando PLC S7 SIEMENS frente a cargas resistiva y capacitiva así verificar el tiempo de respuesta del controlador.

4.2.1 Respuesta frente a una carga resistiva

Para la prueba resistiva se utilizó bombilla incandescente de 25w. se conectó manualmente la carga cuando el generador venía funcionando en vacío en su valor nominal, como se puede visualizar en la figura 63.

Figura 63: Comportamiento de la tensión frente a una carga resistiva



Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: en la figura se puede observar que la tensión sufre una pequeña elevación antes de descender esto es debido a la conexión manual de la carga, al caer la tensión hasta 26.9V ac el controlador logra recuperar el valor nominal de tensión del generador en $t=4s$.

Figura 64: Datos en tiempo real de la tensión nominal frente a una carga resistiva

Datos en tiempo real Tendencia					
RMS	DC	PEAK	F	CF	PF
U	A	L1	L2	L3	
Fecha:	Hora:	U23 RMS			
23/12/2021	17:27:02	27.8 V			
23/12/2021	17:27:03	27.8 V			
23/12/2021	17:27:04	27.8 V			
23/12/2021	17:27:05	27.8 V			
23/12/2021	17:27:06	27.9 V			
23/12/2021	17:27:07	27.9 V			
23/12/2021	17:27:08	26.9 V			
23/12/2021	17:27:09	27.2 V			
23/12/2021	17:27:10	27.7 V			
23/12/2021	17:27:11	27.8 V			
23/12/2021	17:27:12	27.8 V			
23/12/2021	17:27:13	27.8 V			

Elaborado por el equipo de trabajo

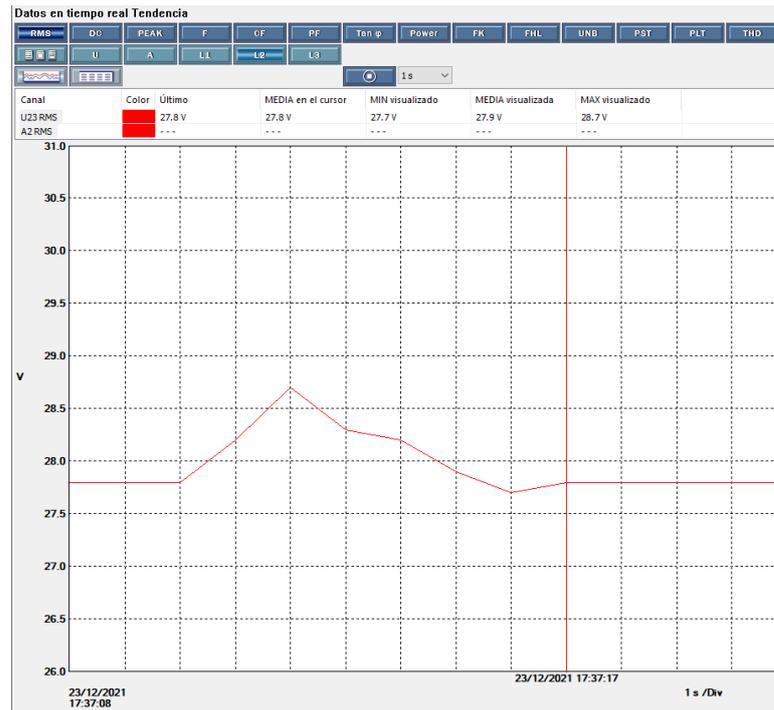
Nota: en la figura se puede observar los datos en tiempo real de la tensión nominal frente a una carga resistiva medidos con el analizador de redes.

Como resultado se puede afirmar que la tensión de salida logra estabilizarse en $t=4s$, esto después de la perturbación al conectarse la carga Resistiva.

4.2.2 Respuesta frente a una carga capacitiva

Para la prueba del comportamiento frente a una carga capacitiva se utilizó capacitores de 250V 4u se conectó manualmente la carga cuando el generador venía funcionando en vacío en su valor nominal estable como se puede visualizar en la siguiente Figura.

Figura 65: Comportamiento de la tensión frente a una carga capacitiva



Elaborado por el equipo de trabajo

Nota: en la figura se puede observar que la tensión sufre una elevación frente a una perturbación de una carga capacitiva llegando hasta 28.7Vac, el controlador logra recuperar el valor nominal de tensión del generador en $t=7s$.

Figura 66: Datos en tiempo real de la tensión nominal frente a una carga Capacitiva

Fecha:	Hora:	U23 RMS
23/12/2021	17:37:05	27.8 V
23/12/2021	17:37:06	27.8 V
23/12/2021	17:37:07	27.8 V
23/12/2021	17:37:08	27.8 V
23/12/2021	17:37:09	27.8 V
23/12/2021	17:37:10	27.8 V
23/12/2021	17:37:11	28.2 V
23/12/2021	17:37:12	28.7 V
23/12/2021	17:37:13	28.3 V
23/12/2021	17:37:14	28.2 V
23/12/2021	17:37:15	27.9 V
23/12/2021	17:37:16	27.7 V
23/12/2021	17:37:17	27.8 V
23/12/2021	17:37:18	27.8 V
23/12/2021	17:37:19	27.8 V
23/12/2021	17:37:20	27.8 V

Elaborado por el equipo de trabajo



Nota: en la figura se puede observar los datos en tiempo real de la tensión nominal frente a una carga Capacitiva, datos medidos con el analizador de redes.

Como resultado se puede afirmar que la tensión de salida logra estabilizarse en $t=7s$, esto después de la perturbación al conectarse la carga Capacitiva.

4.3 DISCUSIÓN

En la realización de antecedentes se pudo evidenciar que, a nivel nacional o local, no existe investigaciones sobre controlador difuso aplicado a la generación de energía, y a nivel mundial hay pocas investigaciones. En este trabajo de investigación se realizó un bosquejo tanto de lógica difusa, generadores síncronos y controladores difusos utilizando el Matlab Simulink.

Una de las pocas investigaciones sobre sistema de excitación difusa para generadores síncrono a nivel de artículo fue realizada por Ramya & Selvi (2011), donde logro estabilizar la potencia activa en 1.33s en comparación de nuestra investigación, la estabilización más larga de la tensión fue de 0.587s luego de que se conectara una carga capacitiva. La diferencia del tiempo de estabilización es porque el generador que utiliza Ramya es un generador de 200MVA con un voltaje de 13,8kV en comparación al de nuestro estudio que tenemos en el laboratorio un generador síncrono de 228,604VA con una tensión de 28V ac.

Analizando este resultado se puede decir que el tiempo de estabilización depende mucho del tipo de generador, obviamente que el tiempo de estabilización en un generador a gran escala es un poco mayor que el de un generador pequeño.

De las pruebas realizadas podemos reafirmar lo que expresa Mehmet & Ismail (2007). que el controlador difuso ofrece un seguimiento rápido y bueno, ejecutando las reglas para ajustar la entrada del sistema simplemente midiendo la salida. En nuestro caso



midiendo la tensión de salida podemos regular la corriente de entrada al campo del generador. Obteniendo una respuesta rápida de menos de 1s para la estabilización de tensión nominal.

De acuerdo a la investigación realizada podemos confirmar los resultados obtenidos por Barrera et al. (2019). que el controlador de mayores reglas presenta una respuesta mejorada en comparación con los controladores difusos de menor número de reglas. Esto debido a que contar con un número mayor de conjuntos difusos en las entradas, permite definir una mayor cantidad de alternativas, lo que conduce a un controlador más robusto



V. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos de pruebas realizadas en esta investigación podemos concluir que:

- Se modeló un sistema de control difuso para la regulación de tensión de un generador síncrono para lo cual se utilizó el software Matlab simulink utilizando los parámetros del generador síncrono de laboratorio.
- Se realizó la simulación de un modelo del sistema de control de tensión del generador síncrono en Matlab simulink como se describe en el capítulo de resultados de las pruebas realizadas a diferentes cargas.
- Se demostró la aplicación del controlador propuesto en un prototipo en el laboratorio de control y automatización de la EPIME, Utilizando como interfaz el PLC S7 1200 la cual recibe la tensión de salida del generador síncrono mediante un sensor y con el fin de mantener una tensión nominal frente a diferentes perturbaciones controla y regula la corriente de excitación de campo para así mantener una tensión estable.



VI. RECOMENDACIONES

De la investigación realizada podemos dar las siguientes recomendaciones:

- Para futuras investigaciones referidos al tema de generación se recomienda realizar un estudio más completo y el control de lógica difusa sea a nivel de la potencia de generación.
- Se recomienda utilizar sensores de calidad para la medición de tensión y corriente de este modo optimizar el controlador y disminuir el error de medición.
- Si se quiere modelar una máquina de laboratorio lo recomendable es trabajar en SI en el Matlab Simulink.
- Se recomienda realizar más estudios referidos al tema de control difuso en la generación de energía puesto que no existe investigaciones a nivel local o nivel nacional. así a un futuro no muy lejano utilizar este tipo de control para optimizar la calidad de energía.
- Se recomienda utilizar para el accionamiento del variador de tensión de excitación un accionamiento electrónico. Puesto que en el prototipo de nuestra investigación se utilizó un accionamiento mecánico lo cual influyó en gran manera en el tiempo de estabilización de la tensión nominal.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta, H. N. (2006). *Diseño de controladores dedicados a la lógica difusa*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Ahmed, M. (2019). Automatic Voltage Regulator based Fuzzy Logic. *International Journal of Computer Applications*, 181(36), 29-32.
<https://doi.org/10.5120/ijca2019918330>
- Aliaga, C. (2010). *Análisis Del Defecto De La Pérdida De Excitación En Sistemas De Generación Eléctrica*.
- Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigacion Introduccion a la Metodologia Cientifica* (E. EPISTME (ed.); 6ta ed.).
- Automation24. (2021). *Variadores de frecuencia con módulo servidor web Siemens Sinamics V20*. <http://www.interempresas.net/Electricidad/FeriaVirtual/Productos-Variadores-de-frecuencia-con-modulo-servidor-web-Siemens-Sinamics-V20-196201.html>
- Barrera, D. J., Suarez, O. J., & García, A. P. (2019). *Diseño de Controladores Fuzzy para el Control de la Excitatriz en una Máquina Síncrona Fuzzy Controllers Design for Control of the Exciter in a Synchronous Machine*. July, 24-26.
- Berkel, S. (2019, julio 23). *How Wind Power Works*. <https://revoltwind.com/articles.html>
- Blanco, A. (2009). *Control inteligente de un generador síncrono basado en lógica difusa*. Universidad Técnica de Oruro.
- Bobes, A. (2016). *Voltage and frequency regulation to support synchronous generators operation by grid feeding distributed energy resources*.
<http://upcommons.upc.edu/handle/2117/98149>
- Bojadziev, G., & Bojadziev, M. (1995). *Fuzzy Sets , Fuzzy Logic , Applications* (Vol. 5).
- Celuinto. (2021). *Fuente de alimentación profesional BAKU BK-305D 0-30V 5A*.



- <https://www.celuinform.com/38223-fuente-de-alimentacion-profesional-baku-bk-305d-0-30v-5a.html>
- Chapman, S. (2012). *Maquinas Electricas* (Quinta Edi). <https://doi.org/10:0-8400-5444-0>
- Chauvin Arnoux. (2012). *Analizador de Redes Eléctricas Trifásicas C.A 8335 Manual de Instrucciones*.
- Cusi, W., & Cusi, Y. (2016). *Implementación de Control de Volumen del Nivel de Líquido de Una Bomba de 1/4 hp Utilizando Lógica Difusa en el Laboratorio de Control y Automatización de la EPIME*.
- Hernandez, T., Herrera, A., Campos, A., Dominguez, J., Chiñas, M., & Sadot, H. (2009). *Experiencia Educativa Máquinas Rotatorias de Corriente Alterna*. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46427/QuirozCortesMCarmen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Herrera, J. (2003). *Implementación en un DSP de un regulador de velocidad difuso tipo Takagi – Sugeno para un arreglo de motor de corriente directa - alternador*. Instituto Politécnico Nacional.
- Industrias GSL. (2020, noviembre 17). *Beneficios de TIA Portal en las tareas de automatización*. <https://www.industriagsl.com/blog/post/beneficios-de-tia-portal-en-las-tareas-de-automatizacion>
- Lee, C. (1990). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(2), 404-418. <https://doi.org/10.1109/21.52552>
- Lozada, J. (2016). Investigación Aplicada : Definición , Propiedad Intelectual e Industria. *Cienciaamérica*, 1(3), 34-39. <http://www.uti.edu.ec/documents/investigacion/volumen3/06Lozada-2014.pdf>



- Mamdani, E. H. (1974). Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585-1588.
<https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- Mathworks. (2014). *Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide R 2014 b*. 812.
www.mathworks.com
- Matute, A., & Suárez, W. B. (2017). Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT)*, III, 125-134.
- Mayta, L. A., & Tintaya, E. R. (2018). *Diseño de un controlador PID - Difuso en la plataforma de Labview para el control de niveles de agua aplicados en el laboratorio de control y automatización de la EPIME*. Universidad Nacional Del Altiplano Facultad De Ing. Mecánica Eléctrica, Electrónica Y Sistemas Escuela Profesional De Ing. Mecánica Eléctrica.
- Mayta, L., & Tintaya, E. (2018). Diseño De Un Controlador Pid - Difuso En La Plataforma De Labview Para El Control De Niveles De Agua Aplicados En El Laboratorio De Control Y Automatización De La Epime. *Repositorio*, 161.
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/9264>
- Mehmet, K., & Ismail, H. (2007). A fuzzy voltage regulator (FVR) for a stand-alone synchronous generator. *Electric Power Components and Systems*, 35(4), 429-443.
<https://doi.org/10.1080/15325000601023688>
- Morejón Noboa, J. L., & Pérez Quintuña, N. A. (2015). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para regulación digital del voltaje terminal de generadores síncronos trifásicos*. 230.



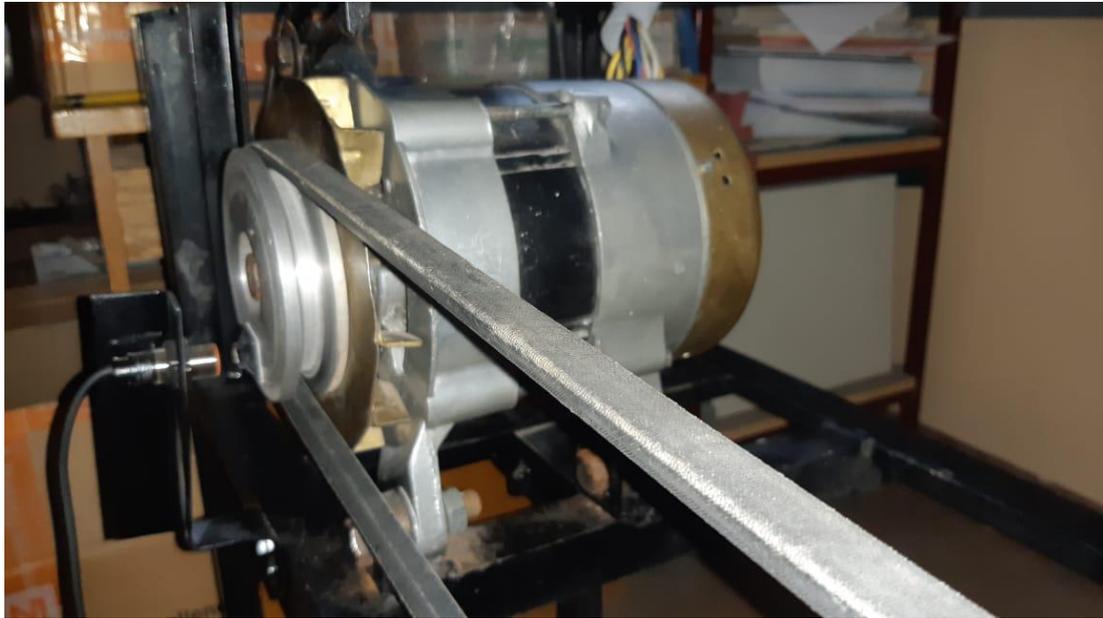
- Nizama, J. (2013). *Control digital de la excitación de un generador síncrono*.
- OVK Komplekt LLC. (2013). *Convertidor SINAMICS V20 6SL3210-5BB21-1UV0 1,1 kW / monofásico*. <https://ovk.ua/shop/product/simens-sinamics-v20-6sl3210-5bb21>
- Parella, S., & Martins, F. (2012). *Metodología de la investigación Cuantitativa* (p. 58).
- Pantoja, W. A. (2013). *Análisis y comparación de sistemas de control PID y PID difuso en lógica reconfigurable*. Universidad del Istmo. Campus Tehuantepec.
- Ponce, P. (2010). Inteligencia Artificial con aplicaciones. En *Book* (Primera).
- Quenta, W., & Hanco, E. (2019). *Metodología para el Diseño de un Controlador Difuso Aplicado a Hornos Industriales de Petróleo* (Número 051). Universidad Nacional del Altiplano.
- Ramya, R., & Selvi, K. (2011). A Simple Fuzzy Excitation Control System for Synchronous Generator. *PROCEEDINGS OF ICETECT 2011*, 35-39. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1847-0_1
- Ríos, J. R. (2005). *Análisis y Diseño de Controladores Basados en Lógica Difusa*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rodríguez, M. (2018). *Máquinas Eléctricas II*.
- Sáez, D. (2002). *Lógica Difusa, Redes Neuronales y Control Predictivo. Técnicas Modernas de Control*.
- Saldaña, E., Santos, M., & Zúñiga, H. (2013). *Diseño y Construcción del Sistema de Control para un Intercambiador de Calor Tubular*. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México.
- Schneider Electric. (2021a). *Ficha Técnica Harmony analog*. 10-12.
- Schneider Electric. (2021b). *Harmony Analog*.
- Schneider Electric Industries. (2019). *Inductive proximity sensors XS range Basics line*.
- Schneider Electric Industries. (2021). *Detector de proximidad inductivo* (pp. 5-7).



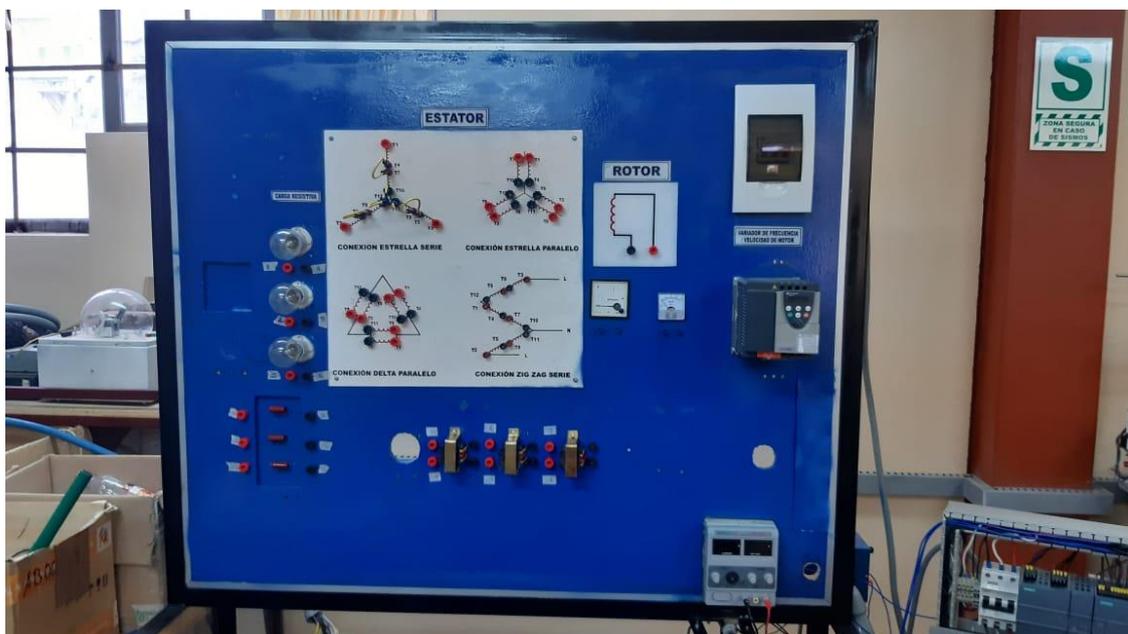
- Siemens. (2011). *S7 Controlador programable S7-1200 Manual de Sistema* (p. 834).
- Siemens. (2017). *Guía de usuario de SIMATIC Automation Tool V3.1* (pp. 1-286).
- Siemens. (2019). *S7-1200 SM 1238 Energy Meter 480VAC (6ES7238-5XA32-0XB0)* (p. 170).
- Siemens. (2021, diciembre 14). *Módulo de entradas analógicas SM 1231*.
- Sumina, D., Idzotic, T., & Erceg, I. (2007). Fuzzy logic control of synchronous generator under the condition of transient three phase short circuit. *EPE-PEMC 2006: 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings*, 1512-1516. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.283404>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-1(1)*, 116-132. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)42481-5](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)42481-5)
- Tong, R. M. (1977). A control engineering review of fuzzy systems. *Automatica*, 13, 559-569. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(77\)90077-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(77)90077-2)
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (PEARSON Educacion (ed.); Sexta Edic).
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338-353. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.194>
- Zatarain, O. (2011). *Lógica Difusa* (pp. 1-37). UAEH.

ANEXOS

ANEXO 1: GENERADOR SINCRONO UTILIZADO DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE MECANICA ELECTRICA UNA PUNO



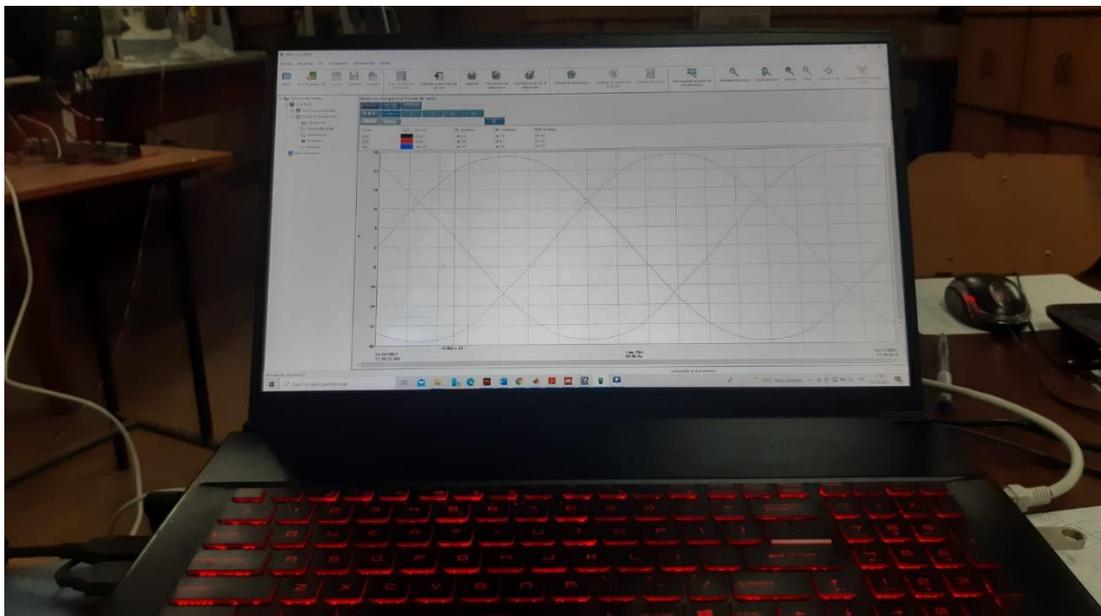
ANEXO 2: MODULO DE REGULACION DE TENSION DE GENERADOR SINCRONO



ANEXO 3: MODULO DE CONTROL PLC S7-1200 PARA IMPLEMENTAR EL CONTROLADOR DIFUSO

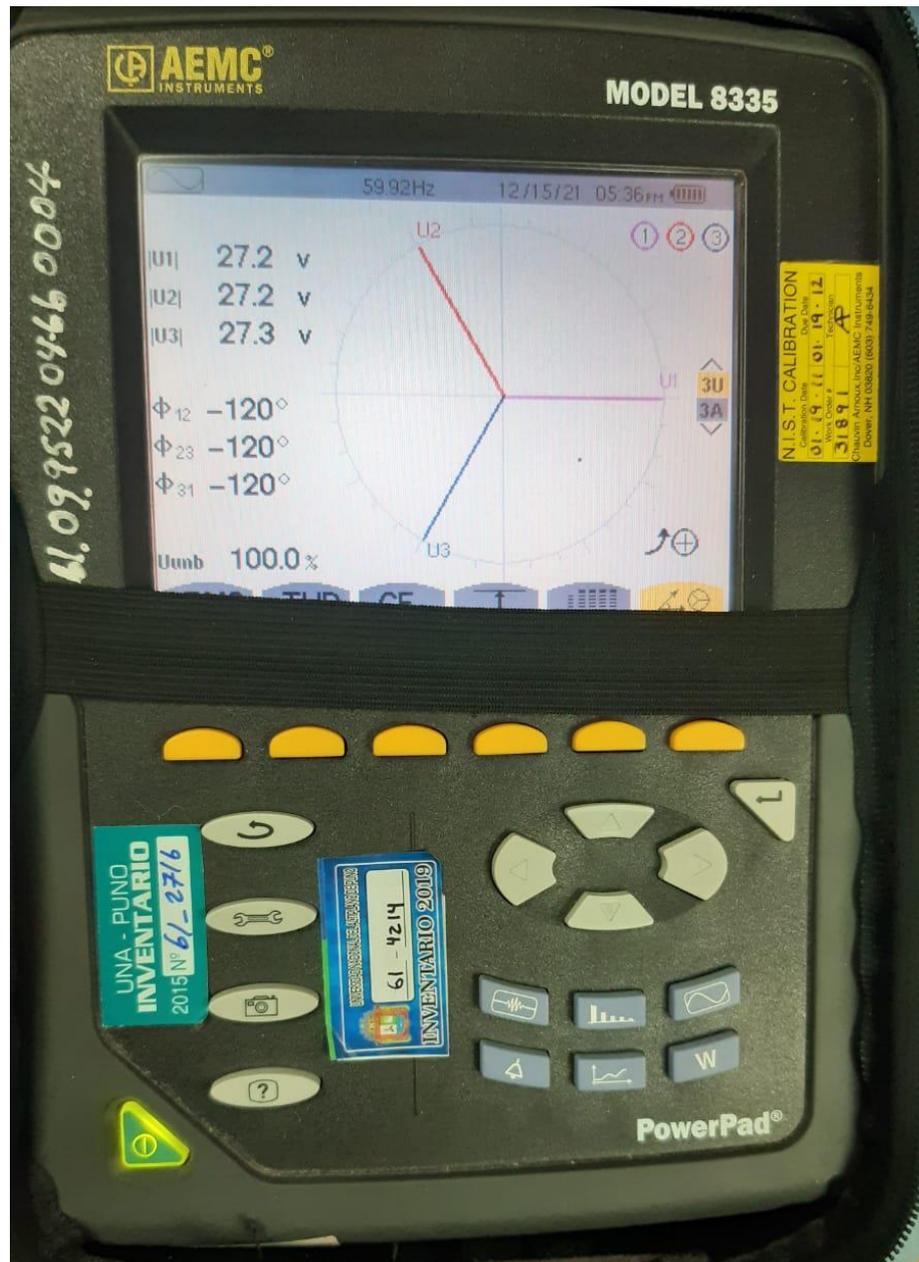


ANEXO 4: MEDICIONES REALIZADAS CON EL ANALIZADOR DE REDES



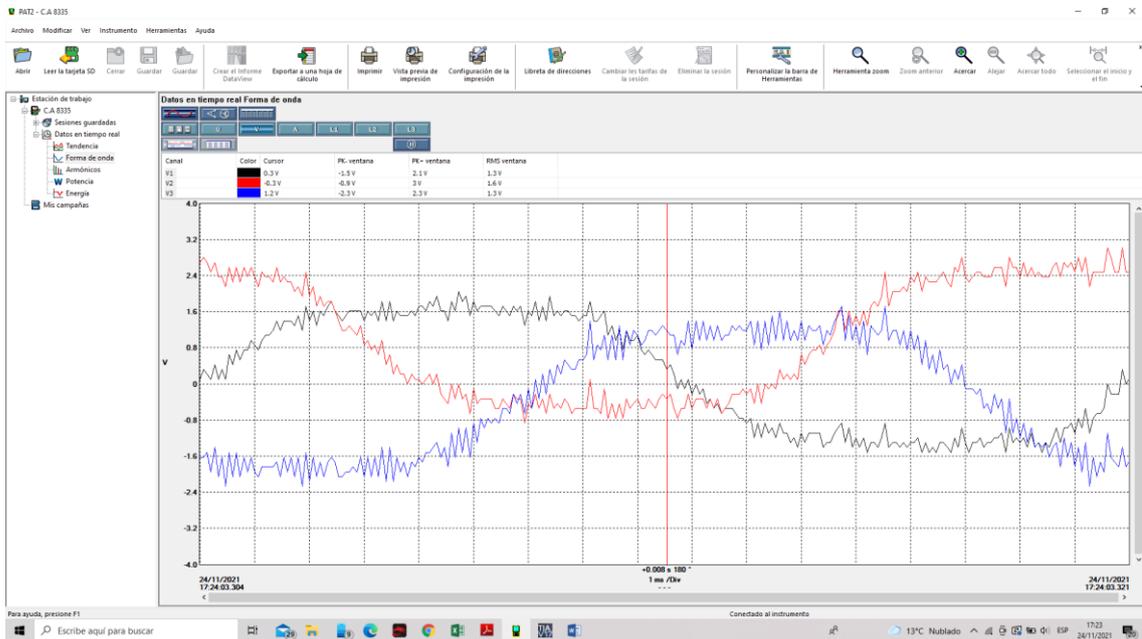
ANEXO 5: DIAGRAMA FASORIAL DE TENSION TRIFASICA MEDIDO

CON EL ANALIZADOR DE REDES

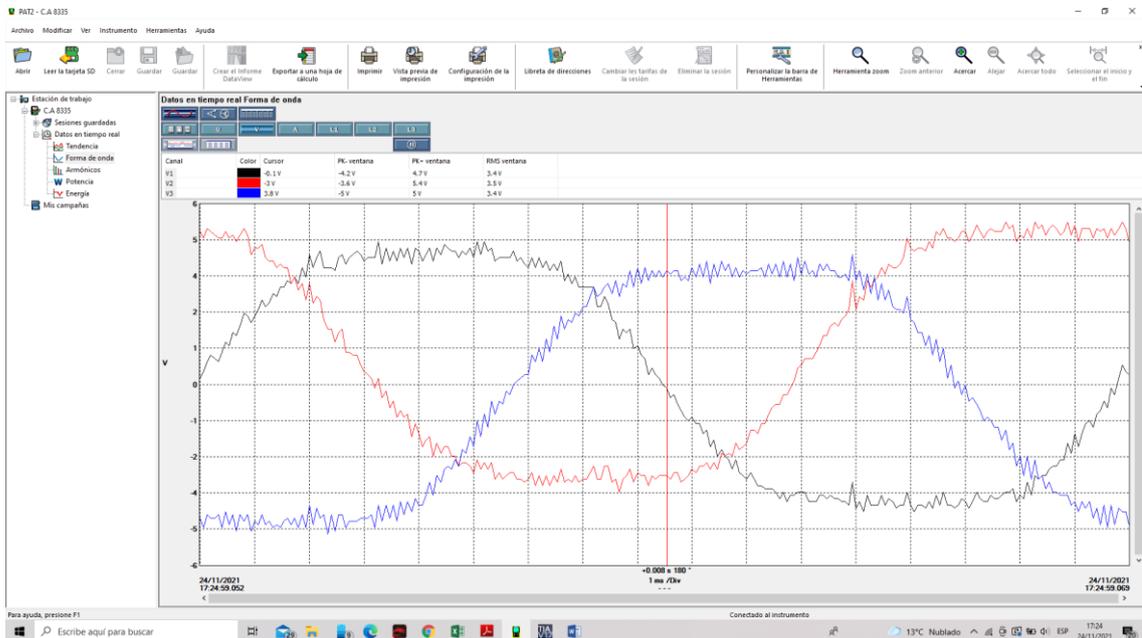


ANEXO 6: PRUEBA EN VACIO DEL CONTROLADOR DIFUSO

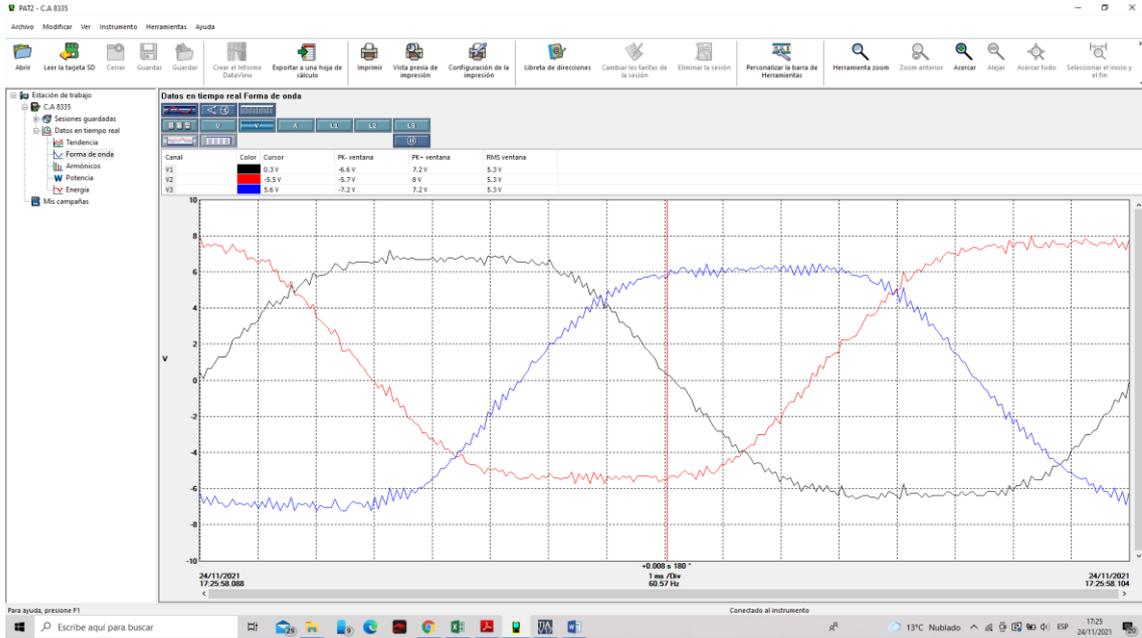
Prueba 1: Prueba Realizada con $I_x=0A$



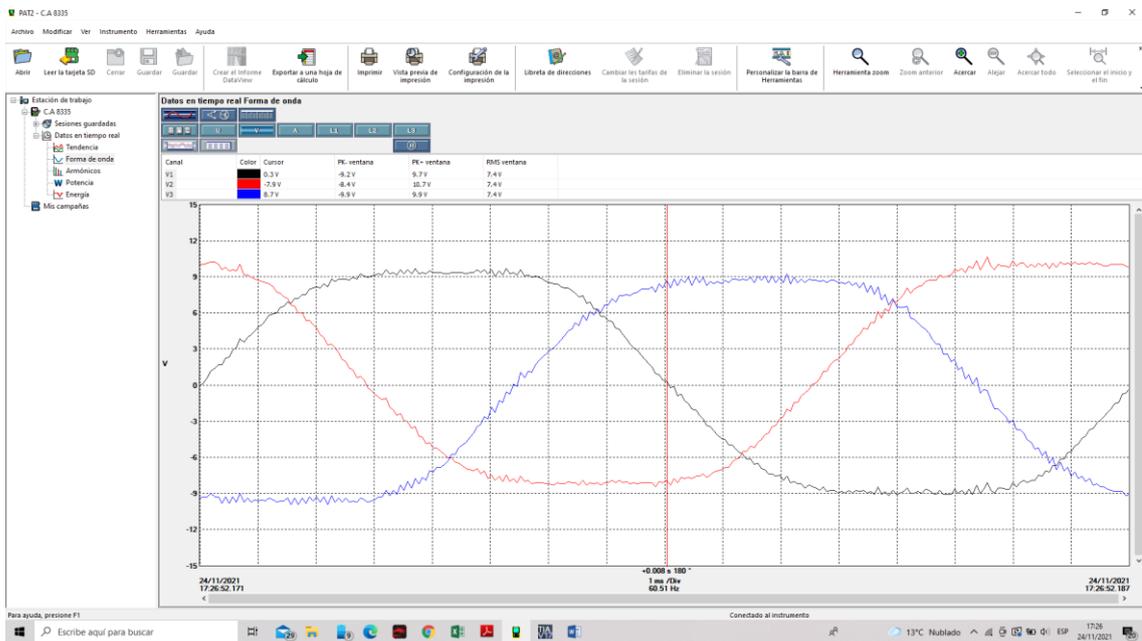
Prueba 2: Prueba Realizada con $I_x=0.1A$



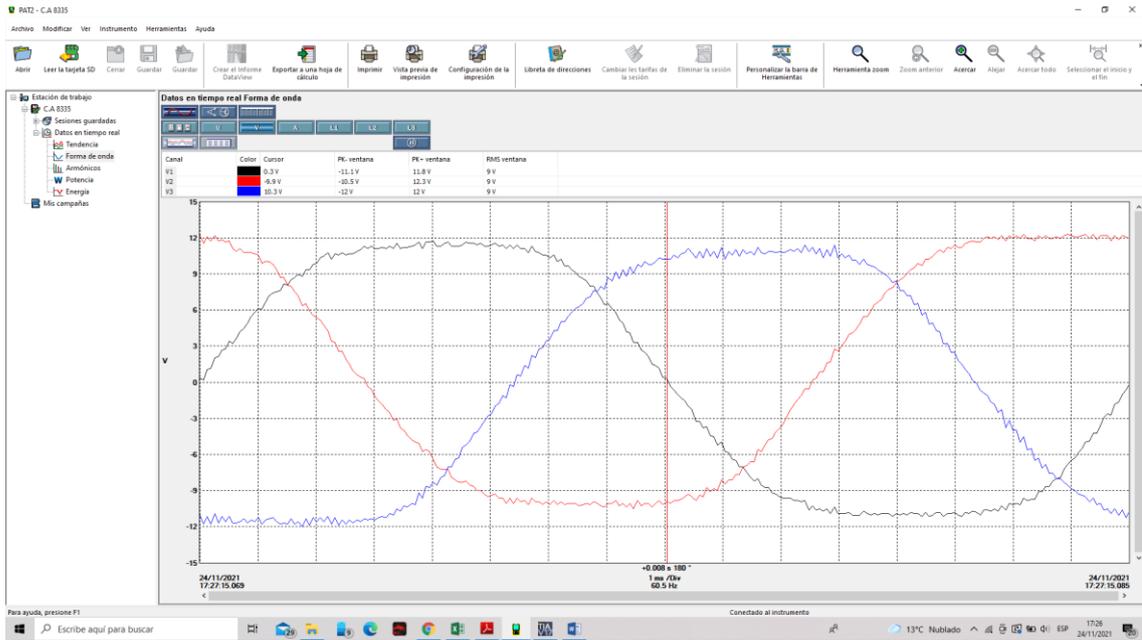
Prueba 3: Prueba Realizada con $I_x=0.2A$



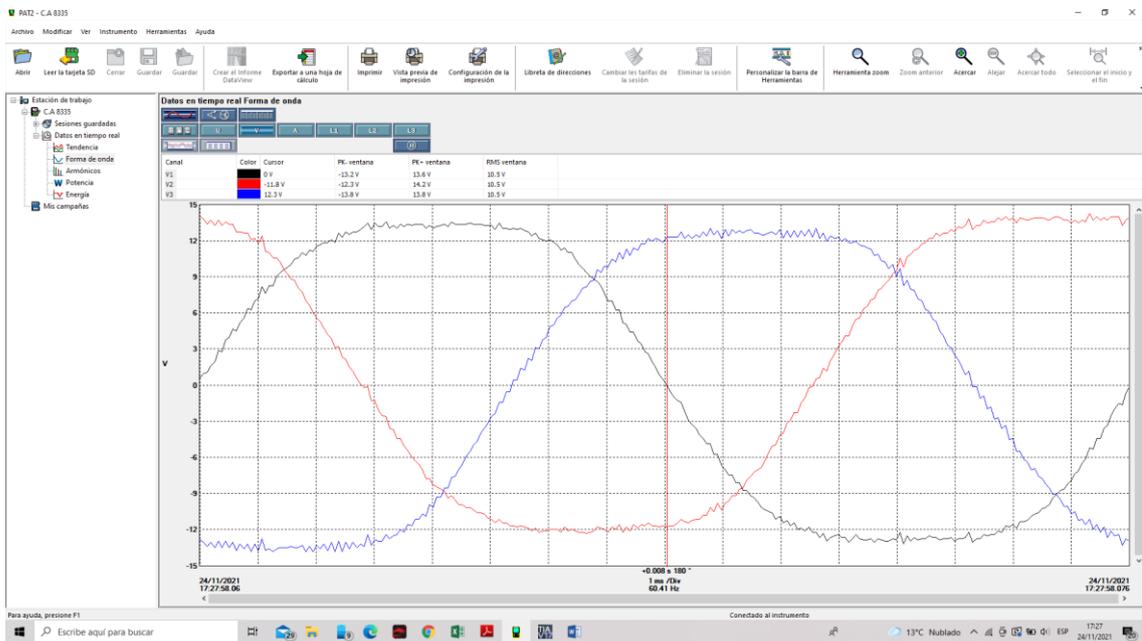
Prueba 4: Prueba Realizada con $I_x=0.3A$



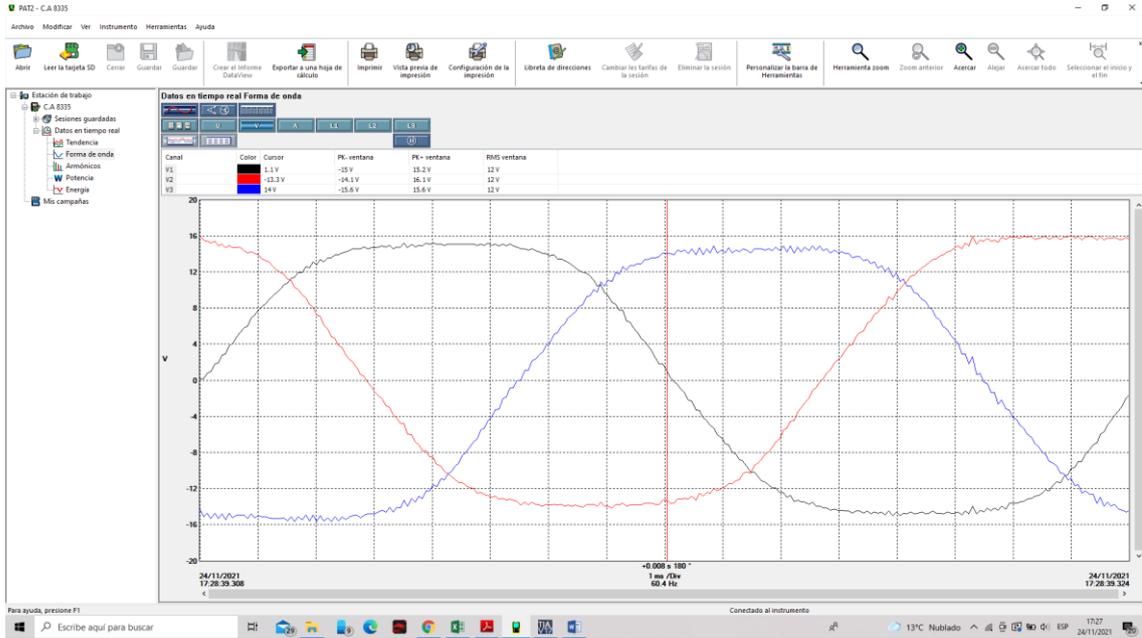
Prueba 5: Prueba Realizada con $I_x=0.4A$



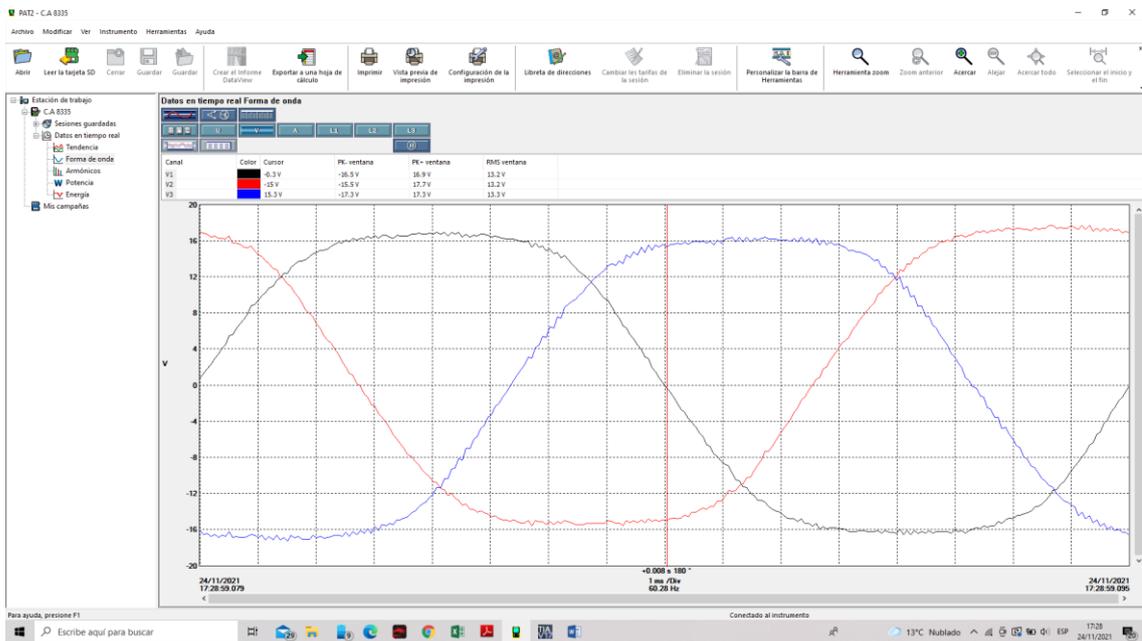
Prueba 6: Prueba Realizada con $I_x=0.5A$



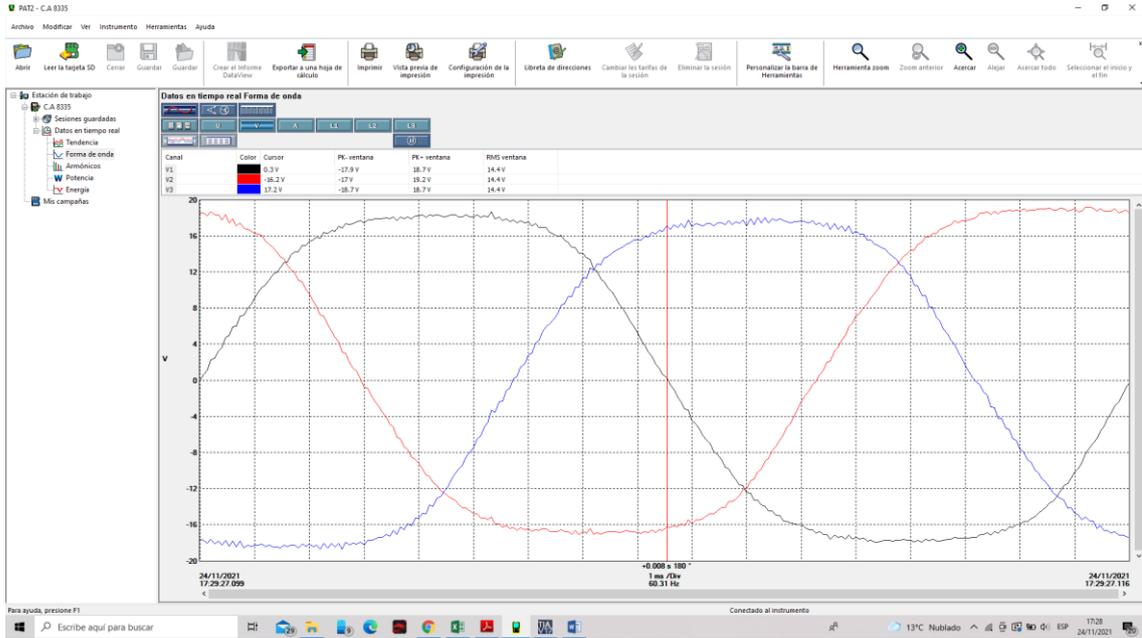
Prueba 7: Prueba Realizada con $I_x=0.6A$



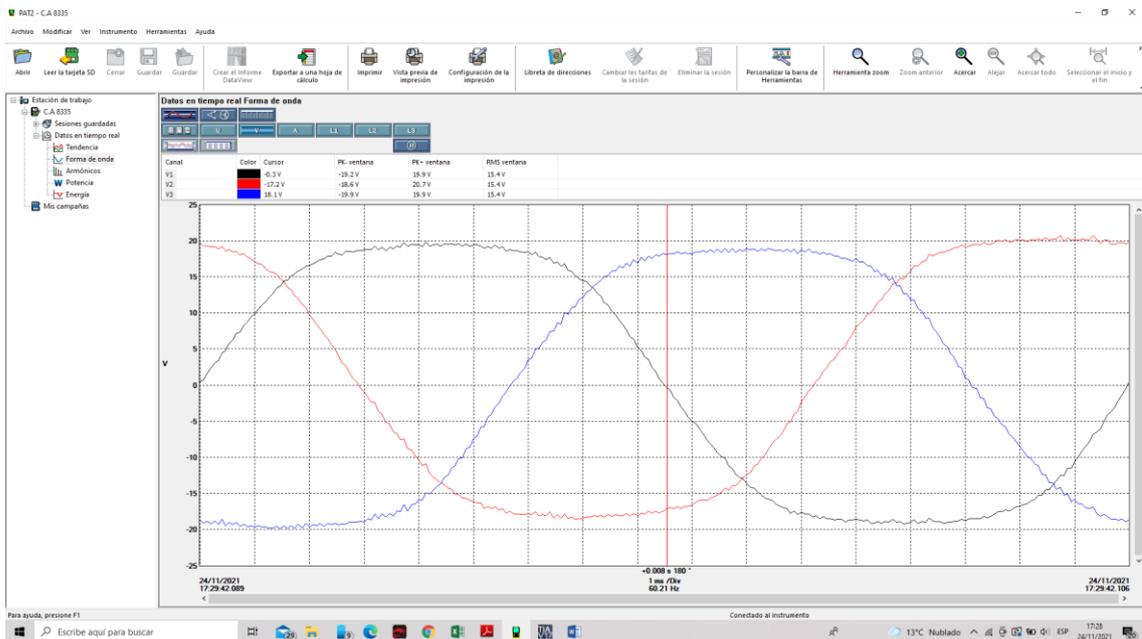
Prueba 8: Prueba Realizada con $I_x=0.7A$



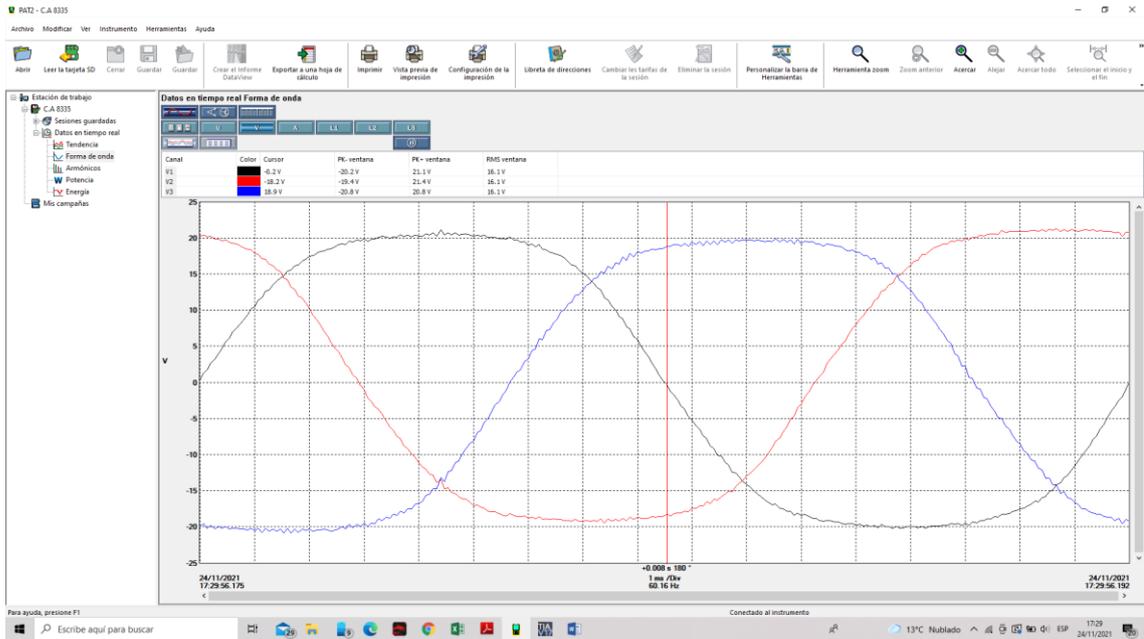
Prueba 9: Prueba Realizada con $I_x=0.8A$



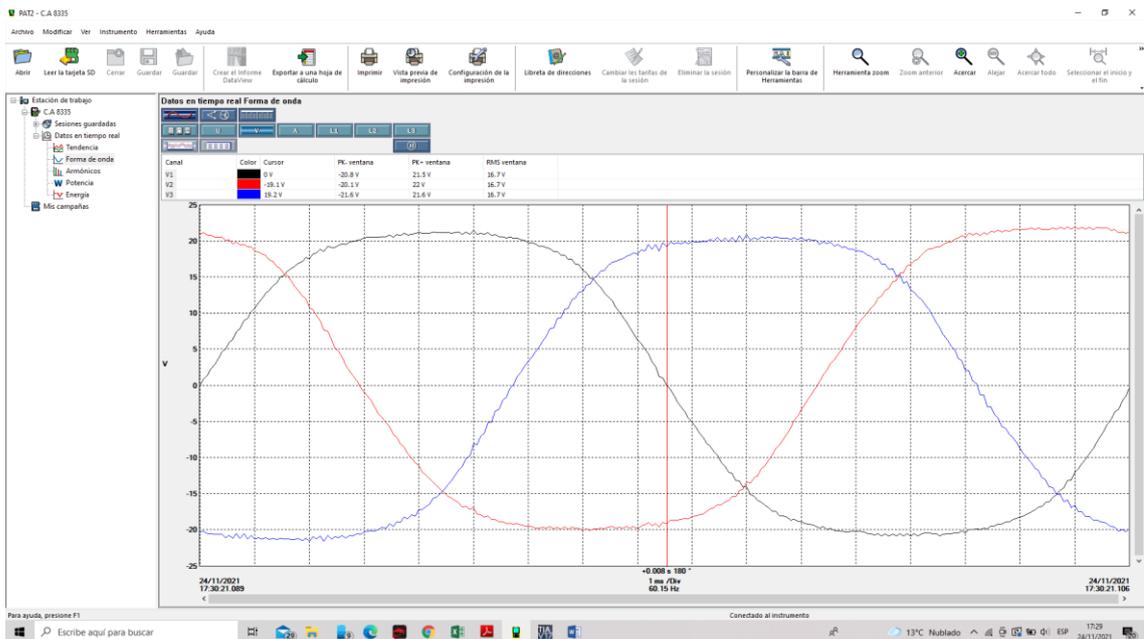
Prueba 10: Prueba realizada con $I_x=0.9A$



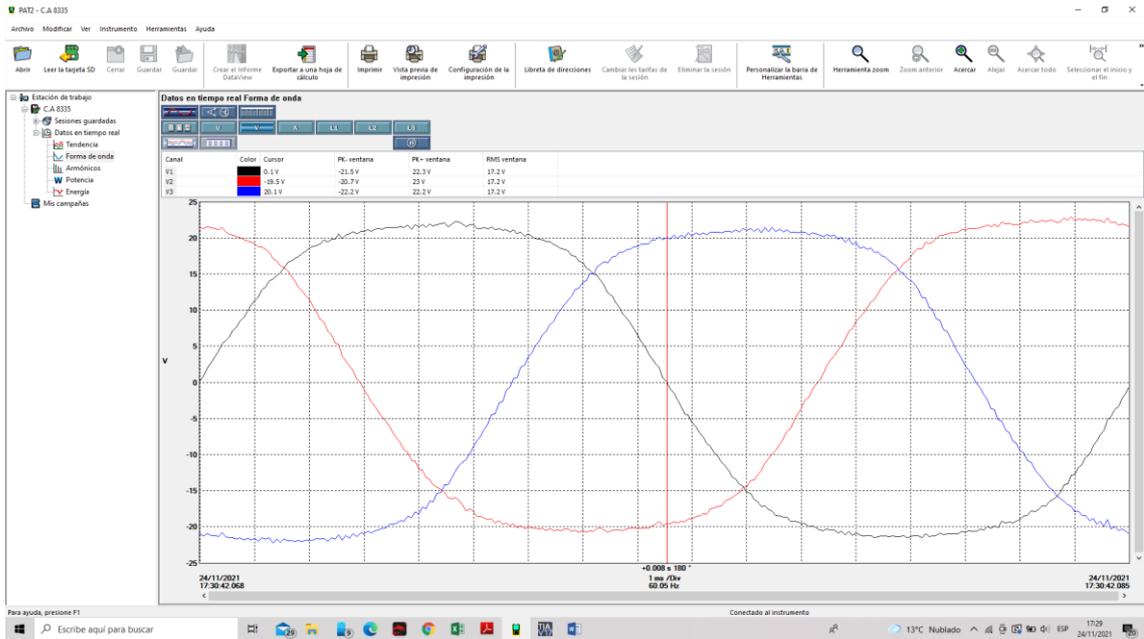
Prueba 11: cuando se realiza la prueba con $I_x=1A$



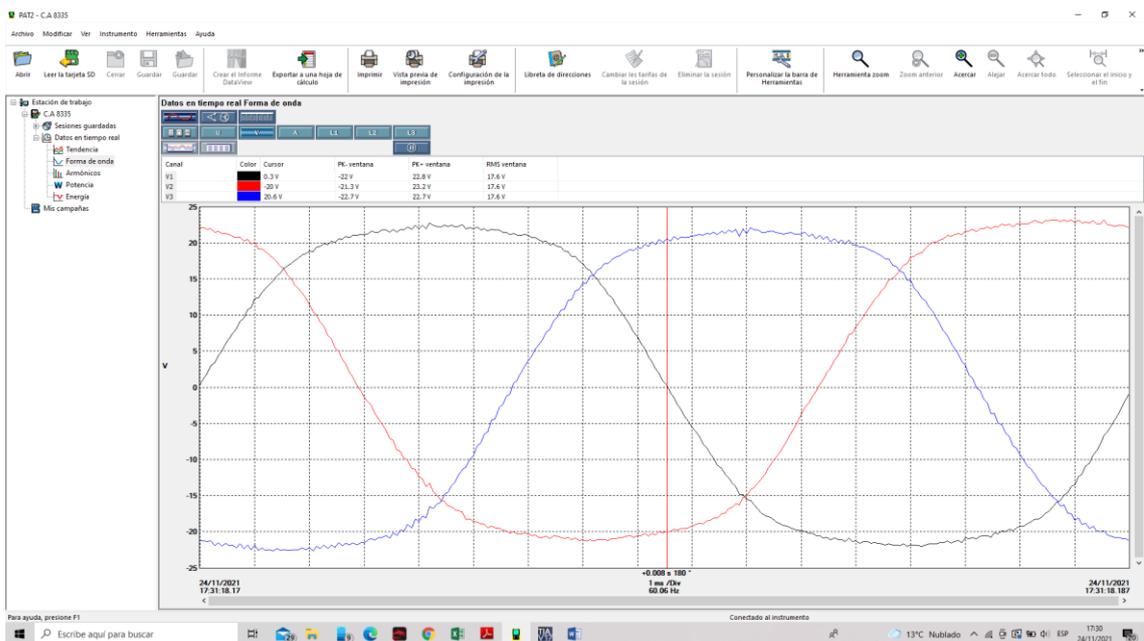
Prueba 12: Prueba Realizada con $I_x=1.1A$



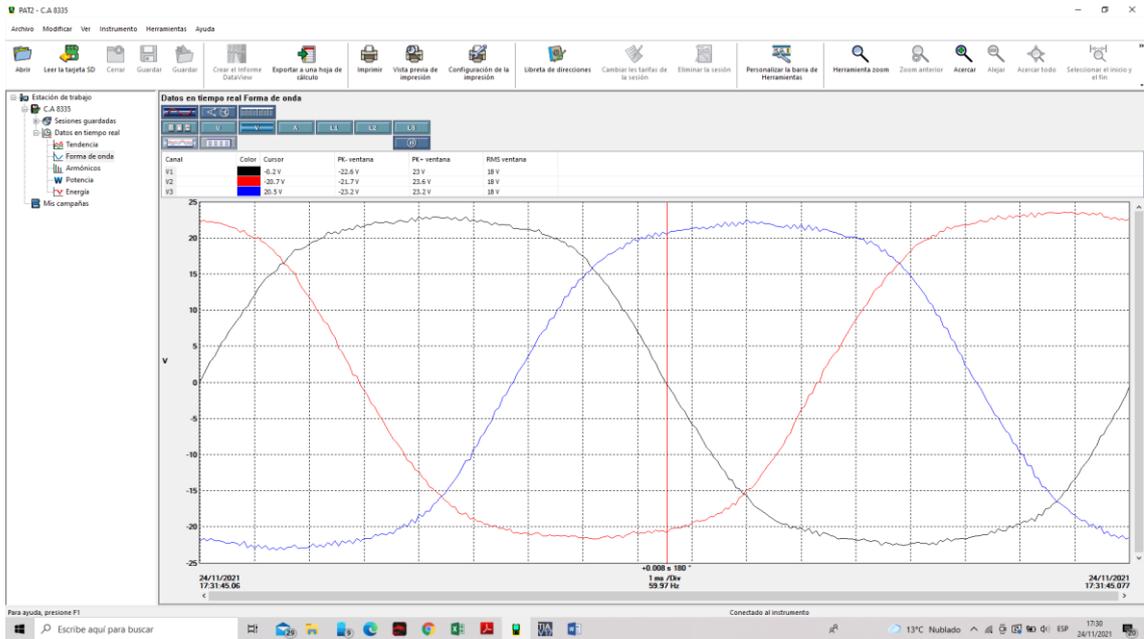
Prueba 13: Prueba Realizada con $I_x=1.2A$



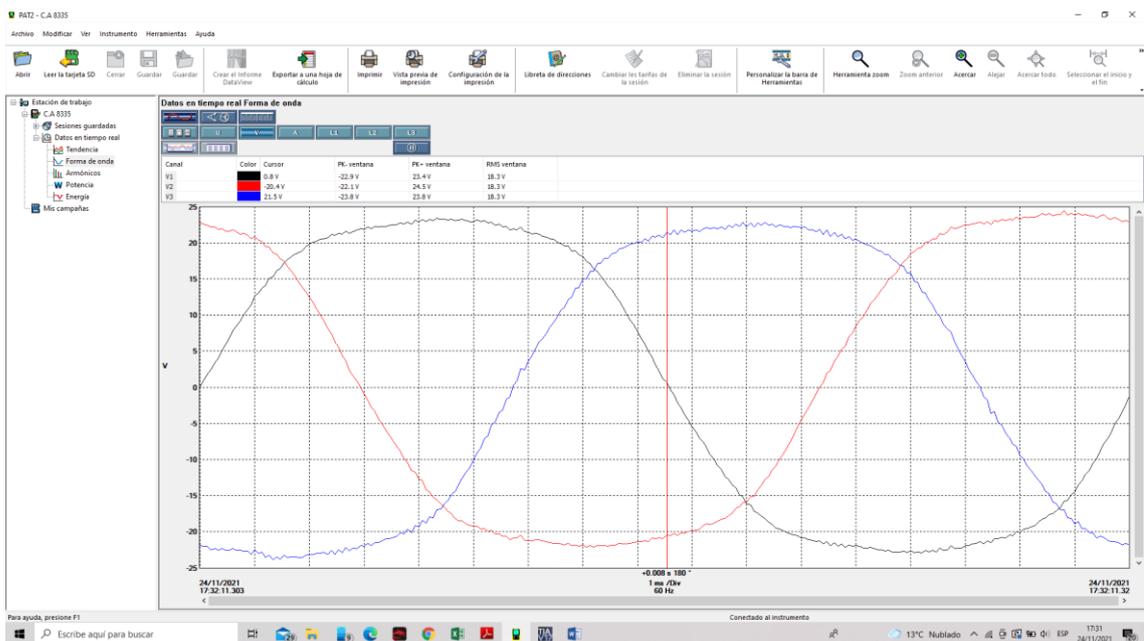
Prueba 14: Prueba Realizada con $I_x=1.3A$



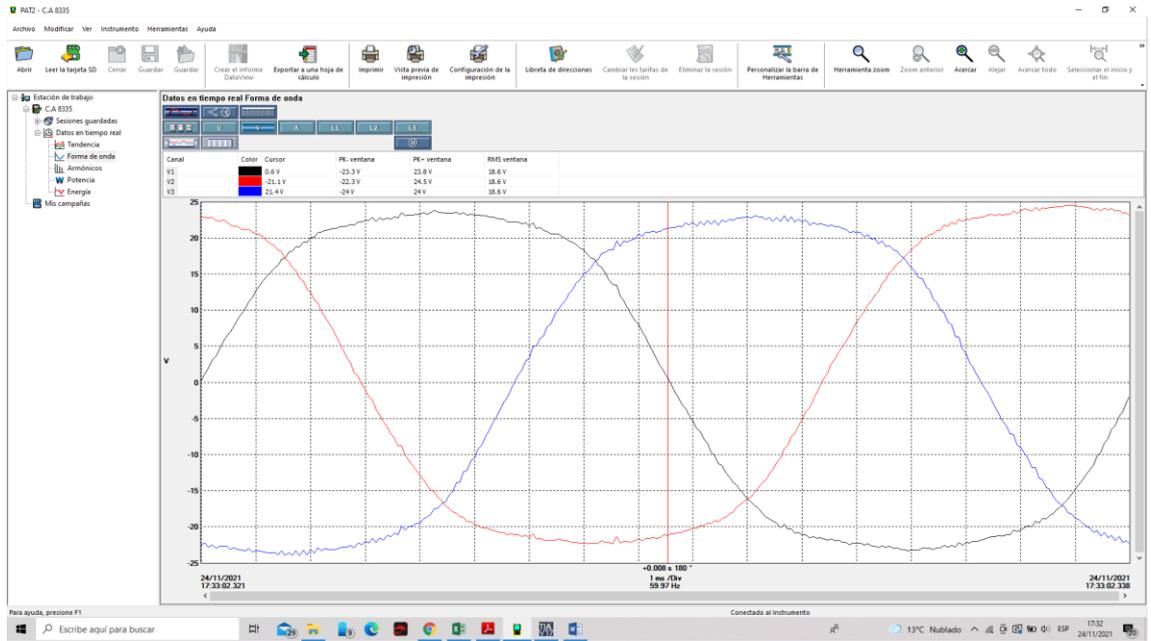
Prueba 15: Prueba Realizada con $I_x=1.4A$



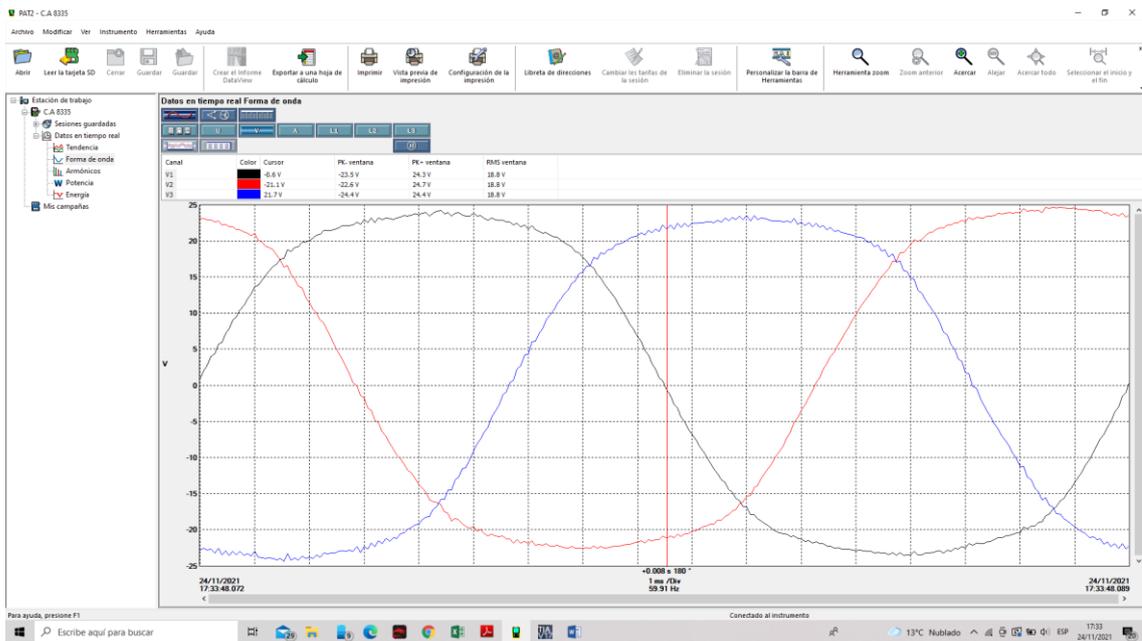
Prueba 16: Prueba Realizada con $I_x=1.5A$



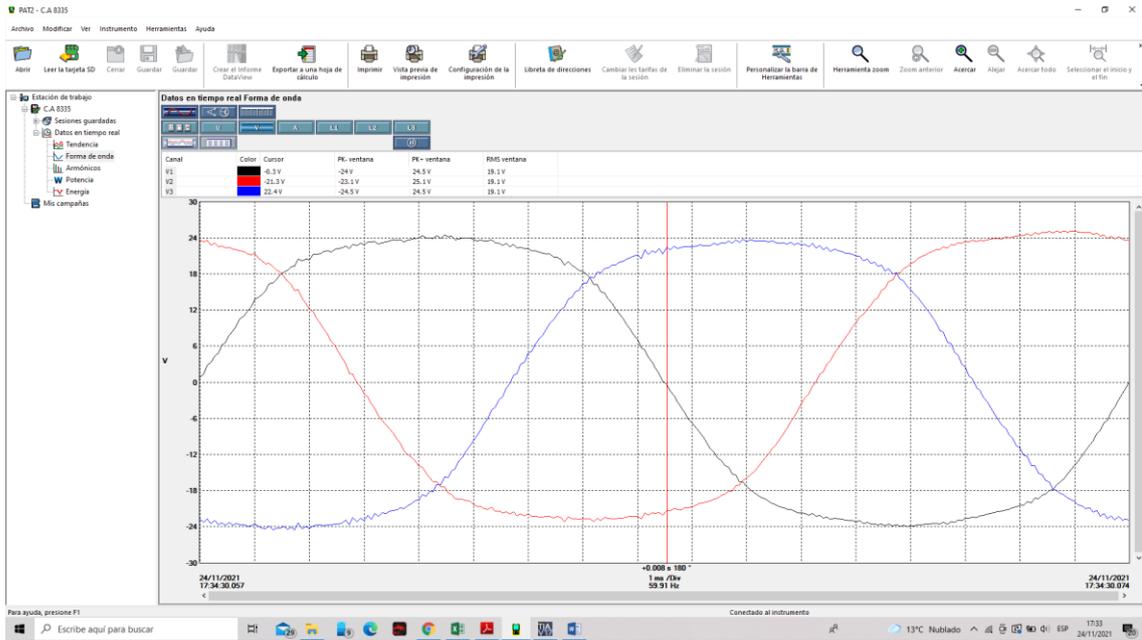
Prueba 17: Prueba Realizada con $I_x=1.6A$



Prueba 18: Prueba Realizada con $I_x=1.7A$



Prueba 19: Prueba Realizada con $I_x=1.8A$



Prueba 20: Prueba Realizada con $I_x=1.9A$

