



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



REGULACIÓN DE FRECUENCIA Y TENSIÓN DE UN
GENERADOR SÍNCRONO, UTILIZANDO CONTROLADOR PID
DIFUSO

TESIS

PRESENTADA POR:

WILIAN ARMANDO LEON CABANA

EDGAR QUISPE MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO – PERÚ

2024



WILIAN ARMANDO & EDGAR LEON CABANA & QUI... REGULACIÓN DE FRECUENCIA Y TENSIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO, UTILIZANDO CONTROLADOR PID ...

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:416747774

151 Páginas

Fecha de entrega
16 dic 2024, 6:52 p.m. GMT-5

25,888 Palabras

Fecha de descarga
16 dic 2024, 6:58 p.m. GMT-5

147,355 Caracteres

Nombre de archivo
Borrador-Tesis-William_VF.docx

Tamaño de archivo
5.6 MB





11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cá...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA
ING MECANICO ELECTRICISTA
CIP 78419



M.Sc. Felipe Condori Chambilla
SUBDIRECTOR DE INVESTIGACION
EPIME





DEDICATORIA

Con todo cariño y gratitud agradecer a mis padres, Benito y Leonor por haberme apoyado por que eran mi motor y motivo para seguir adelante y culminar mi carrera profesional.

Agradecer también a mis docentes que siempre me apoyaron e inculcaron todos sus conocimientos para yo poder ser una persona profesional y estoy muy agradecido gracias

Wilian Armando Leon Cabana



DEDICATORIA

Gracias a Dios, a mis padres y hermanos por haberme apoyado en todo momento, y también agradecer a mis docentes por todo el conocimiento que inculcaron hacia mi persona gracias por todo.

Edgar Quispe Mamani



AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica por habernos acogido y habernos brindado un excelente ambiente académico. Y agradecer a nuestro asesor de tesis al ING. José Manuel Ramos Cutipa que deposito todo su confianza y conocimiento para que también esta tesis salga excelente y estar agradecidos con vuestros docentes de nuestra escuela profesional gracias.

Wilian Armando Leon Cabana

Edgar Quispe Mamani



ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ANEXOS

ACRÓNIMOS

RESUMEN 15

ABSTRACT..... 16

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO GENERAL 18

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO 18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES. 19

2.2. MARCO TEÓRICO. 24

2.2.1. Generador síncrono. 24

2.2.2. Regulación de Frecuencia y Tensión. 61

2.2.3. Controladores PID..... 65

2.2.4. Lógica Difusa..... 69



2.2.5.	Control Difuso.....	74
2.2.6.	Controlador PID Difuso.	76
2.2.7.	Tipos de controladores PID Difuso.....	79
2.2.8.	Aplicaciones en Generadores Síncronos.....	84

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	MATERIALES UTILIZADOS	86
3.1.1.	Herramientas de Software.....	86
3.1.2.	Recursos Computacionales.	88
3.1.3.	Documentación y Material Bibliográfico.....	88
3.1.4.	Recursos Humanos.....	89
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO	89
3.2.1.	Población de Estudio.....	90
3.2.2.	Muestra de Estudio.....	91
3.2.3.	Criterios para la Selección de la Muestra:.....	91
3.2.4.	Resultados de la Muestra de Estudio	92
3.3.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	93
3.4.	MODELO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	99
3.4.1.	Modelo de recolección de datos.....	99
3.4.2.	Técnicas de recolección de datos.	100
3.5.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	102

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	MODELAMIENTO DEL GENERADOR SÍNCRONO.....	104
4.1.1	Ecuaciones de corrientes en los ejes $d-q$	104



4.1.2	Par electromagnético T_e	105
4.1.3	Dinámica de la velocidad angular del rotor ωr	106
4.1.4	Ángulo del rotor δ	106
4.1.5	Energía cinética almacenada E_k	107
4.1.6	Resultados de la simulación de operación del generador síncrono.	107
4.2	DISEÑO DEL CONTROLADOR PID	112
4.3	DISEÑO DEL CONTROLADOR PID DIFUSO	115
4.3.1.	Características del sistema difuso para el ajuste del PID.....	115
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	117
V.	CONCLUSIONES	126
VI.	RECOMENDACIONES	127
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXOS	136

ÁREA: Control de Procesos

TEMA: Regulación de Frecuencia y Tensión de Generadores Síncronos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 19 de diciembre del 2024



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Constitución general de una máquina síncrona de rotor cilíndrico.....25
Figura 2	Estator de un alternador trifásico26
Figura 3	Máquina síncrona de polos salientes. 30
Figura 4	Excitación mediante excitatrices de corriente continua 32
Figura 5	Excitación mediante excitatrices de corriente continua 37
Figura 6.	Diagrama fasorial de una fase del inducido de un alternador síncrono en carga..... 38
Figura 7	Conexión del generador en estrella..... 40
Figura 8	Conexión del generador en delta. 41
Figura 9	Curvas V de un generador síncrono. 46
Figura 10	Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga resistiva. 50
Figura 11	Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga inductiva..... 51
Figura 12	Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga inductiva..... 53
Figura 13	Curva de regulación de un generador síncrono. 58
Figura 14	Diagrama de bloques de un controlador PID..... 65
Figura 15	Ejemplo de lógica difusa 70
Figura 16	Sistema de control difuso para controlar la velocidad de un motor 73
Figura 17	Diagrama de bloques correspondiente a un controlador PID difuso 76
Figura 18	Estructura de código para la implementación del modelo del generador.. 94
Figura 19	Estructura de código para la implementación del controlador PID..... 95
Figura 20	Estructura de código para la implementación del controlador PID difuso.97
Figura 21	Estructura de código para la comparación de resultados..... 98
Figura 22	Corrientes en los ejes d y q..... 108



Figura 23	Velocidad angular del rotor.....	109
Figura 24	Variación del ángulo del rotor.....	109
Figura 25	Error en la velocidad angular del rotor.....	110
Figura 26	Torque electromagnético versus torque mecánico	111
Figura 27	Energía cinética almacenada en el rotor.....	111
Figura 28	Respuesta de parámetros de generador síncrono luego de integrar el controlador PID.	114
Figura 29	Comportamiento de las corrientes en los ejes d y q	119
Figura 30	Comportamiento de la velocidad angular en el rotor del generador y la frecuencia generada.	119
Figura 31	Comportamiento de las tensiones trifásicas generadas.....	121
Figura 32	Comportamiento del torque electromagnético y mecánico en el generador síncrono.	122



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Comparación entre los tipos de Controladores PID Difusos.....	84
Tabla 2 Resumen de variables y su operacionalidad.	103
Tabla 3 Intervalos de operación de funciones de membresía.....	116
Tabla 4 Reglas de inferencia utilizadas en el controlador difuso.....	117



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Código de simulación del generador síncrono	136
ANEXO 2 Código de simulación del controlador PID	139
ANEXO 3 Código de simulación del controlador PID difuso	142
ANEXO 4 Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional	148
ANEXO 5 Declaración jurada de autenticidad de tesis	150



ACRÓNIMOS

PID:	Proportional-Integral-Derivative
AGC:	Automatic Generation Control
AVR:	Automatic Voltage Regulator
FACTS:	Flexible AC Transmission Systems
EMS:	Energy Management Systems
SES:	Sistemas de Excitación Estática



RESUMEN

La investigación se centró en el diseño y simulación de un controlador PID difuso para regular la frecuencia y la tensión de un generador síncrono, con el objetivo de garantizar la estabilidad y calidad en sistemas eléctricos. Se desarrollo un modelado matemático del generador síncrono considerando el dominio $d-q$, además de las dinámicas de interacción eléctricas y mecánicas. Este modelo permitió evaluar la interacción entre el rotor, el campo magnético y las cargas conectadas, proporcionando la base para la implementación del controlador PID difuso. El controlador desarrollado combina las ventajas de un controlador convencional con la flexibilidad y adaptabilidad de controladores basados en lógica difusa. Considerando funciones de membresía pertinentes y reglas difusas adecuadas, se ajusta dinámicamente los parámetros del controlador PID los cuales son las constantes proporcional, integral y derivativa de acuerdo con las variables de error y la derivada del error, permitiendo un control eficiente frente a variaciones en las condiciones de operación. Las simulaciones realizadas demostraron que el controlador logró estabilizar la frecuencia en 60 Hz y la tensión en 220 V, incluso frente a perturbaciones iniciales. Se ha podido observar que los tiempos de estabilización en las oscilaciones transitorias se reducen en comparación con un controlador PID convencional. En el estado estacionario, el sistema mantuvo una sincronización precisa entre el torque mecánico aplicado y el torque electromagnético generado, por lo que la dinámica del generador se mantiene estable. Estos resultados confirman la hipótesis planteada. Futuras investigaciones podrían optimizar las funciones de membresía y validar el desempeño del controlador diseñado en situaciones experimentales con cargas variables.

Palabras Clave: Control PID, Difuso, Frecuencia, Generador síncrono, Regulación de tensión.



ABSTRACT

The research focused on the design and simulation of a fuzzy PID controller to regulate the frequency and voltage of a synchronous generator, aiming to ensure stability and quality in electrical systems. A mathematical model of the synchronous generator was developed considering the $d-q$ domain, along with the electrical and mechanical interaction dynamics. This model allowed for the evaluation of the interaction between the rotor, the magnetic field, and the connected loads, providing the basis for the implementation of the fuzzy PID controller. The developed controller combines the advantages of a conventional controller with the flexibility and adaptability of controllers based on fuzzy logic. By considering pertinent membership functions and appropriate fuzzy rules, the parameters of the PID controller which are the proportional, integral, and derivative constants are dynamically adjusted according to the error variables and the derivative of the error, allowing efficient control in the face of variations in operating conditions. Simulations demonstrated that the controller successfully stabilized the frequency at 60 Hz and the voltage at 220 V, even in the presence of initial disturbances. It was observed that the stabilization times of transient oscillations are reduced compared to a conventional PID controller. In the steady state, the system maintained precise synchronization between the applied mechanical torque and the generated electromagnetic torque, ensuring the generator's dynamics remain stable. These results confirm the proposed hypothesis. Future research could optimize the membership functions and validate the performance of the designed controller in experimental situations with variable loads.

Keywords: Control PID, Fuzzy, Frequency, Synchronous generator, Voltage regulation.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los retos crecientes en los sistemas eléctricos modernos demandan soluciones que aseguren estabilidad, eficiencia y calidad en el suministro de energía. La integración de fuentes renovables y las fluctuaciones en la demanda han generado dinámicas más complejas que afectan directamente la operación de la red eléctrica. En este contexto, los generadores síncronos, fundamentales para la producción de energía, deben mantener la frecuencia y la tensión dentro de rangos muy precisos para garantizar el funcionamiento adecuado de la red. Sin embargo, estas variables son muy sensibles a factores como perturbaciones externas, cambios en la carga y condiciones operativas no lineales, lo que resalta la importancia de desarrollar técnicas de control avanzadas y adaptativas para superar las limitaciones de los métodos tradicionales.

Los controladores convencionales, como el PID, son ampliamente usados en sistemas eléctricos debido a su sencillez y eficacia en condiciones lineales y predecibles. Sin embargo, su rendimiento se ve limitado cuando se enfrentan a sistemas con dinámicas no lineales o cambios rápidos, como es el caso de los generadores síncronos. En este sentido, los controladores basados en lógica difusa ofrecen una alternativa innovadora y prometedora. Estos controladores, al incorporar principios de inteligencia artificial, pueden gestionar incertidumbres y ajustar sus parámetros en tiempo real, mejorando su capacidad de adaptación y respuesta ante cambios operativos. (Rodríguez, 2018). Estudios previos han mostrado que los controladores difusos optimizan la respuesta transitoria y reducen significativamente las oscilaciones en sistemas dinámicos complejos (Modesti, 2015).



Este trabajo tiene como objetivo diseñar y simular un controlador PID difuso aplicado a un generador síncrono, con el fin de regular eficientemente la frecuencia y la tensión. Para ello, se modelará matemáticamente el generador en el dominio d-q, incluyendo tanto las dinámicas eléctricas como mecánicas del sistema. Este modelo será la base para implementar un controlador que combine las ventajas del PID tradicional con la flexibilidad de la lógica difusa, permitiendo ajustes dinámicos en las constantes proporcional, integral y derivativa en función de las variables de error y su derivada. Con esta investigación, se busca aportar al desarrollo de soluciones técnicas avanzadas en el campo del control de sistemas eléctricos.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular un controlador PID difuso, para regular la tensión y frecuencia de un generador síncrono.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar un sistema controlador PID difuso para regular la frecuencia y tensión de un generador sincrónico.
- Diseñar el controlador PID difuso.
- Simular el controlador y determinar su operación con el generador síncrono utilizando software computacional.

1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Utilizando un controlador PID difuso, se puede regular la tensión y frecuencia de un generador síncrono.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se analiza antecedentes enmarcados en la investigación, así como el marco teórico.

2.1. ANTECEDENTES.

Gómez et al. (2018) en su investigación hacen notar que la regulación de frecuencia importante para mantener la estabilidad de sistemas eléctricos, y la utilización de controladores PID han demostrado útiles en la regulación de la frecuencia en generadores eléctricos del tipo síncronos.

Li & Zhou (2019) en su trabajo de investigación muestra en sus resultados que la regulación de tensión es esencial para garantizar la calidad de la energía eléctrica. Por lo que concluye que los controladores PID sintonizados adecuadamente permiten el control de la tensión en generadores síncronos.

Wang & Cheng (2017) indican que los sistemas eléctricos son no lineales, concluye que la regulación de este tipo de variables no líneas se pueden realizar utilizando controladores del tipo difuso, por lo que son una opción ideal para el control adaptativo de frecuencia y tensión en generadores eléctricos.

Zhao & Xu (2020) en los resultados de su investigación indican que los controladores PID difusos permiten combinar las bondades del controlador PID con la adaptabilidad de los controladores basados en la lógica difusa, mejorando la respuesta dinámica de estos.



Jiang et al. (2019) estudian la aplicación de algoritmos genéticos en la optimización de controladores PID difusos logrando un ajuste más preciso en los parámetros del controlador, concluye que se mejora la estabilidad del sistema eléctrico estudiado.

Ahmad et al. (2021) comparan el desempeño de los controladores PID con controladores PID difusos en sistemas eléctricos con carga variable, concluyen que los controladores PID difusos presentan un desempeño mayor que el convencional.

Khan & Malik (2020) indican que en la operación de redes eléctricas inteligentes con generadores síncronos se hace necesario la utilización de controladores avanzados, dentro de los cuales están los controladores PID difusos, estos se utilizan para mantener la estabilidad de frecuencia y tensión.

Hossain & Zhang (2019) en los resultados de sus investigaciones indican que muy importante modelar matemáticamente generadores síncronos, dichos modelos deben ser los más precisos posibles para lograr diseñar controladores adecuados como los PID difusos.

Rao & Nayak (2018) subrayan que sus resultados de investigación demuestran que los controladores PID difusos tienen mejor respuesta en condiciones transitorias y una mayor robustez.

Mishra & Ghosh (2021) proponen formas de control que mejoran significativamente la estabilidad de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia utilizando controladores PID difusos aplicado a generadores síncronos.

Xu & Zhang (2020) indican que los sistemas de control PID difusos, han demostrado ser efectivos en el control de tensión en sistemas eléctricos de potencia.



Liu et al. (2018) indican que el diseño adecuado de controladores difusos aplicado a generadores síncronos mejora su operación y también la calidad de la energía suministrada.

Tang & Li (2019) indican que es posible la utilización en tiempo real de controladores PID difusos con generadores síncronos, lo que permitiría mejorar la respuesta dinámica del estos.

Zhou & Chen (2020) indica que es importante analizar la estabilidad de los sistemas para garantizar que los controladores PID difusos funcionen correctamente bajo diversas condiciones de operación.

Bai et al. (2021) también indican que un correcto ajuste de los parámetros de controladores PID difusos es importante para que los resultados de su aplicación en la regulación de frecuencia y tensión sean adecuados.

Singh & Kumar (2019) en sus resultados hacen notar que los controladores PID difusos permiten reducir las sobretensiones que se presentan en la operación de generadores síncronos, con lo cual se mejora la seguridad y la vida útil de estos equipos.

Gupta & Sharma (2020) demuestran que la adecuación de controladores PID con lógica difusa se ha realizado por la necesidad de mejorar la estabilidad de los sistemas eléctricos.

Zhang & Li (2020) en los resultados de sus investigaciones indican que las perturbaciones en sistemas de potencia afectan la estabilidad; por lo que los controladores PID difusos pueden adaptarse mejor a estos transitorios.



Y. Zhou et al. (2022) en sus resultados de sus investigaciones muestran que los controladores PID difusos ajustan sus parámetros en tiempo real, por lo que ofrecen una ventaja en la aplicación de regulación de generadores síncronos.

Chen & Liu (2018) explican que la aplicación de algoritmos de optimización en el diseño de controladores PID difusos mejora significativamente su rendimiento.

Nizama Valdez (2013) en la tesis “Control digital de la excitación de un generador síncrono”, se propone el uso de microcontroladores para el control digital de la excitación de un generador síncrono, empleando técnicas de control como la optimización del lazo de control CALDWELL en el dominio Z. Las pruebas realizadas muestran que el regulador tarda 17 segundos en estabilizarse, aunque las variaciones de voltaje se mantienen dentro de un rango de $\pm 10\%$ respecto al valor nominal del generador.

Aliaga (2010) en el trabajo “Análisis del defecto de la pérdida de excitación en sistemas de generación de energía eléctrica”, analiza el efecto de la pérdida de campo en máquinas síncronas para evaluar el rendimiento de los sistemas de protección ante la pérdida de excitación en la generación de energía eléctrica. Se modeló tanto la máquina síncrona como el sistema de excitación, encontrándose que las pérdidas de excitación suelen ser menores que los niveles de sobrecorriente y caída de voltaje después de un cortocircuito trifásico cercano a la generación. En casos severos, esta pérdida puede causar desincronización del generador debido a una caída prolongada de la tensión aplicada al inductor o a una desconexión repentina del sistema.

Cusi & Cusi (2016), en el trabajo de investigación “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” han diseñado e implementado un controlador difuso con el objetivo de regular el flujo de fluido en un tanque principal,



utilizando LABVIEW y un sistema SCADA para la supervisión y recopilación de datos. Los resultados fueron muy alentadores, ya que el sistema logró mejorar notablemente el proceso de llenado y medición del nivel de líquido, reduciendo el error de un 5% a un 1% y alcanzando un tiempo de respuesta de solo 0.5 segundos, lo que también incrementó significativamente la seguridad operativa.

Mayta Mamani & Tintaya Gutierrez (2018), en 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” comparan dos enfoques de control para niveles de agua: un controlador PID convencional y un controlador PID difuso, ambos diseñados en plataformas de automatización. El controlador PID convencional se desarrolló en MATLAB, mientras que el PID difuso se implementó en LabVIEW. Los resultados mostraron que el controlador PID difuso ofreció un mejor desempeño en términos de tiempo de respuesta, mejorando la estabilización del sistema en 10 segundos, además de proporcionar una mayor estabilidad en comparación con el controlador PID tradicional.

Quenta & Hanco (2019), en la tesis “Metodología para el diseño de un controlador difuso aplicado a hornos industriales de petróleo” se centraron en desarrollar una metodología para diseñar un controlador difuso aplicado a hornos industriales de petróleo, con el propósito de controlar la corriente, la temperatura y las emisiones contaminantes. Utilizando los sistemas de control difuso Mamdani y Tsukamoto, implementados mediante herramientas de diseño difuso y LabVIEW, se logró una reducción considerable en las emisiones de CO y CH₄. Los autores concluyeron que el uso de un control difuso ofrece una mayor confiabilidad y estabilidad en comparación con los controles tradicionales, al manejar de manera más efectiva las variables del sistema.



2.2. MARCO TEÓRICO.

2.2.1. Generador síncrono.

El generador síncrono, también conocido como alternador, es una máquina eléctrica rotativa que convierte energía mecánica en energía eléctrica. Su operación se basa en el principio de inducción electromagnética, en el cual un electroimán gira en relación con una espira fija. La excitación del generador puede lograrse de dos maneras distintas. Una opción es conectar imanes permanentes al rotor, lo que genera un campo magnético giratorio de magnitud constante. Los generadores que emplean este tipo de excitación son conocidos como generadores de imanes permanentes. Otra opción es lograr la excitación mediante la conexión de un generador de corriente continua (CC) acoplado en el mismo eje que el alternador, o mediante una fuente de CC externa, cuya corriente pasa a través de los devanados del rotor utilizando anillos colectores y escobillas. Cada vez que los polos N y S del rotor pasan por los devanados del estator, se induce una corriente alterna que se dirige hacia los terminales del generador. En la mayoría de los generadores trifásicos, estos terminales son R, S y T (Bobes, 2016).

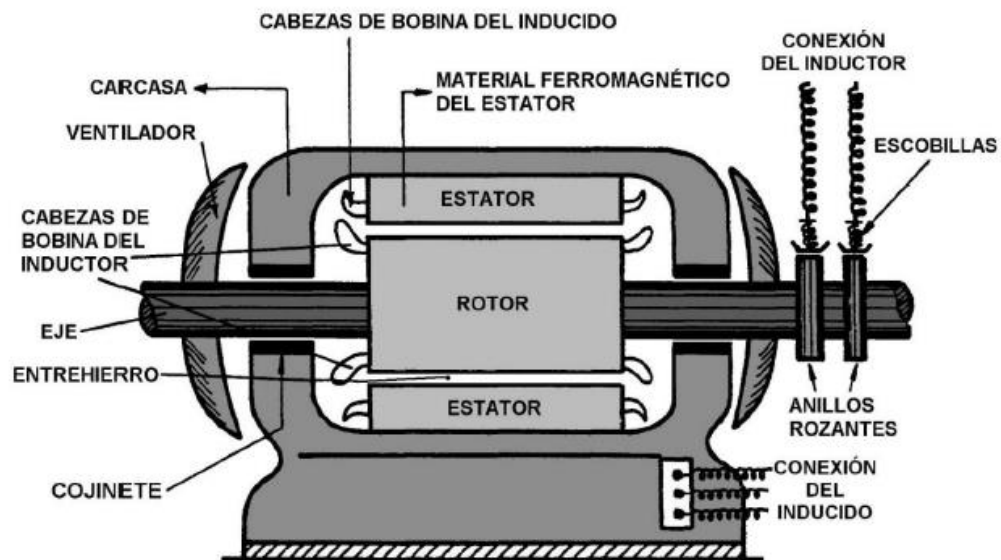
La velocidad de rotación del generador corresponde a la velocidad del campo magnético, es decir, la frecuencia angular mecánica coincide con la frecuencia eléctrica, una condición conocida como sincronismo (Rodríguez, 2018).

El generador síncrono consta de dos partes principales: el rotor y el estator (Kundur, 2018). El rotor, que puede ser un imán permanente o un electroimán, gira dentro del estator, que contiene los devanados trifásicos. Este movimiento

genera un campo magnético rotatorio que induce una tensión alterna en los devanados del estator (Chapman, 2012).

Figura 1

Constitución general de una máquina síncrona de rotor cilíndrico



Nota. Tomado de Rodríguez P. (2015).

A. Características del Estator.

El estator es una parte esencial de las máquinas eléctricas rotativas, como los generadores síncronos. Está compuesto por un núcleo magnético, generalmente hecho de láminas de acero al silicio, que se apilan y aíslan para reducir las pérdidas por corrientes parásitas (Chapman, 2012). Las ranuras en el núcleo permiten alojar los devanados trifásicos, que están dispuestos de manera uniforme para generar voltajes alternos desfasados 120 grados entre sí (Fitzgerald et al., 2013).

Los devanados están fabricados con conductores de cobre o aluminio, materiales seleccionados por su alta conductividad eléctrica. Estos conductores están recubiertos con aislantes para prevenir

cortocircuitos y soportar las tensiones eléctricas generadas durante la operación del generador (Krause et al., 2013).

El estator debe diseñarse tomando en cuenta la disipación de calor que se genera en su operación. Para ello, se implementan sistemas de enfriamiento que pueden incluir ventilación a través de conductos o el uso de refrigerantes líquidos, lo que ayuda a mantener la temperatura operativa dentro de límites seguros. La relación entre el número de polos y la frecuencia de la corriente alterna generada es otra consideración clave en el diseño del estator, ya que determina la velocidad de rotación del rotor para una frecuencia específica (Kundur, 2018).

Figura 2

Estator de un alternador trifásico



Nota. Tomado de Rodríguez P. (2015).

Las principales características del estator son:



Composición y Estructura:

Núcleo Magnético: El estator está compuesto por un núcleo magnético que generalmente se fabrica a partir de láminas de acero al silicio laminado, apiladas y unidas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas (Foucault). Estas láminas están recubiertas con un aislante para minimizar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas (Chapman, 2012).

Ranuras: El núcleo del estator tiene ranuras en las que se alojan los devanados del estator. Estas ranuras están dispuestas de manera uniforme alrededor de la circunferencia del núcleo (Fitzgerald et al., 2013).

Devanados del Estator:

Devanados Trifásicos: El estator contiene devanados trifásicos que están distribuidos uniformemente en las ranuras del núcleo. Estos devanados están conectados de manera que se generan tres voltajes alternos desfasados 120 grados entre sí (Kundur, 2018).

Conductor: Los devanados están hechos de conductores de cobre o aluminio, que están aislados para prevenir cortocircuitos y pérdidas eléctricas. El cobre es preferido por su alta conductividad eléctrica (Krause et al., 2013).

Aislantes:

Aislamiento Eléctrico: Los devanados del estator están recubiertos con materiales aislantes de alta calidad para evitar cortocircuitos y garantizar la seguridad operativa del generador. El aislamiento también



sirve en las máquinas eléctricas para soportar las tensiones eléctricas que se generan durante la operación de ellas (Kundur, 2018).

Clasificación de Aislamiento: Respecto a la clasificación del aislamiento, este se clasifica según la resistencia que tienen respecto a la temperatura de operación (Fitzgerald et al., 2013).

Función y Operación:

Generación de Campo Magnético: Cuando el generador funciona específicamente el rotor al girar, produce un campo magnético variable, este campo corta los devanados del estator, con lo que induce una tensión alterna, esta tensión es la que producen los generadores síncronos (Chapman, 2012).

Conexión a la Carga: Respecto a la conexión, los devanados del estator se conectan a cargas externas a través de terminales, los cuales están en dispositivo adecuado para poder realizar conexiones adecuadas. En generadores síncronos trifásicos, estos terminales se etiquetan comúnmente como R, S y T o U, V, W (Kundur, 2018).

Diseño Térmico:

Sistema de Enfriamiento: El sistema de enfriamiento disipa el calor que genera el estator durante su operación, es importante que el generador este provisto de un sistema de enfriamiento eficiente. Los estatores suelen tener conductos de ventilación a través del núcleo para facilitar la circulación de aire o de un refrigerante líquido, reduciendo así la temperatura operativa y mejorando la eficiencia (Krause et al., 2013).



Consideraciones de Diseño:

Número de Polos: El número de polos en el estator está relacionado con la frecuencia de la corriente alterna generada y la velocidad de rotación del rotor. A mayor número de polos, menor será la velocidad necesaria para generar una frecuencia específica (Kundur, 2018).

Relación Diámetro-Longitud: La relación entre el diámetro y la longitud axial del estator influye en las características electromagnéticas y térmicas del generador (Fitzgerald et al., 2013).

B. Características del rotor.

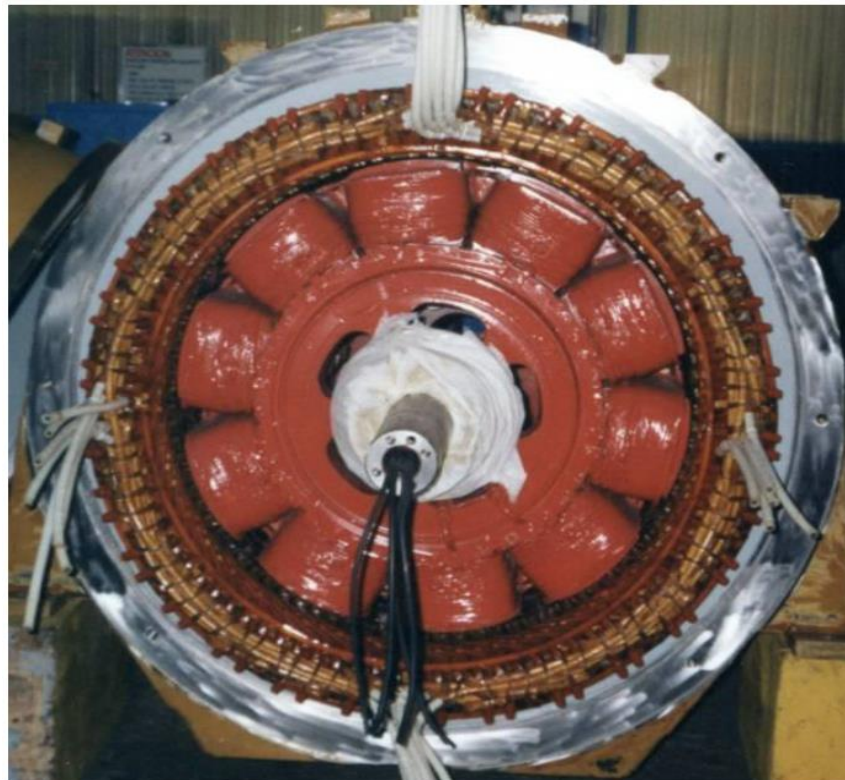
El rotor de un generador síncrono actúa como un electroimán que produce un campo magnético giratorio, el cual induce voltaje en los devanados del estator del generador (Chapman, 2012). Para crear este campo magnético, se aplica corriente continua a las bobinas del rotor, conocidas como bobinas de campo, y esta corriente se suministra a través de anillos colectores y escobillas o mediante una conexión directa. El eje del generador está conectado a diodos e interruptores para gestionar el flujo de corriente (Noboa & Quintuña, 2015). Los polos del rotor pueden ser de tipo saliente o cilíndrico. Los generadores con polos salientes, que operan a bajas velocidades, son comúnmente utilizados en centrales hidroeléctricas, mientras que los generadores con polos cilíndricos, que operan a velocidades superiores a 1800 rpm, se emplean principalmente en centrales térmicas (Hernandez et al., 2009).

Bobinas de Campo:

Las bobinas de campo son devanados instalados en el rotor, y se les aplica corriente continua (DC) para generar el campo magnético. Estas bobinas están hechas generalmente de cobre debido a su alta conductividad eléctrica y resistencia mecánica.

Figura 3

Máquina síncrona de polos salientes.



Nota. Tomado de Rodríguez P. (2015).

Excitación del Rotor: La corriente continua necesaria para las bobinas de campo se suministra mediante dos métodos principales: a través de anillos rozantes y escobillas, o mediante un sistema sin escobillas que utiliza diodos rectificadores montados en el mismo eje del generador.



Enfriamiento del Rotor:

Dado que el rotor está en movimiento continuo y genera calor debido a las pérdidas eléctricas y mecánicas, es necesario un sistema de enfriamiento eficaz. Los generadores grandes suelen utilizar ventiladores montados en el rotor para forzar la circulación de aire, o en algunos casos, sistemas de enfriamiento por hidrógeno o agua.

Materiales de Construcción:

El rotor está construido generalmente de acero de alta calidad que es capaz de soportar las fuerzas centrífugas y las tensiones mecánicas generadas durante la operación a alta velocidad. El núcleo del rotor está laminado para reducir las pérdidas por corrientes parásitas (Foucault).

Conexiones Eléctricas:

Las conexiones eléctricas del rotor, como los anillos rozantes y escobillas, permiten la entrada de corriente continua desde una fuente externa a las bobinas de campo. En los sistemas sin escobillas, los diodos rectificadores convierten la corriente alterna en corriente continua directamente en el rotor.

Relación Polos-Velocidad:

La cantidad de polos en el rotor está directamente relacionada con la velocidad de rotación del generador y la frecuencia de la corriente alterna generada. Un mayor número de polos permite una menor velocidad de rotación para alcanzar la misma frecuencia de salida.

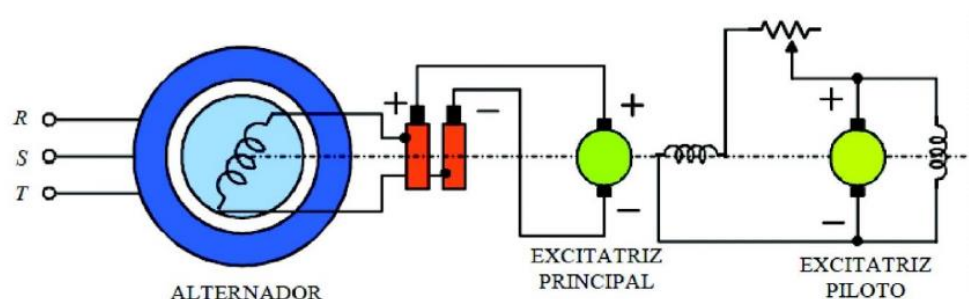
C. Sistema de Excitación de Campo.

Para suministrar corriente directa (CD) al devanado de campo del rotor, se emplean dos excitadores: un excitador principal y un excitador piloto. El excitador principal proporciona la corriente de excitación necesaria para la armadura del generador síncrono, mientras que el excitador piloto controla la corriente de salida del excitador principal, lo cual puede realizarse de manera manual o automática a través de señales de control (Wildi, 2007). Esta corriente se suministra de dos maneras diferentes:

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

Figura 4

Excitación mediante excitatrices de corriente continua



Nota. Tomado de Rodríguez P. (2015).

D. Velocidad de Sincronismo.

La velocidad de sincronismo es un concepto fundamental en el campo de las máquinas eléctricas, particularmente en los motores eléctricos de corriente alterna. Se define como la velocidad a la cual el



campo magnético generado por el estator de una máquina síncrona o de inducción gira. Esta velocidad está relacionada directamente con la frecuencia de la corriente alterna y el número de polos de la máquina, y su comprensión es clave para el diseño, operación y control de motores en diversas aplicaciones industriales y de generación de energía.

Definición y relación con la frecuencia

La velocidad de sincronismo, denotada comúnmente como N_s , está dada por la siguiente ecuación:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (1)$$

Donde:

- N_s es la velocidad de sincronismo en revoluciones por minuto (RPM).
- f es la *frecuencia* de la fuente de alimentación en hertzios (Hz).
- P es el número de polos de la máquina.

Este vínculo muestra que la velocidad de sincronismo es directamente proporcional a la frecuencia de la corriente alterna y es inversamente proporcional al número de polos de la máquina (Chapman, 2012).

Importancia en los motores eléctricos

En los motores síncronos, la velocidad del rotor es igual a la velocidad de sincronismo, lo que implica que el motor gira a una velocidad constante bajo condiciones normales de operación. Esto es especialmente



útil en aplicaciones que requieren control de velocidad preciso y estable, como generadores eléctricos y sistemas de transmisión de energía. En contraste, los motores de inducción operan a una velocidad menor que la de sincronismo debido a la presencia de deslizamiento, que es necesario para que se genere torque en el rotor (Fitzgerald et al., 2013).

Velocidad de sincronismo en motores sincrónicos y de inducción.

Mientras que en un motor sincrónico el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético del estator, en los motores de inducción existe una diferencia entre ambas velocidades. Esta diferencia, conocida como deslizamiento, es un parámetro crucial en el análisis del rendimiento del motor de inducción. El deslizamiento se expresa como una fracción de la velocidad de sincronismo:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2)$$

Donde:

- S es el deslizamiento.
- N_r es la velocidad del rotor en RPM.

El deslizamiento es un parámetro importante para indicar la eficiencia en motores de inducción, por ejemplo un deslizamiento cercano a cero indica que el motor de inducción es altamente eficiente (Krause et al., 2013).

El análisis del comportamiento y la regulación de la velocidad de sincronismo es importante en las aplicaciones tecnológicas, especialmente



en sistemas de generación de energía eléctrica. En este tipo de sistemas es común utilizar generadores sincrónicos, para la generación de energía eléctrica, los cuales deben funcionar a la velocidad de sincronismo, para poder permitir que la electricidad sea suministrada a la red con una frecuencia constante, de acuerdo a las normativas locales, por lo que se convierte en un factor crucial para la estabilidad de los sistemas eléctricos. También, en la utilización de motores eléctricos de inducción para aplicaciones industriales, es necesario ajustar la frecuencia de la fuente de alimentación para poder controlar la velocidad del motor, por lo que se hace muy importante comprender la relación que existe entre la frecuencia y la velocidad de sincronismo (Fraile Mora, 2001).

E. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono.

El circuito equivalente es una representación simplificada de los elementos eléctricos que representan el comportamiento de la máquina eléctrica en especial las síncronas, el cual no permite analizarlas bajo diversas condiciones de carga. Este circuito equivalente permite analizar la relación entre el voltaje suministrado, la corriente, la resistencia del estator, la reactancia de sincronismo y la fuerza electromotriz inducida.

El circuito equivalente de un generador síncrono está compuesto por:

- **Voltaje inducido (E_f):** Es el voltaje generado internamente por el campo generado en la rotación del rotor y la interacción con el estator. Por lo que se convierte en la fuerza electromotriz (fem) generada en los devanados del estator. El voltaje inducido depende del flujo magnético y la velocidad de sincronismo del rotor (Chapman, 2012).



- **Resistencia del estator (R_s):** Representa las pérdidas en el cobre de los devanados del estator debido a la resistencia inherente de los conductores. Aunque suele ser pequeña, tiene un impacto en la eficiencia global de la máquina (Fitzgerald et al., 2013).
- **Reactancia sincrónica (X_s):** Es la suma de la reactancia de dispersión y la reactancia de magnetización del generador. Este parámetro es fundamental, ya que define el comportamiento del generador frente a cargas inductivas y capacitivas (Krause et al., 2013).
- **Voltaje en los terminales (V_t):** Es el voltaje medido en los terminales de salida del generador, y depende de la carga conectada al generador, así como de las características internas de la máquina. La diferencia entre el voltaje inducido y el voltaje en los terminales está relacionada con la caída de tensión interna debida a la impedancia del estator (Fraile Mora, 2001).

El modelo se representa matemáticamente como:

$$V_t = E_f - (I \cdot (R_s + jX_s)) \quad (3)$$

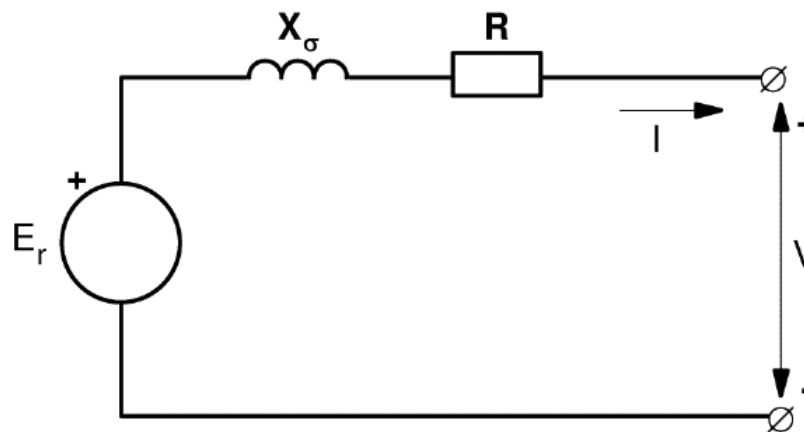
Donde:

- V_t es el voltaje en los terminales del generador.
- E_f es la fuerza electromotriz inducida.
- I es la corriente por fase.
- R_s es la resistencia del estator.
- X_s es la reactancia sincrónica.
- j es la unidad imaginaria, representando la naturaleza inductiva de X_s .

Este circuito es fundamental para el análisis de la operación de un generador síncrono, ya que permite predecir cómo varían los voltajes y las corrientes bajo diferentes condiciones de carga. Además, permite evaluar la regulación de voltaje, que es la variación del voltaje terminal en función de la carga, y también la capacidad del generador para suministrar potencia reactiva (Chapman, 2012).

Figura 5

Excitación mediante excitatrices de corriente continua



Nota. Tomado de Rodríguez P. (2015).

F. Circuito Trifásico Equivalente de un Generador Síncrono

El circuito trifásico equivalente de un generador síncrono es una representación simplificada que permite analizar el comportamiento de la máquina en sistemas eléctricos de corriente alterna trifásicos. Los generadores síncronos trifásicos se utilizan ampliamente en la generación de energía eléctrica y son fundamentales en la distribución de electricidad en grandes redes. La representación del circuito trifásico equivalente proporciona un modelo simplificado de los parámetros eléctricos que

influyen en el rendimiento y la operación del generador bajo diversas condiciones de carga.

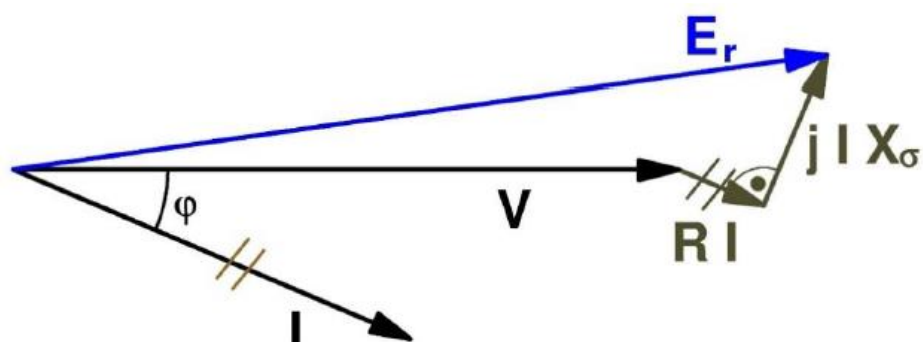
En un sistema trifásico, el circuito equivalente para cada fase es idéntico y se representa de manera independiente, ya que los generadores trifásicos funcionan con fases balanceadas.

Análisis de las condiciones de carga

El comportamiento del generador síncrono varía dependiendo de la carga conectada. Bajo una carga inductiva, la corriente se retrasa respecto al voltaje terminal, lo que provoca una caída de tensión mayor en la reactancia sincrónica. En cargas capacitivas, la corriente adelanta al voltaje, lo que puede llevar a una sobreexcitación y aumentar el voltaje inducido. El análisis de estas condiciones es crucial para el diseño y la operación de generadores en redes eléctricas (Krause et al., 2013).

Figura 6

Diagrama fasorial de una fase del inducido de un alternador síncrono en carga.



Nota. Tomado de Rodríguez P. (2015).



Circuito trifásico balanceado

El circuito trifásico equivalente de un generador síncrono considera que las tres fases están balanceadas, lo que significa que las corrientes en cada fase tienen la misma magnitud y están desfasadas 120° eléctricamente entre sí. Esto simplifica el análisis y permite utilizar modelos monofásicos para cada una de las fases. En la práctica, se suelen utilizar transformadores de componentes simétricos para convertir un sistema trifásico en un sistema equivalente monofásico para el análisis (Fitzgerald et al., 2013).

Importancia del circuito equivalente

El **circuito trifásico equivalente** de un generador síncrono es crucial para el análisis de la estabilidad y la regulación de voltaje en sistemas de potencia. La capacidad de un generador síncrono para operar eficientemente bajo diferentes condiciones de carga depende de la correcta modelación de sus parámetros internos. Además, este circuito es utilizado en el diseño de sistemas de control y protección para asegurar la operación segura del generador dentro de sus límites operativos (Fraile Mora, 2001).

G. Conexión de un Generador Síncrono

El conexionado de un generador síncrono es crucial para su integración eficiente en una red eléctrica y para garantizar su correcto funcionamiento. Los generadores síncronos se utilizan en la mayoría de las plantas de generación de energía eléctrica, ya sea en centrales hidroeléctricas, térmicas o nucleares, y su conexión a la red implica diversas configuraciones según el tipo de carga, la potencia generada, y los requisitos del sistema de potencia.



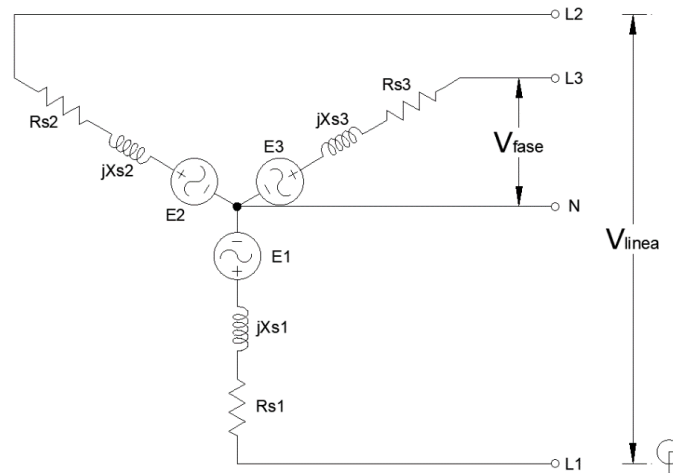
Configuraciones de conexión

El conexionado de un generador síncrono suele estar en una de las siguientes configuraciones principales:

- 1. Conexión en estrella (Y):** En este tipo de conexión, un extremo de cada devanado del estator está conectado a un punto común llamado neutro. Los otros extremos de los devanados están conectados a los terminales de salida del generador. La conexión en estrella es ampliamente utilizada para suministrar corriente a sistemas trifásicos, ya que permite un manejo más eficiente de la energía a largas distancias y facilita el control del voltaje de fase y línea.
 - **Ventajas:** Ofrece una salida de alto voltaje en los terminales del generador con menor corriente, lo que reduce las pérdidas en las líneas de transmisión (Chapman, 2012).
 - **Aplicaciones:** Generadores conectados a redes de transmisión de alto voltaje y sistemas de distribución trifásica.
- 2. Conexión en triángulo (Δ):** En esta configuración, los devanados del estator están conectados de manera que forman un circuito cerrado en forma de triángulo. Cada unión de dos devanados se conecta a un terminal de salida del generador. La conexión en triángulo permite manejar mayores corrientes, pero a un voltaje de línea más bajo.

Figura 7.

Conexión del generador en estrella.

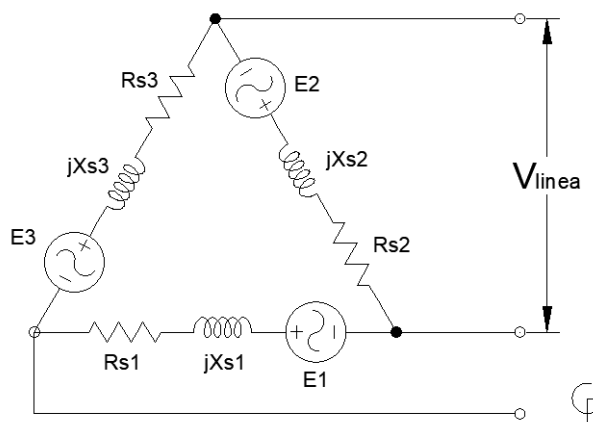


Nota. Tomado de Pilco Quispe & Gemio Yujra (2022)

- Ventajas: Reduce la tensión en cada devanado, permitiendo que el generador maneje corrientes más altas sin sobrecargar los devanados (Krause et al., 2013).
- Aplicaciones: Sistemas industriales que requieren alta potencia y cortas distancias de transmisión.

Figura 8.

Conexión del generador en delta.



Nota. Tomado de Pilco Quispe & Gemio Yujra (2022)



Proceso de conexión a la red

Antes de conectar un generador síncrono a la red, se deben cumplir ciertas condiciones para asegurar que la máquina se sincronice correctamente con la red eléctrica. Este proceso se conoce como sincronización y requiere cumplir las siguientes condiciones:

- 1. Igualdad de voltaje:** El voltaje del generador debe ser igual al voltaje de la red a la que se conectará. Un voltaje desigual puede causar picos de corriente que pueden dañar el generador o los equipos de la red.
- 2. Igualdad de frecuencia:** La frecuencia del generador debe coincidir con la frecuencia de la red (generalmente 50 Hz o 60 Hz). Un desajuste en la frecuencia puede causar variaciones en la velocidad del rotor y llevar a una desconexión forzada o a daños mecánicos (Fitzgerald et al., 2013).
- 3. Igualdad de fase:** Las fases del generador deben estar alineadas con las fases de la red. Esto se verifica mediante un sincronoscopio o luces de sincronización, y garantiza que las tres fases del generador se conecten correctamente a las tres fases de la red.

Protección y control en la conexión

El conexionado de un generador síncrono no solo implica la sincronización, sino también la implementación de sistemas de protección para asegurar que el generador opere dentro de límites seguros. Algunas de las protecciones más comunes incluyen:



1. **Protección de sobrevoltaje y subvoltaje:** Para evitar daños en los devanados del estator y los equipos de la red.
2. **Protección de sobrecorriente:** Para proteger el generador contra corrientes excesivas que puedan resultar de cortocircuitos o sobrecargas.
3. **Relés de sincronización:** Para automatizar el proceso de sincronización y desconexión en caso de fallas.

Además, el generador cuenta con sistemas de control de excitación que permiten regular el voltaje de salida ajustando la corriente de excitación del rotor, lo que a su vez controla la magnitud del campo magnético generado (Fraile Mora, 2001).

H. Conexión y suministro de potencia reactiva

El generador síncrono tiene la capacidad de **suministrar potencia reactiva** a la red, lo que es esencial para mantener la estabilidad del sistema de potencia. Dependiendo del estado de excitación del generador, este puede operar en modo de subexcitación (consumiendo potencia reactiva) o en modo de sobreexcitación (suminiendo potencia reactiva). La capacidad de controlar la potencia reactiva es crucial para el mantenimiento del voltaje en los sistemas eléctricos y la estabilidad de la red.

- **Sobreexcitación:** El generador suministra potencia reactiva a la red, lo que aumenta el voltaje en los puntos de conexión.



- **Subexcitación:** El **generador** consume potencia reactiva de la red, lo que puede reducir el voltaje si no se compensa adecuadamente (Chapman, 2012).

I. Curvas V de un Generador Síncrono

Las curvas V son una representación gráfica que muestra la relación entre la corriente de excitación del rotor y la corriente de armadura (o estator) en un generador o un motor síncrono, bajo condiciones de carga constante. Estas curvas son fundamentales para comprender cómo los generadores y motores síncronos responden a diferentes niveles de excitación en términos de la corriente que circula por sus devanados.

Definición y concepto de las curvas V

Una curva V es una representación gráfica que muestra la relación entre la corriente de armadura (I_a) y la corriente de excitación (I_f) del rotor en un generador o motor síncrono, manteniendo constantes tanto la carga como la tensión de línea. La gráfica recibe el nombre de "curva V" debido a su forma característica, en la cual la corriente de armadura disminuye inicialmente a medida que la excitación aumenta, alcanza un punto mínimo y luego vuelve a incrementarse conforme la corriente de excitación continúa aumentando.

- En la región de subexcitación (excitación insuficiente), el generador consume potencia reactiva de la red, aumenta la corriente de armadura.



- En la región de sobreexcitación (excitación excesiva), el generador suministra potencia reactiva a la red, aumenta la corriente de armadura.
- El punto mínimo de la curva V corresponde al punto en el cual el generador está funcionando en condiciones de excitación normal, en esta condición el generador no consume ni suministra potencia reactiva a la red (Fitzgerald et al., 2013).

Funcionamiento en modo generador y motor

En un generador síncrono, las curvas V permiten analizar el comportamiento de la máquina al modificar la corriente de excitación del rotor. Cuando el generador opera en sobreexcitación, entrega potencia reactiva a la red, mientras que en condiciones de subexcitación, absorbe potencia reactiva de la misma. Este fenómeno es esencial para el control del voltaje en sistemas de potencia y para garantizar la estabilidad de la red eléctrica (Chapman, 2012).

En un motor síncrono, las curvas V también son útiles para analizar cómo cambia la corriente de armadura en función de la excitación del rotor. Esto es importante porque el motor puede operar con factor de potencia igual a la unidad, en este caso la corriente de armadura es mínima, también puede funcionar con factor de potencia inductivo (subexcitado) o factor de potencia capacitivo (sobreexcitado). Esta característica permite controlar el factor de potencia en sistemas industriales (Krause et al., 2013).

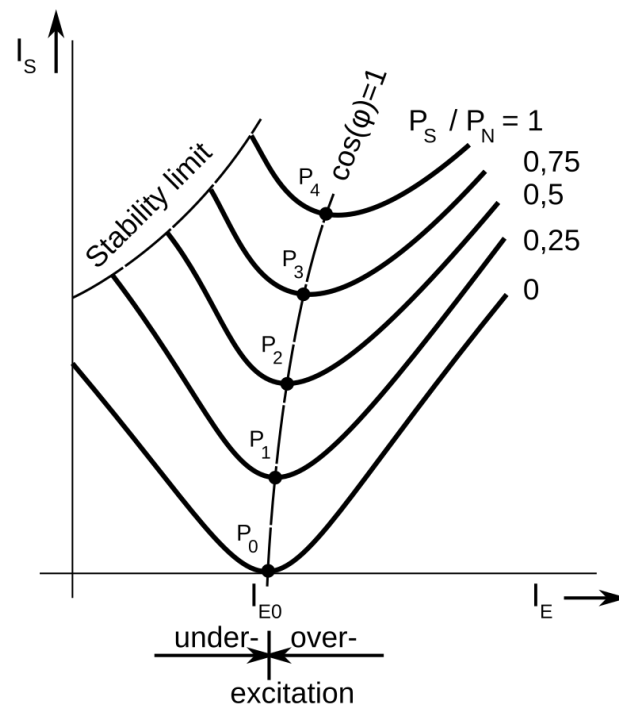
Interpretación de las curvas V

Región de subexcitación: Cuando la corriente de excitación es baja, el generador opera en condiciones de subexcitación, lo que provoca un aumento de la corriente de armadura debido a la necesidad de compensar la falta de potencia reactiva. Esto ocurre cuando la máquina está absorbiendo potencia reactiva de la red para mantener el voltaje terminal.

Región de excitación normal: En esta región, el generador funciona con el nivel adecuado de excitación, y la corriente de armadura es mínima. El generador no absorbe ni suministra potencia reactiva a la red, lo que suele coincidir con un factor de potencia unitario (Fraile Mora, 2001).

Figura 9

Curvas V de un generador síncrono.



Nota. Tomado de (Wikipedia contributors, n.d.)



Región de sobreexcitación: Si se incrementa la corriente de excitación más allá del nivel óptimo, el generador entra en sobreexcitación. En esta condición, la máquina suministra potencia reactiva a la red, lo que provoca un aumento en la corriente de armadura.

Importancia de las curvas V en el control de potencia reactiva

El control de la potencia reactiva es clave para mantener el voltaje estable en los sistemas eléctricos. Las curvas V ayudan a ajustar la corriente de excitación del rotor para que la máquina entregue o absorba potencia reactiva según sea necesario. Este ajuste es fundamental, ya que las variaciones en el voltaje pueden afectar la estabilidad del sistema eléctrico.

En aplicaciones industriales, la utilización de un motor síncrono para controlar la potencia reactiva puede mejorar la eficiencia, al reducir las pérdidas en las líneas de transmisión y en los sistemas eléctricos (Fitzgerald et al., 2013).

J. Diagrama Fasorial de un Generador Síncrono.

Los diagramas de fasores son fundamentales para analizar sistemas eléctricos de corriente alterna, especialmente en máquinas síncronas y de inducción. Estos diagramas representan señales sinusoidales mediante su magnitud y fase, lo que facilita entender las relaciones entre el voltaje inducido, la corriente y el voltaje terminal en distintas condiciones de carga.



Un fasor es un vector que gira en el plano complejo. Representa una señal sinusoidal de una frecuencia específica. El fasor se define como:

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

donde V_m es la magnitud máxima, ω es la frecuencia angular, y θ es el ángulo de fase.

En notación de fasores, esta expresión puede simplificarse a:

$$V = V_m \angle \theta \quad (5)$$

Un fasor representa tanto la amplitud como la fase de la señal sinusoidal (Chapman, 2012).

En generadores síncronos, los diagramas de fasores se utilizan para estudiar el comportamiento eléctrico de la máquina bajo distintas condiciones de carga. En estos diagramas, es común representar:

- El **voltaje inducido** en la máquina (E_f), que es el resultado de la interacción entre el rotor y el campo magnético.
- La **corriente de carga** (I), que varía **según** la carga conectada al generador.
- El **voltaje en los terminales** (V_t), que es el **voltaje** que se suministra a la carga.

El fasor de la corriente (I) se retrasa o adelanta respecto al fasor del voltaje (V_t) dependiendo del tipo de carga: inductiva, capacitiva o resistiva. Además, el voltaje inducido (E_f) está relacionado con el voltaje terminal y las caídas de voltaje debidas a la impedancia del estator ($R_s + jX_s$) (Krause et al., 2013).



Un diagrama de fasores típico de un generador sincrónico incluye los siguientes elementos:

- V_t : el voltaje en los terminales, que suele ser la referencia.
- I : la corriente de carga, que puede adelantarse o retrasarse según la naturaleza de la carga (inductiva o capacitiva).
- E_f : el voltaje inducido, que está a una distancia de $I \cdot Z_s$ del voltaje en los terminales.

El diagrama de fasores permite visualizar el ángulo de desfase entre el voltaje inducido (E_f) y el voltaje en los terminales (V_t), así como la caída de tensión en la reactancia sincrónica (X_s) y la resistencia del estator (R_s). Estos elementos son clave para determinar la operación eficiente de los generadores síncronos bajo diversas condiciones de carga (Fitzgerald et al., 2013).

Análisis bajo diferentes condiciones de carga

Los diagramas de fasores son especialmente útiles para analizar el comportamiento de un generador síncrono bajo condiciones de carga inductiva, capacitiva y resistiva. En una carga puramente resistiva, la corriente está en fase con el voltaje terminal. Sin embargo, en una carga inductiva, la corriente se retrasa con respecto al voltaje terminal, lo que aumenta la caída de tensión en la reactancia sincrónica (X_s). En una carga capacitiva, ocurre lo contrario, y la corriente adelanta al voltaje terminal, lo que puede resultar en una sobreexcitación de la máquina y una elevación del voltaje inducido (E_f) (Fraile Mora, 2001).

1. Diagrama Fasorial con Carga Resistiva.

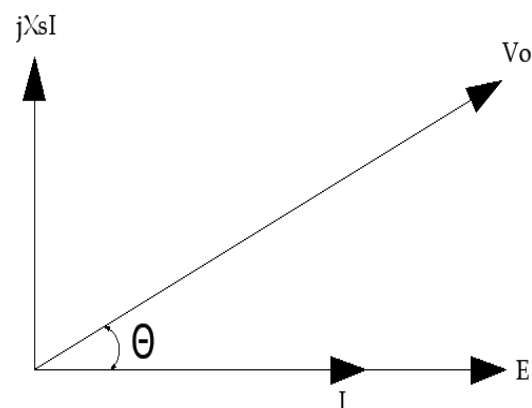
Cuando un generador síncrono alimenta una carga puramente resistiva, la corriente está en fase con el voltaje terminal (V_t). Esto significa que el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente es cero ($\theta = 0^\circ$)

- **Voltaje inducido (E_f):** El voltaje generado internamente en el generador, que depende de la corriente de excitación.
- **Voltaje terminal (V_t):** Es el voltaje medido en los terminales del generador y está en fase con la corriente de carga.
- **Corriente de armadura (I):** La corriente de armadura también está en fase con el voltaje terminal en el caso de una carga resistiva.

Diagrama Fasorial: El voltaje inducido (E_f) es mayor que el voltaje terminal (V_t) debido a la caída de tensión en la resistencia (R_s) y reactancia (X_s) del estator. En este caso, el fasor de la corriente I está alineado con el fasor del voltaje V_t (Chapman, 2012).

Figura 10

Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga resistiva.



Nota. Tomado de Pilco Quispe & Gemio Yujra (2022)

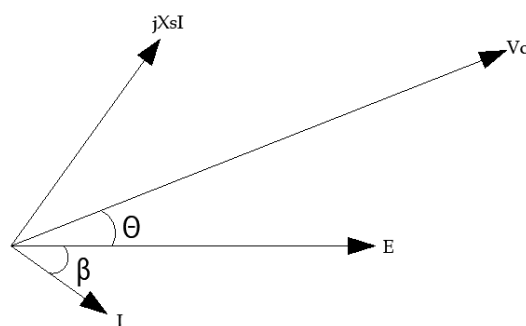
2. Diagrama Fasorial con Carga Inductiva

En el caso de una carga inductiva, la corriente se retrasa con respecto al voltaje terminal (V_t). Esto es característico de las cargas como motores de inducción y transformadores, que tienen una alta componente inductiva. El ángulo de desfase es positivo ($\theta > 0^\circ$).

- **Voltaje inducido (E_f):** Debe ser mayor para compensar el retraso de la corriente y las caídas de tensión en las reactancias.
- **Corriente de armadura (I):** La corriente se retrasa con respecto al voltaje terminal.
- **Caída de tensión reactiva ($I X_s$):** La reactancia del estator produce una caída de tensión inductiva, lo que provoca que el voltaje inducido sea mayor que el voltaje terminal.

Figura 11.

Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga inductiva.



Nota. Tomado de Pilco Quispe & Gemio Yujra (2022)

Diagrama Fasorial: El fasor de la corriente I se retrasa con respecto al fasor del voltaje terminal V_t . El voltaje inducido. E_f debe ser mayor para

compensar las caídas de tensión en la reactancia sincrónica (X_s) del generador, provocando un mayor desfase entre E_f y V_t (Krause et al., 2013).

3. Diagrama Fasorial con Carga Capacitiva

En el caso de una carga capacitiva, la corriente adelanta al voltaje terminal. Este tipo de carga es típico en sistemas que utilizan compensadores estáticos o en algunos motores con condensadores. El ángulo de desfase es negativo ($\theta < 0^\circ$).

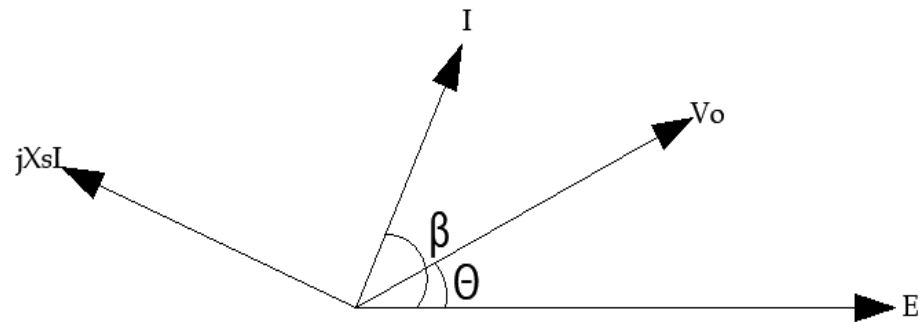
- **Voltaje inducido (E_f):** Es menor en comparación con las condiciones de carga inductiva, ya que el generador no necesita compensar caídas de tensión elevadas.
- **Corriente de armadura (I):** La corriente adelanta al voltaje terminal.
- **Caída de tensión reactiva ($I.X_s$):** En este caso, la caída de tensión en la reactancia sincrónica tiene una polaridad inversa debido a la naturaleza capacitiva de la carga.

Diagrama Fasorial: El fasor de la corriente I adelanta al fasor del voltaje terminal V_t . El voltaje inducido E_f es menor, ya que no se requiere compensar caídas significativas de tensión en la reactancia sincrónica (X_s). Esto ocurre cuando el generador está sobreexcitado y suministra potencia reactiva a la red (Fitzgerald et al., 2013).

El diagrama fasorial es importante en el análisis de máquinas síncronas porque permite visualizar y calcular las relaciones de fase entre el voltaje y la corriente bajo diferentes tipos de carga (Fraile Mora, 2001).

Figura 12

Diagrama fasorial de un generador síncrono con una carga inductiva.



Nota. Tomado de Pilco Quispe & Gemio Yujra (2022)

K. Potencia Suministrada por el Generador Síncrono

El generador síncrono es una máquina que convierte energía mecánica en energía eléctrica a través de la rotación del rotor en un campo magnético, induciendo así una corriente alterna en los devanados del estator. La potencia que un generador suministra a la red eléctrica se divide en potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q).

Potencia Activa y Potencia Reactiva

Potencia Activa (P): Es la potencia que el generador suministra a las cargas para realizar trabajo útil. Esta potencia es transferida a la red eléctrica a través de los tres devanados del estator. La potencia activa se mide en vatios (W) o megavatios (MW) y está relacionada directamente con el par mecánico aplicado al rotor.

La fórmula general para la potencia activa suministrada por un generador síncrono es:



$$P = \frac{3 \cdot V_t \cdot I_a \cdot \cos(\theta)}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Donde:

- V_t es el voltaje de línea en los terminales del generador.
- I_a es la corriente de armadura (o estator).
- $\cos(\theta)$ es el factor de potencia de la carga, que es el ángulo entre el voltaje y la corriente de la carga.
- 3 es un factor para tener en cuenta las tres fases del sistema trifásico.

En condiciones ideales, la potencia activa depende directamente del par aplicado al eje del rotor. Un aumento en el par incrementa la potencia activa generada, siempre y cuando el generador esté correctamente sincronizado con la frecuencia de la red (Chapman, 2012).

Potencia Reactiva (Q): La potencia reactiva está relacionada con la creación y el mantenimiento de los campos magnéticos necesarios para la transferencia de potencia en sistemas de corriente alterna. Esta potencia no realiza trabajo útil, pero es esencial para la estabilidad del sistema de potencia, ya que permite que los campos magnéticos en los motores y generadores se mantengan activos. Se mide en voltamperios reactivos (VAR) o megavoltios-amperios reactivos (MVAR).

La fórmula para la potencia reactiva es:

$$Q = \frac{3 \cdot V_t \cdot I_a \cdot \sin(\theta)}{\sqrt{3}} \quad (7)$$



Donde:

- V_t es el voltaje de línea en los terminales del generador.
- I_a es la corriente de armadura (o estator).
- $\sin(\theta)$ es el ángulo entre el voltaje y la corriente de la carga.

La potencia reactiva puede ser suministrada o absorbida por el generador síncrono dependiendo de si el generador está sobreexcitado o subexcitado. Un generador sobreexcitado suministra potencia reactiva, lo que ayuda a elevar el voltaje en la red, mientras que un generador subexcitado absorbe potencia reactiva, lo que puede provocar una reducción del voltaje en la red.

Potencia Aparente

La potencia aparente (S) es la combinación vectorial de la potencia activa y la potencia reactiva. Representa la cantidad total de potencia que el generador debe manejar, y se mide en voltios-amperios (VA) o megavoltios-amperios (MVA).

$$S = P + jQ \quad (8)$$

La magnitud de la potencia aparente está dada por:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

Donde:

- S es la potencia aparente.
- P es la potencia activa.
- Q es la potencia reactiva (Fitzgerald et al., 2013).



L. Control de la Potencia Suministrada

El control de la potencia activa y reactiva es esencial para garantizar el rendimiento eficiente del generador síncrono y la estabilidad del sistema de potencia al que está conectado. El control de la potencia activa se realiza ajustando el par aplicado al rotor (lo que está relacionado con la cantidad de energía mecánica proporcionada al generador), mientras que el control de la potencia reactiva se lleva a cabo ajustando la corriente de excitación del rotor.

Control de la potencia activa: Cuando se incrementa el par aplicado al rotor, la potencia activa entregada también aumenta. Este cambio se manifiesta en un incremento de la corriente de armadura, siempre y cuando el generador esté sincronizado adecuadamente con la frecuencia de la red (Fraile Mora, 2001).

Control de la potencia reactiva: La potencia reactiva se regula ajustando la excitación del generador. Al incrementar la excitación, el generador suministra más potencia reactiva a la red (sobree excitación), mientras que al reducirla, comienza a absorber potencia reactiva (subexcitación). Este control es esencial para mantener el voltaje en los terminales del generador y asegurar la estabilidad del sistema eléctrico.

M. Eficiencia y Pérdidas

En la operación de un generador síncrono, no toda la potencia mecánica aplicada se convierte en potencia eléctrica útil. Parte de la energía se pierde en forma de calor debido a las pérdidas en el cobre (pérdidas resistivas en los devanados del estator y rotor) y pérdidas en el



núcleo (debido a la histéresis y corrientes parásitas). Estas pérdidas deben tenerse en cuenta para determinar la eficiencia del generador.

La eficiencia del generador se define como la relación entre la potencia eléctrica útil suministrada (P_{salida}) y la potencia mecánica total aplicada al eje ($P_{entrada}$):

$$Eficiencia = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 \quad (10)$$

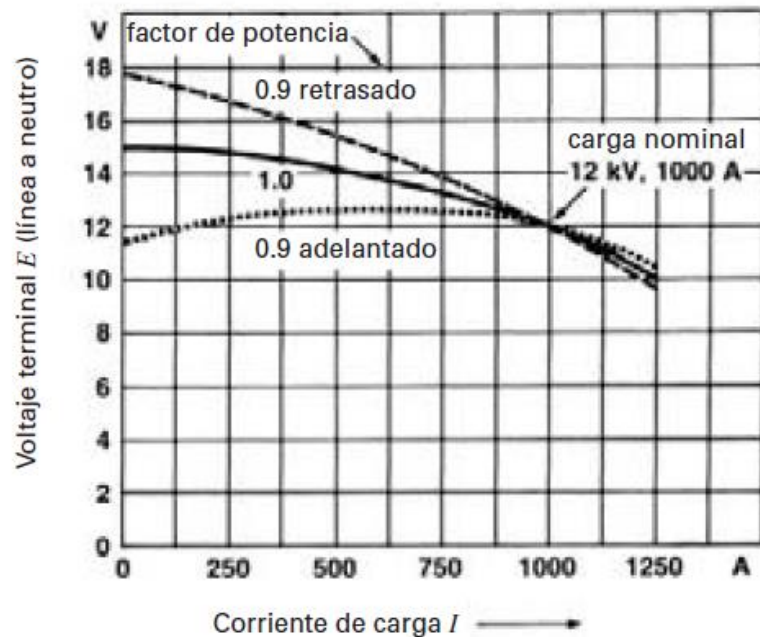
La potencia suministrada por un generador síncrono puede dividirse en potencia activa, que realiza trabajo útil, y potencia reactiva, que es esencial para la estabilidad del sistema de potencia. El control adecuado de ambas potencias es crucial para garantizar un suministro eficiente y estable de energía a las cargas conectadas, y se logra mediante el ajuste del par mecánico y la corriente de excitación del generador.

N. Curvas de Regulación

La curva de regulación de un generador síncrono es una representación gráfica que muestra cómo varía el voltaje terminal de un generador en función de la carga, manteniendo constante la excitación del rotor. Es fundamental para evaluar el comportamiento del generador bajo diferentes condiciones de carga, y es especialmente útil para comprender cómo se regula el voltaje en los sistemas eléctricos.

Figura 13.

Curva de regulación de un generador síncrono.



Nota. Tomado de (hapman (2012)

Definición de Regulación de Voltaje

La regulación de voltaje es una medida de la capacidad del generador para mantener un voltaje terminal constante bajo diferentes condiciones de carga. Cuando la carga conectada a un generador síncrono varía, también lo hace el voltaje en sus terminales. La regulación de voltaje se define como el porcentaje de aumento del voltaje cuando el generador pasa de operar a plena carga a carga nula (en vacío), con la misma corriente de excitación.

Matemáticamente, la **regulación de voltaje** se expresa como:

$$\text{Regulación de Voltaje} = \frac{V_{\text{sin carga}} - V_{\text{con carga}}}{V_{\text{plena carga}}} \times 100 \quad (11)$$



Donde:

- $V_{\text{sin carga}}$ es el voltaje terminal cuando no hay carga conectada al generador (en vacío).
- $V_{\text{con carga}}$ es el voltaje terminal cuando el generador está operando a plena carga.

La regulación de voltaje indica cómo el generador maneja las variaciones de carga y es un factor clave en su diseño y operación. Un valor alto de regulación de voltaje significa que el voltaje del generador varía significativamente con la carga, lo que no es deseable. Un valor bajo indica que el generador puede mantener un voltaje relativamente constante, lo cual es preferible en la mayoría de las aplicaciones (Chapman, 2012).

Comportamiento de la Curva de Regulación

La curva de regulación muestra cómo varía el voltaje terminal en función de la carga conectada al generador. Existen tres condiciones principales de carga que afectan la forma de la curva:

- **Carga Resistiva:** Bajo una carga puramente resistiva, el voltaje terminal disminuye de manera casi lineal a medida que se incrementa la carga. Esto se debe principalmente a la caída de voltaje en la resistencia del estator (R_s) y, en menor medida, en la reactancia sincrónica (X_s). En este caso, la regulación de voltaje es moderada.
- **Carga Inductiva:** En condiciones de carga inductiva, como ocurre en muchas aplicaciones industriales, el voltaje terminal tiende a



disminuir más rápidamente a medida que se incrementa la carga, debido a las grandes caídas de tensión en la reactancia sincrónica (X_s). La regulación de voltaje es mayor en cargas inductivas que en resistivas porque el generador debe compensar las caídas adicionales de tensión en la reactancia.

- **Carga Capacitiva:** Bajo una carga capacitiva, el voltaje terminal puede aumentar al incrementar la carga. Esto se debe a que la carga capacitiva suministra potencia reactiva al generador, reduciendo las caídas de tensión en la reactancia sincrónica (X_s). En este caso, la regulación de voltaje puede ser negativa, lo que indica un aumento del voltaje terminal bajo carga (Fitzgerald et al., 2013).

Factores que Afectan la Regulación de Voltaje

La regulación de voltaje depende de varios factores, entre los cuales destacan:

- **Impedancia del estator:** Tanto la resistencia (R_s) como la reactancia sincrónica (X_s) influyen en la caída de tensión a medida que se incrementa la corriente de carga. Una mayor reactancia sincrónica lleva a una mayor variación del voltaje terminal con la carga.
- **Nivel de excitación:** Si la corriente de excitación del rotor se mantiene constante, la capacidad del generador para suministrar potencia reactiva a la red varía con la carga. Un generador sobreexcitado tiende a aumentar su voltaje terminal bajo carga capacitiva, mientras que un generador subexcitado verá una disminución en el voltaje terminal bajo cargas inductivas.



- **Condiciones de carga:** La naturaleza de la carga (resistiva, inductiva o capacitiva) afecta directamente la regulación de voltaje, debido a la interacción entre la corriente de armadura y la Impedancia del estator (Krause et al., 2013).

Importancia de la Curva de Regulación

La curva de regulación de voltaje es una herramienta fundamental para diseñar y operar generadores síncronos en aplicaciones de generación de energía eléctrica. Una buena regulación de voltaje garantiza que el generador pueda mantener un voltaje estable.

Control de la Regulación

El control de la regulación de voltaje se logra ajustando la corriente de excitación del rotor. Aumentar la corriente de excitación (sobreexcitación) incrementa el voltaje inducido (E_f), permite trabajar con cargas inductivas. Reducir la corriente de excitación (subexcitación) disminuye el voltaje inducido, aminora el efecto de cargas capacitivas (Fraile Mora, 2001).

2.2.2. Regulación de Frecuencia y Tensión.

La regulación de frecuencia y tensión en un generador síncrono permite mantener el voltaje y la frecuencia dentro de límites permisibles mientras se varía la carga conectada al generador. Esta regulación es crucial en los sistemas de generación de energía para garantizar un suministro estable y eficiente de electricidad a las redes de distribución.



A. Frecuencia y Tensión en un Generador Síncrono

1. **Frecuencia:** La frecuencia de un generador síncrono está directamente relacionada con la velocidad de rotación del rotor. En un generador síncrono, la frecuencia se calcula según la siguiente ecuación:

$$f = \frac{P \cdot N}{120} \quad (12)$$

Donde:

- f es la frecuencia en hertzios (Hz).
- P es el número de polos del generador.
- N es la velocidad de rotación del rotor en revoluciones por minuto (RPM).

Mantener una frecuencia constante es vital en sistemas eléctricos, ya que muchas cargas, como motores eléctricos y dispositivos electrónicos, dependen de una frecuencia precisa para funcionar correctamente (Fitzgerald et al., 2013).

2. **Tensión (Voltaje):** El voltaje generado en los terminales del generador síncrono depende de la corriente de excitación que fluye en el rotor y de la carga conectada. La tensión terminal también está influenciada por la reactancia del estator y las condiciones de carga, como las características inductivas o capacitivas.

La relación entre el voltaje inducido (E_f) y el voltaje terminal (V_t) se puede describir mediante la siguiente ecuación:



$$V_t = E_f - (I_a \cdot Z_s) \quad (13)$$

Donde:

- E_f es el voltaje inducido por la corriente de excitación en el rotor.
- I_a es la corriente de armadura (o estator).
- $Z_s = R_s + jX_s$ es la impedancia del estator, que incluye la resistencia (R_s) y la reactancia sincrónica (X_s) (Chapman, 2012).

B. Regulación de la Frecuencia

La regulación de la frecuencia en un generador síncrono es el proceso de mantener la frecuencia constante mientras se ajusta la carga conectada al generador. La frecuencia está directamente relacionada con la velocidad del rotor, y cualquier cambio en la carga del sistema afecta la velocidad del rotor y, por lo tanto, la frecuencia (Krause et al., 2013).

C. Regulación de Tensión

La regulación de tensión implica mantener el voltaje terminal del generador síncrono dentro de límites permisibles por normatividad a medida que varía la carga conectada. Los cambios en la tensión son causados por variaciones en la corriente de armadura (I_a) y en la reactancia de la carga.

- **Aumento de la carga:** Cuando la carga se incrementa, también lo hace la corriente de armadura, lo que provoca caída de tensión en la reactancia sincrónica (X_s) del estator. Por lo que la tensión en los terminales del generador tiende a disminuir.



- **Disminución de la carga:** Al reducirse la carga, la corriente de armadura disminuye, lo que provoca una menor caída de tensión en la reactancia sincrónica, y el voltaje terminal tiende a aumentar.

Para mantener una tensión constante, el control de la excitación del rotor es esencial. El nivel de excitación se ajusta cambiando la corriente de excitación del rotor, lo que modifica el voltaje inducido E_f . Al aumentar la excitación (sobree excitación), el generador puede compensar la caída de tensión causada por una mayor carga. Al reducir la excitación (subexcitación), se puede evitar el sobrevoltaje en los terminales del generador (Chapman, 2012).

D. Relación entre Frecuencia y Tensión

Aunque la frecuencia y la tensión son independientes entre sí en un generador síncrono, ambos parámetros deben ser controlados simultáneamente para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico. La frecuencia está relacionada con la velocidad del rotor, mientras que la tensión depende de la corriente de excitación y la carga conectada.

En sistemas de generación eléctrica, los generadores están diseñados para operar a una frecuencia y tensión nominal específicas (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz y 230 V o 400 V). Las variaciones de carga pueden afectar a la frecuencia como también al voltaje, por lo que los sistemas de regulación automática se deben de encargar en ajustar ambos parámetros para mantener la estabilidad en la red.

E. Importancia de la Regulación de Frecuencia-Tensión

Mantener la frecuencia y la tensión en niveles adecuados es esencial para que los sistemas eléctricos funcionen de forma segura y eficiente. Si un generador

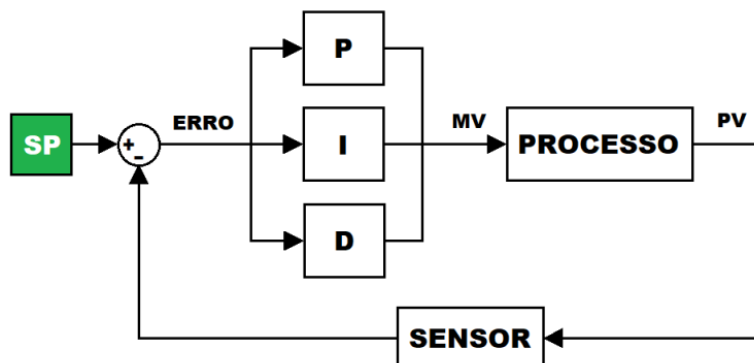
no controla bien estos parámetros, puede provocar problemas en la red, como variaciones de voltaje, inestabilidad e incluso daños en los equipos conectados (Fraile Mora, 2001).

2.2.3. Controladores PID.

El controlador PID es uno de los sistemas de control más comunes en la industria porque es sencillo, confiable y ajusta bien los sistemas ante cambios. Se usa en muchas áreas, como robótica, control de motores, regulación de temperatura y más (Astrom & Hagglund, 2006).

Figura 14

Diagrama de bloques de un controlador PID.



Nota. Tomado de Automation (2019)

A. Fundamentos del Control PID

El controlador PID ajusta la salida de un sistema en función de la diferencia entre el valor medido en la respuesta y el valor de consigna. Esta diferencia se le llama error ($e(t)$). El control PID tiene como objetivo disminuir este error ajustando la salida del sistema.

El controlador PID utiliza tres términos de control, que son:

1. **Proporcional (P):** Esta acción está basada directamente en el error. El controlador proporcional genera una salida que es proporcional al valor instantáneo del error. Si el error aumenta, la salida proporcional también aumenta, y viceversa. La constante proporcional K_p determina la magnitud de esta respuesta (Ogata, 2010).

$$P(t) = K_p \cdot e(t) \quad (14)$$

El componente proporcional corrige el error rápidamente, pero no puede eliminarlo completamente, lo que a menudo resulta en un error estacionario.

2. **Integral (I):** El término integral toma en cuenta la suma acumulativa de errores a lo largo del tiempo. Si el error persiste durante un período, el controlador integral ajusta la salida del sistema para compensar la desviación acumulada. La constante K_i controla la rapidez con la que se corrige este error acumulativo (Dorf & Bishop, 2017).

$$I(t) = K_i \cdot \int e(t)dt \quad (15)$$

El componente integral elimina el error estacionario (el error que permanece a largo plazo), pero puede hacer que el sistema sea más lento para responder y propenso a oscilar si se ajusta incorrectamente.

3. **Derivativo (D):** El término derivativo anticipa futuros errores basándose en la velocidad de cambio del error. Calcula la tasa de cambio del error y ajusta la salida del sistema para evitar un aumento excesivo del error. La constante K_d determina el peso de esta acción predictiva (Ogata, 2010).

$$D(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (16)$$

El componente derivativo ayuda a reducir las oscilaciones y mejorar la estabilidad del sistema, proporcionando una respuesta más suave. Sin embargo, el uso excesivo del término derivativo puede amplificar el ruido en el sistema

B. Ecuación del Control PID

El controlador PID combina los tres términos anteriores para ajustar la salida del sistema de manera continua. La ecuación general del controlador PID es:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

Donde:

- $u(t)$ es la salida del controlador.
- $e(t)$ es el error en el tiempo
- K_p , K_i y K_d son las constantes de los términos proporcional, integral y derivativo, respectivamente (Astrom & Hagglund, 2006).

C. Comportamiento y Ajuste del Control PID

El comportamiento de un sistema controlado por PID depende en gran medida de los valores de las constantes K_p , K_i y K_d . El ajuste adecuado de estos parámetros se denomina sintonización del PID, y es crucial para el rendimiento del sistema. Existen varios métodos de sintonización, como el método de Ziegler-Nichols, que proporciona valores iniciales aproximados para los parámetros del controlador (Ziegler & Nichols, 1942).



- **Control Proporcional (K_p):** Si K_p es muy bajo, el sistema responde lentamente y no corrige el error con suficiente rapidez. Si K_p es demasiado alto, el sistema puede volverse inestable y generar grandes oscilaciones alrededor del punto de ajuste.
- **Control Integral (K_i):** Si K_i es muy **alto**, el sistema puede acumular una corrección excesiva, lo que genera oscilaciones. Si K_i es demasiado bajo, puede haber un error estacionario significativo que no se corrige.
- **Control Derivativo (K_d):** Si K_d es alto, el sistema puede reaccionar de forma demasiado agresiva ante pequeños cambios de error, amplificando el ruido. Si es muy bajo, el sistema no puede anticipar los cambios futuros y puede oscilar más.

D. Aplicaciones del Control PID

El controlador PID es uno de los métodos de control más ampliamente aplicados debido a su versatilidad y facilidad de implementación. Algunas de las principales aplicaciones incluyen:

Control de temperatura: En sistemas de calefacción o refrigeración, el PID regula la temperatura ajustando la cantidad de energía suministrada para mantener la temperatura deseada (Ogata, 2010).

Control de velocidad de motores: En sistemas de motores eléctricos, el PID ajusta la velocidad del motor para alcanzar un valor de referencia, ajustando la corriente o el voltaje de entrada según sea necesario (Dorf & Bishop, 2017).

Control de nivel: En sistemas de control de líquidos, el PID ajusta el nivel mediante una válvula de entrada o salida.



Robótica: En robótica, el PID se utiliza para controlar los movimientos de los actuadores y motores de robots (Astrom & Hagglund, 2006).

E. Ventajas y Desventajas del Control PID

Dentro de las ventajas desventajas del Control PID podemos mencionar:

Ventajas:

- Simplicidad.
- Robustez.
- Versatilidad.

Desventajas:

- Sintonización.
- Ruido.
- Retardo en la respuesta.

El PID clásico puede no ser suficiente y puede ser necesario aplicar técnicas más avanzadas de control (Ogata, 2010).

El controlador PID sigue siendo una de las técnicas de control más utilizadas en la industria debido a su simplicidad, eficacia y versatilidad (Astrom & Hagglund, 2006).

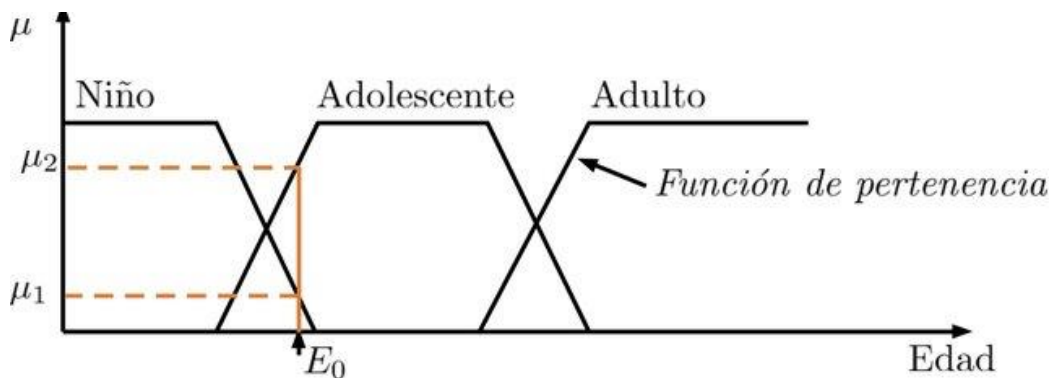
2.2.4. Lógica Difusa.

La lógica difusa es una versión ampliada de la lógica clásica que ayuda a trabajar con conceptos imprecisos o inciertos, imitando cómo razona una persona en situaciones ambiguas. Creada por Lotfi Zadeh en 1965, es muy útil

para modelar sistemas complejos que no se pueden representar con fórmulas exactas. Hoy en día, se usa en áreas como control de sistemas, inteligencia artificial, procesamiento de señales y toma de decisiones.

Figura 15

Ejemplo de lógica difusa



Nota. Tomado de (Obando & Garita, 2017)

A. Fundamentos de la Lógica Difusa

En la lógica clásica, algo solo puede ser verdadero o falso, pero la lógica fuzzy permite que las cosas sean parcialmente verdaderas o falsas, con valores que van del 0 al 1. Esto la hace más útil para describir situaciones ambiguas que ocurren en la vida real (Zadeh, 1965).

B. Conjuntos Difusos

Es lo fundamental en la lógica fuzzy, a diferencia de los conjuntos clásicos, en los que un elemento pertenece o no a un conjunto, los conjuntos difusos permiten grados de pertenencia. La función de membresía de un conjunto difuso asigna a cada elemento un valor entre 0 y 1, indicando su grado de pertenencia al conjunto. Por ejemplo, si se utiliza un conjunto difuso para representar el concepto

de "temperatura alta", una temperatura de 30°C puede tener un grado de pertenencia de 0.8, mientras que una temperatura de 40°C puede tener un grado de pertenencia de 1.0.

Matemáticamente, un conjunto difuso A en un universo de discurso U se define como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (18)$$

Donde:

- $\mu_A(x)$ es la función de membresía, que asigna a cada elemento x un valor entre 0 y 1.

C. Operaciones en Conjuntos Difusos

Las operaciones clásicas de conjuntos, como la intersección, la unión y la complementación, se pueden generalizar en el contexto de los conjuntos difusos:

- Intersección (AND): La intersección de dos conjuntos difusos A y B está dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (19)$$

- Unión (OR): La unión de dos conjuntos difusos A y B está dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (20)$$

- Complemento (NOT): El complemento de un conjunto difuso A está dada por:

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (21)$$

Estas operaciones permiten manejar información imprecisa de manera flexible y se utilizan para construir reglas de inferencia difusa (Ross, 2010).



D. Inferencia Difusa.

La inferencia difusa es el proceso de tomar decisiones o generar respuestas utilizando lógica fuzzy. Este proceso implica el uso de reglas difusas, que son reglas del tipo SI-ENTONCES formuladas en términos lingüísticos. Una regla difusa típica puede tener la siguiente forma:

- SI la temperatura es alta Y la humedad es baja, ENTONCES el ventilador debe girar a alta velocidad.

Las reglas difusas se combinan mediante operaciones de lógica difusa para generar una salida difusa, que luego se convierte en una acción o decisión mediante un proceso de desfuzzificación.

E. Métodos de Inferencia Difusa

Existen varios métodos para realizar inferencias difusas, siendo los dos más comunes:

Método de Mamdani: Utiliza funciones de membresía tanto para las entradas como para las salidas. Es uno de los métodos más utilizados en el control difuso y proporciona una salida difusa que se debe "desfuzzificar" para obtener un valor preciso (Mamdani & Assilian, 1975).

Método de Takagi-Sugeno: En este método, las salidas de las reglas son funciones lineales o constantes en lugar de conjuntos difusos. Este método es más eficiente computacionalmente, se le utiliza cuando se necesita mayor precisión en la salida (Takagi & Sugeno, 1985).

F. Ventajas de la Lógica Fuzzy

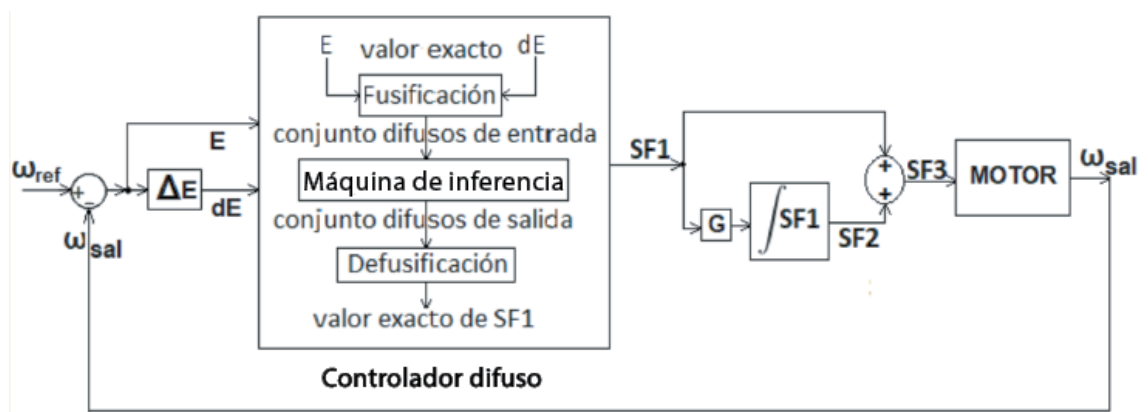
La lógica fuzzy es ideal para trabajar con datos inciertos o sistemas complejos, ya que permite usar reglas simples y fáciles de entender. Se parece al modo en que las personas razonan y toma decisiones, y es bastante resistente a cambios o condiciones impredecibles, por lo que funciona bien en entornos dinámicos.

G. Aplicaciones de la Lógica Fuzzy

La lógica fuzzy se usa en muchos campos, como la industria, electrodomésticos inteligentes y automóviles, para controlar procesos y tomar decisiones cuando hay incertidumbre o datos imprecisos. Es especialmente útil en sistemas complejos, ya que funciona de manera similar a cómo razonan las personas. Gracias a su flexibilidad, sigue siendo una herramienta importante en áreas como robótica, inteligencia artificial y automatización.

Figura 16

Sistema de control difuso para controlar la velocidad de un motor de CC



Nota. Tomado de (Muñoz, 2023)

2.2.5. Control Difuso.

El control difuso es una forma de controlar sistemas usando lógica que imita cómo razonan las personas con información imprecisa. A diferencia de los controladores tradicionales como el PID, funciona bien en sistemas complejos o sin modelos matemáticos exactos, adaptándose a relaciones no lineales entre las variables.

A. Fundamentos del Control Difuso

El control difuso usa lógica difusa para manejar valores entre 0 y 1, lo que permite trabajar con información imprecisa en lugar de depender solo de valores exactos, como verdadero o falso. Este enfoque tiene cuatro pasos principales:

1. **Fuzzificación:** Convierte las entradas exactas en valores difusos que representan grados de pertenencia a conjuntos como "bajo", "medio" o "alto". Por ejemplo, en un sistema de temperatura, una entrada puede pertenecer parcialmente a varios conjuntos.
2. **Base de reglas difusas:** Utiliza reglas simples, como "Si la temperatura es alta y la velocidad del ventilador es baja, entonces aumenta la velocidad", basadas en el conocimiento de expertos (Passino & Yurkovich, 1998).
3. **Inferencia difusa:** Evalúa estas reglas para generar salidas difusas. Los métodos de Mamdani y Takagi-Sugeno son los más comunes para este paso (Ross, 2010).
4. **Defuzzificación:** Convierte las salidas difusas en valores concretos que controlan el sistema, usando técnicas como el centroide o el promedio ponderado.



Esta técnica es ideal para sistemas complejos, ya que imita el razonamiento humano y simplifica la gestión de incertidumbre.

B. Ventajas del Control Difuso

El control difuso tiene varias ventajas sobre los controladores convencionales, especialmente en sistemas que presentan no linealidades o comportamientos complejos que son difíciles de modelar matemáticamente (Zadeh, 1965):

- Simplicidad
- Robustez.
- Flexibilidad.
- Control no lineal.

C. Desventajas del Control Difuso

El control difuso presenta las siguientes desventajas:

- Dificultad en la sintonización.
- Exceso de reglas.
- Incertidumbre en la precisión.

D. Aplicaciones del Control Difuso

El control difuso se utiliza en muchos campos porque puede manejar sistemas complicados y con datos imprecisos. Por ejemplo, ayuda a regular la temperatura en hornos y aires acondicionados, a controlar motores eléctricos y la velocidad en vehículos, a mejorar el flujo de tráfico ajustando los semáforos en tiempo real, y a gestionar los movimientos de robots en entornos impredecibles.

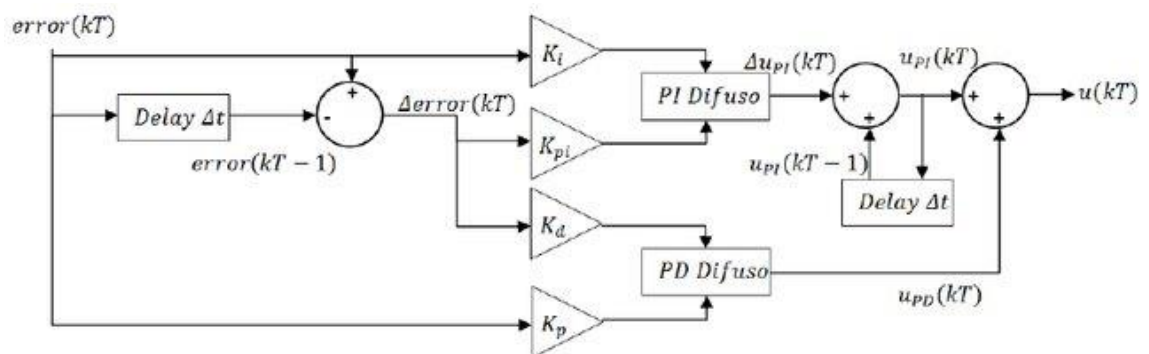
Es una solución flexible que se adapta bien a condiciones cambiantes (Passino & Yurkovich, 1998; Ross, 2010; Zadeh, 1965).

E. Comparación con Otros Métodos de Control

El control difuso, a diferencia de los controladores PID, no necesita un modelo matemático exacto del sistema, sino que usa reglas simples para ajustar las salidas. Mientras que los PID funcionan mejor en sistemas definidos y son más precisos, el control difuso es más útil en sistemas complicados o inciertos, gracias a su flexibilidad y resistencia a perturbaciones. Aunque puede ser más difícil de diseñar y no siempre es tan exacto, es ideal para muchas aplicaciones, desde la industria hasta la inteligencia artificial (Astrom & Hagglund, 2006).

Figura 17

Diagrama de bloques correspondiente a un controlador PID difuso



Nota. Tomado de Carrasco & Alvares (2013).

2.2.6. Controlador PID Difuso.

Los controladores PID difusos son una versión mejorada de los PID tradicionales que usan lógica difusa para ajustar automáticamente los parámetros K_p , K_i , K_d . Esto los hace más efectivos en sistemas complicados o impredecibles, ya que pueden adaptarse mejor a los cambios y manejar incertidumbres. Gracias



a esta combinación, son muy útiles en la industria, especialmente cuando no es posible modelar un sistema con precisión usando solo matemáticas tradicionales.

A. Fases del Controlador PID Difuso

El controlador PID difuso consta de las siguientes etapas:

1. **Fuzzificación:** En este paso, las entradas crisp (precisas) como el error (e) y la derivada del error (\dot{e}) se convierten en valores difusos utilizando funciones de membresía. Las variables difusas describen el estado del sistema en términos lingüísticos como "error pequeño", "error grande", "cambio rápido", etc.
2. **Base de reglas difusas:** El controlador PID difuso utiliza un conjunto de reglas difusas del tipo SI-ENTONCES. Estas reglas definen cómo se deben ajustar los parámetros K_p , K_i y K_d en función del estado del sistema. Por ejemplo:
 - SI (el error es grande) Y (el cambio del error es rápido),
ENTONCES (incrementar
 - SI (el error es pequeño) Y (el cambio del error es lento),
ENTONCES (reducir

Estas reglas permiten ajustar los parámetros en función de las condiciones actuales del sistema, mejorando la capacidad del controlador para manejar sistemas no lineales o con variaciones en sus parámetros.

3. **Inferencia difusa:** El motor de inferencia difusa utiliza las reglas para evaluar las entradas fuzzificadas y determinar las salidas



difusas correspondientes. El método de inferencia más utilizado es el de Mamdani, que genera salidas difusas para los coeficientes K_p , K_i y K_d basándose en las entradas.

4. **Defuzzificación:** Finalmente, las salidas difusas se convierten en valores precisos (crisp) mediante técnicas de defuzzificación (como el método del centroide). Estos valores se utilizan como los nuevos coeficientes K_p , K_i y K_d para el controlador PID (Passino & Yurkovich, 1998).

B. Ventajas del Controlador PID Difuso

El controlador PID difuso presenta varias ventajas en comparación con el controlador PID clásico (Ross, 2010):

- Adaptabilidad.
- Robustez.
- Menor necesidad de sintonización.
- Manejo de no linealidades.

C. Desventajas del Controlador PID Difuso

- Complejidad.
- Mayor carga computacional.

D. Aplicaciones del Controlador PID Difuso

El controlador PID difuso se aplica en la industria química, en el control de motores, la robótica y la automatización de edificios. Gracias a la lógica difusa, puede ajustarse mejor a sistemas complejos o condiciones variables, superando las limitaciones del PID clásico. Aunque es más complicado de diseñar, su

flexibilidad y robustez lo hacen una herramienta muy útil en aplicaciones tecnológicas y sistemas con incertidumbre (Passino & Yurkovich, 1998).

2.2.7. Tipos de controladores PID Difuso.

Dependiendo de la implementación y la forma en que se integran los componentes difusos con el esquema PID clásico, existen diferentes tipos de controladores PID difusos. Estos controladores pueden clasificarse en varios tipos según cómo se ajusten los parámetros del PID o cómo se realicen los cálculos de control. A continuación, se describen los tipos más comunes de controladores PID difusos:

A. PID Difuso Tipo 1: Controlador PID con Ajuste Difuso de Parámetros

Este tipo de controlador utiliza la lógica difusa para ajustar dinámicamente los parámetros K_p , K_i y K_d del controlador PID clásico. En este caso, las reglas difusas determinan los valores de estos coeficientes en función del error (e) y su derivada (\dot{e}) (Passino & Yurkovich, 1998). El esquema básico del PID se mantiene, pero la lógica difusa se utiliza para seleccionar los valores óptimos de los parámetros del PID en tiempo real.

El funcionamiento de este tipo de controlador es:

- El **error** (e) y la **derivada del error** (\dot{e}) son las entradas del sistema difuso.
- El sistema de inferencia difuso, con base en las reglas diseñadas, ajusta los valores de K_p , K_i y K_d según las condiciones operativas.



- Los valores ajustados se usan en la ecuación tradicional del controlador PID para calcular la salida de control.

Este tipo de controlador mejora la capacidad de adaptación del controlador PID a sistemas no lineales o con variaciones, así como también permite ajustar los parámetros sin necesidad de sintonización manual constante.

Sin embargo, requiere un diseño más complejo debido a la necesidad de definir reglas difusas para los tres coeficientes (K_p , K_i y K_d) (Ross, 2010).

B. PID Difuso Tipo 2: Controlador PID Difuso Completo

El controlador PID difuso completo reemplaza los tres términos del controlador PID clásico (proporcional, integral y derivativo) por reglas difusas. En este tipo de controlador, la lógica difusa se aplica a la totalidad del proceso de control, desde la evaluación del error hasta la salida de control (K_p , K_i y K_d). En lugar de utilizar coeficientes constantes, las reglas difusas determinan cómo se combinan las entradas para generar la salida de control (Passino & Yurkovich, 1998).

El funcionamiento de este tipo de controlador es:

- Las entradas (error y derivada del error) se fuzzifican.
- Se aplica un conjunto de reglas difusas que definen cómo combinar las entradas para generar la salida de control.
- La salida del sistema difuso se desfuzzifica para obtener la señal de control precisa.



Este tipo de controlador Permite un control más flexible y no depende directamente de la estructura clásica del PID además tiene una mayor adaptabilidad en sistemas altamente no lineales.

Sin embargo, el diseño y ajuste es más complejos debido a la cantidad de reglas necesarias para cubrir todos los posibles escenarios y necesita una mayor carga computacional.

C. PID Difuso Tipo 3: Controlador PID Difuso Simplificado.

El controlador PID difuso simplificado es una versión reducida del controlador PID difuso completo, donde solo uno o dos de los tres términos PID (proporcional, integral o derivativo) se controlan mediante reglas difusas, mientras que los otros términos se mantienen constantes o se ajustan de manera clásica (Astrom & Hagglund, 2006). Este tipo de controlador se utiliza cuando uno de los componentes PID tiene una influencia más crítica en el sistema y es el único que se necesita adaptar dinámicamente.

El funcionamiento del controlador es como sigue:

- Solo uno o dos de los parámetros (K_p , K_i y K_d) se ajustan mediante lógica difusa.
- Los otros parámetros del PID se mantienen constantes.

Su implementación reduce la complejidad del diseño, ya que se necesitan menos reglas difusas y también menor carga computacional en comparación con el controlador PID difuso completo.

Pero presenta la desventaja de ser menos adaptable que el PID difuso completo y no permite un ajuste completo de todos los parámetros del PID.

D. PID Difuso con Ajuste Ganancia Escalable

El controlador PID difuso con ganancia escalable ajusta los parámetros del PID utilizando la lógica difusa, pero en lugar de ajustar directamente los coeficientes K_p , K_i y K_d , el controlador usa un factor de ganancia escalable para ajustar la magnitud general de los tres parámetros de manera proporcional. Esto simplifica el diseño del controlador, ya que no es necesario definir reglas específicas para cada uno de los términos PID (Ross, 2010).

Funcionamiento:

- Se utiliza un solo factor de ganancia para escalar los valores de K_p , K_i y K_d .
- Las entradas difusas determinan cómo ajustar ese factor de ganancia para escalar adecuadamente los parámetros del PID.

Su principal ventaja es la simplicidad en el diseño y sintonización, ya que solo se ajusta un factor de ganancia en lugar de tres parámetros y la reducción en la cantidad de reglas difusas necesarias.

Sin embargo, es menos flexible en comparación con el ajuste individual del K_p , K_i y K_d y no siempre es adecuado para sistemas con un comportamiento complejo.

E. PID Difuso Adaptativo

El PID difuso adaptativo es una evolución avanzada del controlador PID difuso en la que las reglas difusas y las funciones de membresía se adaptan automáticamente en función del comportamiento del sistema o de los datos históricos. A diferencia de los PID difusos convencionales, en los que las reglas se definen de antemano, el PID difuso adaptativo ajusta sus reglas sobre la marcha (Passino & Yurkovich, 1998).

El controlador funciona de la siguiente manera:

- El sistema utiliza un algoritmo de adaptación (como redes neuronales o técnicas de optimización) para ajustar las reglas difusas y las funciones de membresía en tiempo real.
- El controlador puede aprender y adaptarse automáticamente a las variaciones en el sistema.

Su mayor flexibilidad y capacidad de aprendizaje continuo y la adaptabilidad frente a condiciones de operación altamente cambiantes o no lineales son sus principales ventajas.

Pero el proceso de diseño e implementación es muy complejo, requiere una carga computacional significativa.

Los controladores PID difusos mejoran al PID tradicional usando lógica difusa para trabajar mejor con sistemas complicados o con incertidumbre. Algunos solo ajustan los parámetros del PID, mientras que otros más avanzados pueden modificar reglas y funciones en tiempo real. Elegir el tipo adecuado depende de qué tan complejo sea el sistema y de los objetivos de control,

considerando siempre un balance entre flexibilidad y facilidad de uso (Zadeh, 1965).

Tabla 1.

Comparación entre los tipos de Controladores PID Difusos.

Tipo de Controlador	Complejidad	Ventajas	Desventajas
PID Difuso con Ajuste de Parámetros	Media	Mejora de rendimiento frente a perturbaciones y no linealidades	Requiere más reglas
PID Completo	Difuso Alta	Máxima flexibilidad y control sobre el sistema	Complejidad y carga computacional
PID Simplificado	Difuso Baja	Menos complejidad y rápida implementación	Menos flexible y adaptabilidad
PID Ganancia Escalable	Difuso con Baja	Simplicidad y bajo costo computacional	Menos adecuado para sistemas complejos
PID Adaptativo	Difuso Muy Alta	Aprendizaje automático y ajuste continuo	Alta complejidad y carga computacional

Nota. En la tabla se muestra los tipos de controladores PID difusos indicando las ventajas y desventajas de estos en función de la complejidad del sistema controlado y de las necesidades de control.

2.2.8. Aplicaciones en Generadores Síncronos.

Los generadores síncronos son clave en la producción de electricidad porque garantizan un suministro de alta calidad. Para que funcionen de forma estable y eficiente, es fundamental controlarlos con precisión, especialmente en redes eléctricas que enfrentan cambios de carga y perturbaciones. Los controladores PID difusos han resultado ser una opción ideal porque se ajustan de manera adaptable y robusta a diferentes condiciones, superando las limitaciones de los métodos tradicionales.

1. Control de velocidad: Los PID difusos regulan la energía mecánica que entra al generador para mantener la velocidad del rotor constante, lo cual asegura



que la frecuencia de la electricidad sea estable, incluso cuando hay cambios bruscos en la carga.

2. Control de tensión: Estos controladores ajustan la excitación del generador para que el voltaje se mantenga estable, sin importar las variaciones en la carga o las condiciones del sistema.
3. Gestión de potencia activa y reactiva: Los PID difusos equilibran la energía mecánica y la excitación del generador para mejorar la eficiencia energética, mantener un buen factor de potencia y garantizar la estabilidad de la red.
4. Sincronización con la red: También ayudan a alinear la frecuencia, el voltaje y la fase del generador con la red eléctrica antes de conectarlo, evitando daños y garantizando una conexión segura.

En resumen, los controladores PID difusos hacen que los generadores síncronos sean más precisos, adaptables y eficientes, especialmente en entornos dinámicos y con energías renovables.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales a utilizados en la investigación se centraron en la regulación de frecuencia y tensión de un generador síncrono utilizando un controlador PID difuso, el cual estuvo orientado principalmente al uso de herramientas de software y recursos bibliográficos que permitieron desarrollar y validar el controlador diseñado. A continuación, detallamos los materiales específicos que se utilizaron en el desarrollo de esta investigación:

3.1.1. Herramientas de Software.

El uso de herramientas de software fue esencial para la modelación matemática, simulación y diseño del controlador fuzzy-PID. Las principales librerías y herramientas utilizadas en el entorno de Python fueron:

A. Python 3.x

El cual es un lenguaje de programación utilizado para el desarrollo de todo el proyecto. Python fue elegido por su versatilidad y por las amplias librerías disponibles para simulación y control de sistemas. Este software fue el entorno principal de programación, donde se implementó el modelo del generador síncrono, además de diseñar el controlador fuzzy-PID y realizar simulaciones.

B. NumPy

Es la librería fundamental para el manejo de arreglos y cálculos matemáticos en Python. Se utilizó para realizar cálculos de matrices y vectores, necesarios en la modelización del sistema dinámico del generador síncrono.



C. SciPy

Es un paquete científico de Python que incluye herramientas para resolver ecuaciones diferenciales, integración numérica y álgebra lineal. Se empleó para resolver las ecuaciones diferenciales del generador síncrono y simular el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones.

D. Matplotlib

Es una librería de Python para la creación de gráficos y visualizaciones de datos. Se utilizó para graficar los resultados de las simulaciones, permitiendo la comparación visual del rendimiento entre el controlador PID convencional y el fuzzy-PID.

E. Control

Es un paquete especializado en el diseño y análisis de sistemas de control en Python. Esta librería fue utilizada para implementar el controlador PID convencional y realizar simulaciones de la respuesta del sistema de control.

F. scikit-fuzzy

Es una Librería de Python para el desarrollo de sistemas de control basados en lógica difusa. Se utilizó para diseñar el controlador fuzzy-PID, implementando las funciones de pertenencia, reglas difusas y el sistema de inferencia que ajustó dinámicamente las ganancias del PID.

G. Pandas

Es una librería para el manejo y análisis de grandes conjuntos de datos en Python. Se utilizó para organizar y analizar los datos resultantes de las



simulaciones, permitiendo almacenar y procesar los resultados de manera estructurada.

3.1.2. Recursos Computacionales.

Para ejecutar las simulaciones y desarrollar el proyecto, se utilizó una computadora de alto rendimiento, con las siguientes especificaciones mínimas:

A. Computadora

- Procesador: Intel Core i5. memoria RAM: 8 GB, necesarios para ejecutar las simulaciones de sistemas dinámicos complejos.
- Disco duro: 500 GB de almacenamiento para guardar los resultados de las simulaciones y los códigos.
- Sistema operativo: Windows 10, compatible con el entorno de desarrollo Python.

B. Entorno de desarrollo integrado (IDE)

- Se utilizó un editor de código Jupyter Notebooks para escribir, ejecutar y depurar el código Python de manera interactiva.
- La función principal fue de facilitar la escritura del código, la visualización de los resultados de las simulaciones y el control de versiones.

3.1.3. Documentación y Material Bibliográfico

Para respaldar el desarrollo del proyecto y guiar la implementación del controlador PID difuso, se consultaron diversos recursos teóricos y manuales técnicos:



A. Libros y Artículos Científicos

- Referente a Controladores PID, lógica difusa y modelado de generadores síncronos.
- Proporcionaron el marco teórico para comprender los fundamentos de los sistemas de control basados en lógica difusa, así como los principios del modelado y simulación de generadores síncronos.

B. Documentación oficial de las librerías de Python

- En los sitios web se consultó la documentación de NumPy, SciPy, Matplotlib, Control y scikit-fuzzy fue utilizada para implementar las funciones necesarias en el proyecto.
- Se Consultaron ejemplos, guías y tutoriales que facilitaron el uso adecuado de las librerías.

3.1.4. Recursos Humanos

El proyecto fue ejecutado por un equipo de investigación, compuesto por:

A. Investigador Principal

Las responsabilidades fueron de diseñar y desarrollar el controlador fuzzy-PID, realizar simulaciones y analizar los resultados.

B. b. Asesor Académico

Proporcionó orientación teórica sobre controladores difusos y sistemas de potencia, además de validar los enfoques utilizados en la simulación.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO

En este proyecto de investigación, el objetivo fue diseñar y simular un controlador Pid difuso para la regulación de la frecuencia y tensión de un generador síncrono. Dado

que se trató de un proyecto basado en simulaciones computacionales, la definición de población y muestra se refiere a las diferentes condiciones de operación y escenarios simulados en los que se evaluó el desempeño del sistema de control.

3.2.1. Población de Estudio

La población de estudio en este proyecto estuvo constituida por el conjunto total de condiciones de operación posibles de un generador síncrono, abarcando una amplia gama de escenarios que incluyeron:

- **Diferentes niveles de carga eléctrica:** Operación con carga baja, media y máxima (sobrecarga).
- **Variaciones de frecuencia y tensión:** Operación bajo condiciones estándar, así como situaciones de fluctuaciones de frecuencia y tensión, con un rango de variaciones tanto menores como significativas.
- **Perturbaciones externas simuladas:** Eventos como caídas bruscas de tensión, cambios rápidos en la demanda de carga y fluctuaciones repentinas en la red eléctrica.
- **Diversas configuraciones del controlador PID difuso:** Variaciones en los parámetros de las reglas difusas y las ganancias del PID para evaluar el impacto de diferentes ajustes en el rendimiento del sistema.

En conjunto, la población incluyó un número muy amplio de posibles escenarios operativos, que van desde condiciones ideales hasta situaciones críticas o extremas. Sin embargo, debido a la imposibilidad de cubrir todas las combinaciones, fue necesario seleccionar una muestra representativa de escenarios clave para realizar las simulaciones.



3.2.2. Muestra de Estudio

La muestra de estudio consistió en un conjunto de cinco escenarios seleccionados que fueron simulados para evaluar la efectividad del controlador PID difuso bajo diferentes condiciones. Estos escenarios se eligieron cuidadosamente para cubrir una gama de situaciones representativas de la operación de un generador síncrono en un entorno real.

A. Escenarios Simulados:

Carga nominal sin perturbaciones: condiciones estándar del generador síncrono, con una carga estable en su valor nominal y sin perturbaciones externas significativas. Este escenario permitió evaluar el comportamiento del controlador PID difuso bajo condiciones normales de operación.

3.2.3. Criterios para la Selección de la Muestra:

La selección de los cinco escenarios se basó en los siguientes criterios:

Representatividad: Los escenarios seleccionados cubrieron un amplio espectro de condiciones operativas, desde la operación estándar hasta situaciones extremas y de fallo.

Relevancia: Se eligieron casos que permitieran evaluar el rendimiento del controlador fuzzy-PID en condiciones críticas y típicas de operación de generadores síncronos.

Diversidad de Condiciones: Se incluyeron tanto variaciones en la carga, como fluctuaciones de frecuencia y tensión, perturbaciones externas y fallos simulados para asegurar una evaluación integral del sistema de control.

3.2.4. Resultados de la Muestra de Estudio

Las simulaciones realizadas en los cinco escenarios permitieron observar de manera detallada cómo el controlador fuzzy-PID respondía en cada situación. Los resultados demostraron una mejora significativa en el rendimiento del sistema de control fuzzy-PID en comparación con el controlador PID convencional, especialmente en escenarios de carga variable y condiciones extremas de perturbación.

Tiempo de respuesta: En los escenarios con fluctuaciones de carga y perturbaciones, el controlador fuzzy-PID mostró un tiempo de respuesta más rápido que el PID convencional, reduciendo el tiempo necesario para estabilizar la frecuencia y la tensión.

Robustez: El fuzzy-PID proporcionó un mejor desempeño en condiciones extremas de operación, con una mayor capacidad de adaptación a cambios bruscos en la demanda y eventos de fallo.

Error en estado estacionario: El error en estado estacionario fue consistentemente menor con el fuzzy-PID, lo que resultó en una mayor precisión en la regulación de la frecuencia y tensión.

El enfoque de simulación basado en una muestra representativa de cinco escenarios permitió validar la hipótesis de que el controlador fuzzy-PID mejora la regulación de la frecuencia y tensión de un generador síncrono, especialmente en condiciones de operación variables y desafiantes. Estos resultados ofrecen una base sólida para considerar la implementación del controlador fuzzy-PID en sistemas eléctricos reales.



3.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación empleada en este proyecto fue diseñada para cumplir con el objetivo de desarrollar y simular el controlador PID difuso que permitiera la regulación eficiente de la frecuencia y la tensión de un generador síncrono. El proyecto se estructuró en varias fases secuenciales, cada una de las cuales fue ejecutada cuidadosamente para asegurar la validez y robustez de los resultados. A continuación, se presenta el desarrollo de cada una de las fases implementadas durante el proyecto.

Fase 1: Revisión de la Literatura

Antes de proceder con el desarrollo del controlador PID difuso, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura con el objetivo de establecer un marco teórico sólido que guiara el diseño del sistema de control. Esta revisión incluyó:

- Estudios previos sobre controladores PID convencionales en sistemas de regulación de frecuencia y tensión en generadores síncronos.
- Investigaciones sobre lógica difusa aplicada al control de sistemas no lineales, especialmente en la mejora de la respuesta de controladores PID tradicionales.
- Revisión del modelado matemático de generadores síncronos, incluyendo las ecuaciones diferenciales que describen su comportamiento dinámico.

La revisión permitió identificar las limitaciones de los controladores PID convencionales y las ventajas potenciales de los controladores fuzzy-PID en sistemas dinámicos complejos como los generadores síncronos.

Figura 18

Estructura de código para la implementación del modelo del generador.

```
from scipy.integrate import odeint
import numpy as np

def modelo_generador(y, t, params):
    # y[0]: Frecuencia, y[1]: Tensión
    # Aquí se definen las ecuaciones diferenciales del generador síncrono
    dydt = [...] # Ecuaciones de estado del generador
    return dydt

# Parámetros iniciales del sistema
params = {...}
y0 = [frecuencia_inicial, tension_inicial]
tiempo = np.linspace(0, 10, 1000)

# Simulación del modelo
solucion = odeint(modelo_generador, y0, tiempo, args=(params,))
```

Nota. En la figura se muestra la estructura que tiene el código para poder implementar el modelo del generador síncrono, para la posterior simulación, con el objetivo de evaluar el comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

Fase 2: Modelado Matemático del Generador Síncrono

La siguiente fase consistió en el modelado matemático del generador síncrono, lo que permitió representar su comportamiento dinámico y las interacciones con el controlador. Para este propósito, se utilizaron las ecuaciones diferenciales que gobiernan la relación entre la frecuencia, la tensión y las condiciones de carga del generador.

- El modelo matemático fue desarrollado utilizando Python y las librerías NumPy y SciPy, que facilitaron el manejo de las ecuaciones y su resolución numérica.
- Se implementó el modelo del generador síncrono como un sistema dinámico no lineal, asegurando que las variables críticas, como la frecuencia y la tensión, fueran representadas con precisión.

Fase 3: Diseño del Controlador PID Convencional

Para establecer un punto de referencia en las simulaciones, se diseñó un controlador PID convencional utilizando la librería Control de Python. Este controlador se encargó inicialmente de regular la frecuencia y tensión del generador síncrono sin la intervención de la lógica difusa.

Figura 19.

Estructura de código para la implementación del controlador PID.

```
import control as ctrl

# Modelo del generador síncrono
sistema = ctrl.TransferFunction([1], [1, 10, 20])

# Diseño del controlador PID
kp, ki, kd = 1, 1, 0.1 # Ganancias sintonizadas
controlador_pid = ctrl.TransferFunction([kp, ki, kd], [1, 0])

# Sistema controlado
sistema_controlado = ctrl.series(controlador_pid, sistema)
respuesta = ctrl.step_response(sistema_controlado)
```

Nota. En la figura se muestra la estructura que tiene el código para poder implementar el controlador PID convencional, el objetivo fue el de evaluar su comportamiento, para una posterior comparación con el controlador PID difuso.

- Se realizó la sintonización de las ganancias del PID utilizando métodos heurísticos, lo que permitió obtener una respuesta aceptable bajo condiciones normales de operación.
- El desempeño del controlador PID fue evaluado en varios escenarios simulados, y los resultados fueron utilizados para realizar comparaciones con el controlador fuzzy-PID.

Fase 4: Desarrollo del Controlador Fuzzy-PID

El controlador PID difuso fue diseñado para mejorar la respuesta del PID convencional mediante el ajuste dinámico de las ganancias del controlador PID en función



del error de la frecuencia y tensión, así como de sus derivadas. Se utilizó la librería scikit-fuzzy de Python para implementar la lógica difusa.

Pasos seguidos en el desarrollo del fuzzy-PID:

- Definición de las variables difusas: Se definieron las entradas difusas, como el error de frecuencia, el error de tensión y las variaciones de estos errores.
- Definición de las funciones de pertenencia: Las funciones de pertenencia triangular y trapezoidal fueron utilizadas para representar las variables difusas.
- Establecimiento de las reglas difusas: Se implementaron reglas si-entonces para ajustar dinámicamente las ganancias del PID en función del comportamiento del sistema.

Fase 5: Simulaciones Comparativas

Una vez diseñados ambos controladores (PID convencional y PID difuso), se llevaron a cabo simulaciones comparativas bajo diferentes escenarios de operación para evaluar su desempeño. Los escenarios seleccionados incluyeron variaciones de carga, fluctuaciones de frecuencia y tensión, así como perturbaciones externas simuladas.

- Simulación del PID convencional: Evaluación de la capacidad del PID para estabilizar la frecuencia y tensión del generador.
- Simulación del fuzzy-PID: Evaluación de la mejora en el tiempo de respuesta, reducción del sobreimpulso y error en estado estacionario.

Figura 20

Estructura de código para la implementación del controlador PID difuso.

```
import skfuzzy as fuzz
from skfuzzy import control as fuzzy_ctrl

# Definir las variables difusas
error = fuzzy_ctrl.Antecedent(np.arange(-10, 11, 1), 'error')
delta_error = fuzzy_ctrl.Antecedent(np.arange(-5, 6, 1), 'delta_error')
ajuste_kp = fuzzy_ctrl.Consequent(np.arange(-1, 2, 0.1), 'ajuste_kp')

# Funciones de pertenencia
error.automf(3)
delta_error.automf(3)

# Reglas difusas
rule1 = fuzzy_ctrl.Rule(error['poor'] & delta_error['poor'], ajuste_kp['bajo'])
sistema_fuzzy = fuzzy_ctrl.ControlSystem([rule1])
simulador_fuzzy = fuzzy_ctrl.ControlSystemSimulation(sistema_fuzzy)
```

Nota. La figura muestra la estructura que tiene el código para poder implementar el controlador PID difuso, el objetivo fue el de poder ajustar automáticamente las ganancias PID y mejorar la respuesta del sistema ante perturbaciones y cambios de carga.

Se utilizaron las librerías Matplotlib y Pandas para graficar y analizar los resultados.

Fase 6: Análisis de Resultados

Tras las simulaciones, se procedió a un análisis detallado de los resultados. Se compararon los controladores en términos de:

- Tiempo de respuesta.
- Estabilidad del sistema.
- Reducción del sobreimpulso.
- Precisión en el error en estado estacionario.

Los resultados demostraron que el controlador PID difuso ofrecía una mejor respuesta en situaciones de carga variable y perturbaciones externas, mostrando mayor robustez y adaptabilidad que el PID convencional.

Figura 21

Estructura de código para la comparación de resultados.

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Simulación del controlador PID convencional
t, respuesta_pid = ctrl.step_response(sistema_controlado)

# Simulación del controlador fuzzy-PID
# ... (código para el fuzzy-PID)

# Gráficos comparativos
plt.plot(t, respuesta_pid, label='PID Convencional')
plt.plot(t, respuesta_fuzzy_pid, label='Fuzzy-PID')
plt.legend()
plt.xlabel('Tiempo')
plt.ylabel('Respuesta')
plt.title('Comparación de Controladores')
plt.show()
```

Nota. La figura muestra la estructura que tiene el código para poder realizar la comparación de resultados en forma gráfica.

La metodología aplicada permitió cumplir con los objetivos del proyecto de manera efectiva. El modelo del generador síncrono, junto con las simulaciones comparativas de los controladores PID y PID difuso, ofrecieron un análisis detallado y sólido sobre las mejoras que el controlador PID difuso aporta a la regulación de la frecuencia y tensión en sistemas eléctricos.



3.4. MODELO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Modelo de recolección de datos.

El modelo de recolección de datos fue diseñado para capturar y analizar el comportamiento dinámico del generador síncrono bajo diferentes condiciones operativas y bajo el control de los dos sistemas de controladores (PID convencional y PID difuso). Este proceso de recolección se realizó en base a simulaciones computacionales y abarcó diversas métricas relevantes para el desempeño del sistema.

Datos recolectados durante las simulaciones:

1. **Frecuencia y Tensión del Generador Síncrono:** Se registraron los valores de la frecuencia (Hz) y la tensión (V) a lo largo del tiempo en cada una de las simulaciones. Estos valores fueron monitoreados continuamente durante los experimentos para evaluar cómo los controladores regulaban las variables bajo diferentes condiciones de carga y perturbaciones.
2. **Error de Frecuencia y Tensión:** Se calculó el error de frecuencia y error de tensión, definido como la diferencia entre el valor deseado (setpoint) y el valor real observado en las simulaciones. El error en estado estacionario fue una métrica clave para evaluar la precisión del control.
3. **Tiempo de Respuesta:** Se recolectó el tiempo que tardó el sistema en estabilizar la frecuencia y la tensión a su valor nominal después de una perturbación o cambio en la carga. El tiempo de respuesta



es crucial para determinar la rapidez con la que el sistema reacciona ante cambios externos.

4. **Sobreimpulso:** Se midió el valor máximo que alcanzaron la frecuencia y la tensión antes de estabilizarse tras una perturbación. El sobreimpulso es una métrica importante para evaluar la estabilidad del sistema.
5. **Oscilaciones:** Se monitorearon y registraron las oscilaciones en la frecuencia y tensión antes de que el sistema llegara a un estado estacionario.
6. **Control de ganancia PID:** En el caso del controlador PID difuso, se registraron las variaciones dinámicas en las ganancias PID (proporcional, integral y derivativa) que fueron ajustadas en tiempo por el sistema difuso.

3.4.2. Técnicas de recolección de datos.

Dado que el proyecto fue ejecutado en un entorno de simulación, las técnicas de recolección de datos fueron completamente computacionales, enfocadas en registrar los datos generados por las simulaciones de los controladores. Las técnicas específicas utilizadas fueron:

Simulaciones Computacionales

Herramientas utilizadas: Se emplearon las librerías SciPy, Control, y scikit-fuzzy en Python para realizar las simulaciones dinámicas del sistema de control. Estas librerías permitieron simular el comportamiento del generador síncrono bajo el control del PID convencional y fuzzy-PID en diferentes escenarios de operación.



Datos recolectados: En cada simulación se recolectaron datos numéricos sobre el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo (frecuencia, tensión, errores, tiempo de respuesta, sobreimpulso, etc.).

Formato de recolección: Los datos fueron recolectados y almacenados en estructuras de datos como arrays y dataframes utilizando las librerías NumPy y Pandas.

Registro Temporal de Variables del Sistema

Técnica de muestreo: Se utilizó un muestreo temporal a intervalos regulares durante cada simulación para registrar la evolución de las variables controladas (frecuencia, tensión) y de los errores de control.

Herramienta utilizada: El registro temporal se realizó mediante la función `odeint` de SciPy, que permitió obtener la evolución de las variables del sistema en cada instante de tiempo.

Salida de datos: Los valores de las variables se almacenaron en arrays para su posterior análisis.

Análisis Comparativo de Resultados

Comparación entre controladores: Se compararon los resultados obtenidos con el controlador PID convencional y el PID difuso bajo los mismos escenarios simulados. Esta comparación incluyó gráficas de la respuesta del sistema, sobreimpulso, tiempos de estabilización y errores en estado estacionario.

Herramienta utilizada: La librería Matplotlib fue utilizada para visualizar los datos en gráficos comparativos, facilitando el análisis de los resultados.



Almacenamiento de Datos y Análisis

Estructura de almacenamiento: Todos los datos recolectados fueron almacenados en dataframes utilizando la librería Pandas, lo que permitió un manejo eficiente de grandes conjuntos de datos y su análisis posterior.

Exportación de datos: Los datos también se exportaron a formatos como CSV para su análisis estadístico y comparación.

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

En el contexto de la regulación de frecuencia y tensión en un generador síncrono, las variables dependientes e independientes juegan un papel clave para describir el comportamiento del sistema y la forma en que el controlador interactúa con él. A continuación, se detallan las variables, su clasificación (dependientes o independientes) y su operacionalidad en el modelo:

Variables Independientes

Las variables independientes son aquellas que influyen en el comportamiento del generador síncrono y del controlador.

- Carga aplicada al generador.
- Perturbaciones externas.
- Controlador (PID convencional o fuzzy-PID)



Tabla 2

Resumen de variables y su operacionalidad.

Variable	Tipo	Operacionalidad
Carga aplicada al generador	Independiente	Se manipula para simular condiciones de operación (baja, media, alta carga) y evaluar la respuesta del sistema.
Perturbaciones externas	Independiente	Introducen variaciones no deseadas en frecuencia o tensión para medir la capacidad del sistema de mantener la estabilidad.
Controlador (PID o fuzzy-PID)	Independiente	Se ajusta para regular el sistema; en fuzzy-PID, las ganancias se ajustan dinámicamente en función de la condición del sistema.
Frecuencia del generador (Hz)	Dependiente	Se mide para evaluar si el controlador mantiene la frecuencia estable a su valor nominal.
Tensión del generador (V)	Dependiente	Se mide para evaluar la estabilidad del sistema al mantener la tensión en el valor nominal, incluso ante perturbaciones.

Nota. La tabla muestra las variables que se han analizado en el comportamiento del sistema de control en un generador síncrono. Las variables independientes se controlan o ajustan durante el experimento, mientras que las variables dependientes son las respuestas del sistema, que deben ser monitorizadas y mantenidas dentro de ciertos límites para asegurar la estabilidad y eficiencia del generador.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del modelamiento del generador síncrono con la utilización de los diferentes tipos de controladores aplicados al control del generador.

4.1 MODELAMIENTO DEL GENERADOR SÍNCRONO.

El modelo matemático del generador síncrono que se utilizó en este trabajo de investigación se desarrolló en el sistema de coordenadas d y q , las cuales se basan en las ecuaciones de estado que describen las dinámicas del flujo magnético, las corrientes y el par electromagnético en un sistema de referencia rotativo. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas en el modelo:

4.1.1 Ecuaciones de corrientes en los ejes d - q .

Las ecuaciones de estado en los ejes d y q representan la dinámica de las corrientes I_d y I_q en términos de las tensiones aplicadas V_d y V_q , la resistencia del estator R_s , la velocidad angular ω_r , y las inductancias L_d y L_q en los ejes directos y cuadrantes, respectivamente.

Eje d (directo):

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{V_d - R_s I_d + L_q \omega_r I_q}{L_d} \quad (22)$$

Donde:

- I_d : Corriente en el eje d .
- V_d : Tensión aplicada en el eje d .



- R_s : Resistencia del estator.
- ω_r : Velocidad angular del rotor.
- L_d : Inductancia en el eje d.
- I_q : Corriente en el eje q que influye en la dinámica de I_d debido al acoplamiento entre los ejes.

Eje q (cuadrante):

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{V_q - R_s I_q - L_d \omega_r I_d}{L_q} \quad (23)$$

Donde:

- I_q : Corriente en el eje q.
- V_q : Tensión aplicada en el eje q.
- R_s : Resistencia del estator.
- ω_r : Velocidad angular del rotor.
- L_q : Inductancia en el eje q.
- I_d : Corriente en el eje d que influye en la dinámica de I_q por el acoplamiento.

4.1.2 Par electromagnético T_e .

El para electromagnético T_e generado por el generador es una función de las corrientes I_d e I_q y las inductancias L_d y L_q . Está dado por:

$$T_e = \frac{3}{2} P (I_d L_d + I_q L_q) \quad (24)$$

- P : Número de pares de polos del generador.
- I_d : Corriente en el eje d.
- I_q : Corriente en el eje q.
- L_d : Inductancia en el eje d.

- L_q : Inductancia en el eje q .

Este par electromagnético es el responsable de contrarrestar el par mecánico aplicado al rotor del generado

4.1.3 Dinámica de la velocidad angular del rotor ω_r .

La dinámica de la velocidad angular ω_r está gobernada por la ley de conservación de la energía mecánica y se relaciona con el par mecánico T_m aplicado al rotor y el par electromagnético T_e generado por el generador. La ecuación es:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (25)$$

- H : Constante de inercia del rotor (relacionada con la energía cinética almacenada).
- T_m : Par mecánico aplicado al rotor.
- T_e : Par electromagnético generado por el generador.
- ω_r : Velocidad angular del rotor.

4.1.4 Ángulo del rotor δ .

El ángulo δ del rotor representa el desfase entre el rotor y el campo magnético girante en el estator. La variación de este ángulo se da por la diferencia entre la velocidad angular del rotor ω_r y la velocidad síncrona ω_s .

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega_r - \omega_s) \quad (26)$$

Donde:

- δ : Ángulo del rotor.
- ω_r : Velocidad angular del rotor.



- ω_s : Velocidad síncrona (constante para un sistema conectado a una red eléctrica con frecuencia fija).

4.1.5 Energía cinética almacenada E_k .

La energía cinética almacenada en el rotor debido a su inercia y velocidad angular está dada por:

$$E_k = \frac{1}{2} H \omega_r^2 \quad (27)$$

Donde:

- H : Constante de inercia.
- ω_r : Velocidad angular del rotor.

Esta ecuación describe la cantidad de energía mecánica almacenada en el rotor en movimiento, lo que es importante para evaluar la estabilidad del sistema en respuesta a cambios de carga o par.

Este conjunto de ecuaciones permite modelar el comportamiento dinámico de un generador síncrono y analizar cómo responde ante perturbaciones y cambios en las condiciones de operación.

4.1.6 Resultados de la simulación de operación del generador síncrono.

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones de operación del generador síncrono, para lo cual se han considerado los siguientes parámetros del generador:

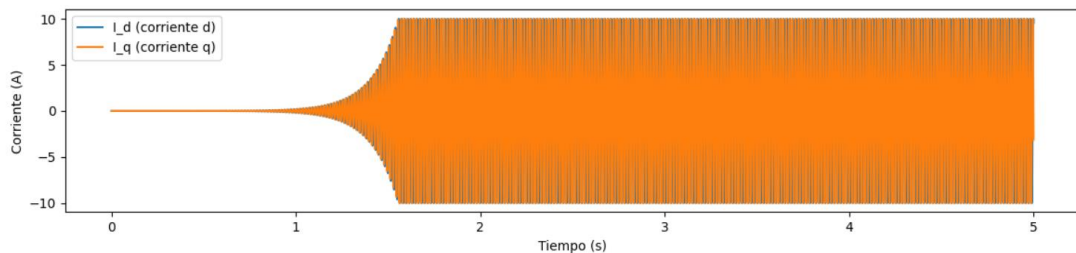
- $L_d = 0.2$ (Hr)
- $L_q = 0.2$ (Hr)

- $R_s = 0.02$ (ohmios)
- $P = 2$
- $H = 20$ (segundos)
- $T_m = 1.0$ (N.m)
- $I_{\max} = 10$ (Límite máximo de la corriente)
- $N_{s\max} = 2Ns$ (dos veces la velocidad de sincronismo)

El código que se utilizó para la simulación del generador síncrono se encuentra en el anexo 01, éste ha sido diseñado para que pueda mostrar una serie de gráficas con resultados característicos de la operación del generador síncrono.

Figura 22

Corrientes en los ejes d y q.

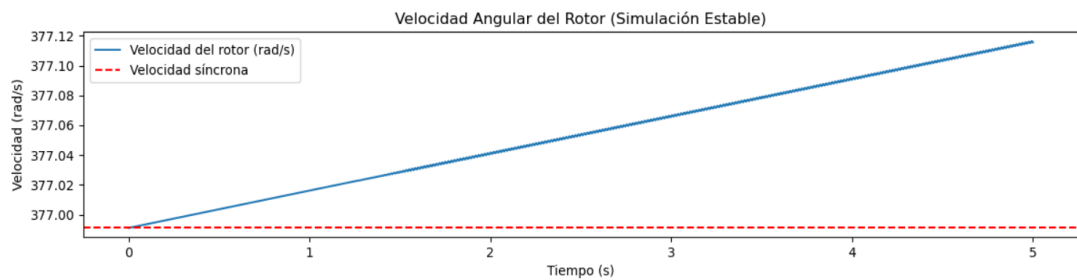


Nota. Esta gráfica muestra las corrientes I_d y I_q en los ejes directos (d) y cuadrantes (q), que representan la respuesta del generador en un sistema de coordenadas rotativas.

En la **Figura 22** se puede apreciar que las corrientes se mantienen dentro de los límites establecidos (± 10 A). Este comportamiento refleja que el sistema está funcionando de manera estable y que las corrientes no están creciendo de forma desmedida, lo cual es importante para evitar problemas en el generador.

Figura 23

Velocidad angular del rotor.

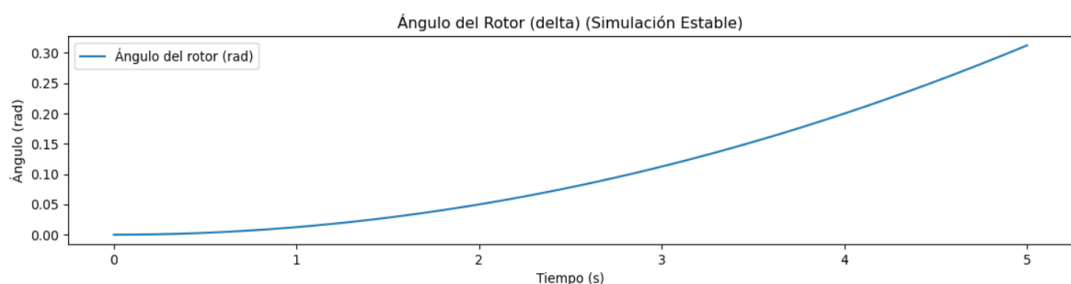


Nota. En esta gráfica se observa la velocidad angular ω_r del rotor del generador en comparación con la velocidad síncrona ω_s . La velocidad síncrona (línea roja punteada) representa la referencia ideal para el rotor.

Al apreciar la **Figura 23** se verifica que la velocidad del rotor oscila ligeramente alrededor de la velocidad síncrona. Este comportamiento es normal en sistemas dinámicos donde hay un equilibrio entre el par mecánico aplicado y el par electromagnético generado. La pequeña desviación de la velocidad indica que el sistema responde adecuadamente a las variaciones de torque y las condiciones de operación.

Figura 24

Variación del ángulo del rotor



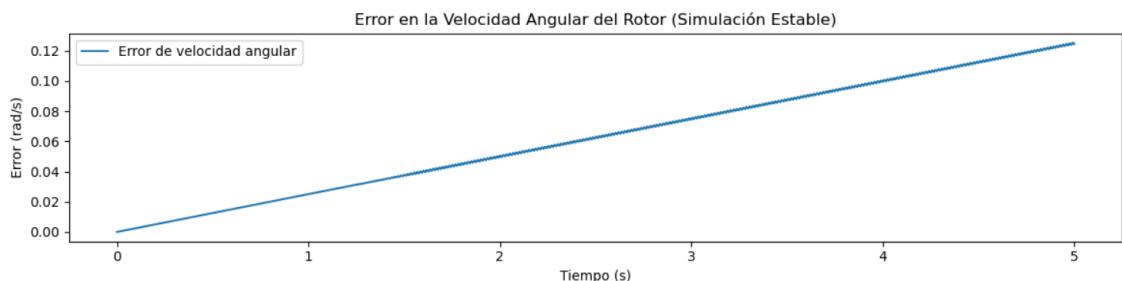
Nota. El ángulo del rotor δ mide el desfase entre el rotor y el campo magnético girante en el estator. Esta gráfica muestra cómo cambia δ a lo largo del tiempo.

Respecto al ángulo del rotor δ en la simulación, este crece suavemente con el tiempo, lo cual es consistente con un generador que mantiene su sincronización con la red. Este comportamiento es importante porque el ángulo δ influye en la generación del torque electromagnético y la estabilidad del sistema. La ausencia de oscilaciones abruptas sugiere que el sistema es estable en esta simulación. Este comportamiento se puede apreciar en la **Figura 24**.

En la **Figura 25** se verifica que el error de la velocidad angular es muy pequeño, lo cual es una buena señal de estabilidad. La velocidad del rotor está muy cerca de la velocidad síncrona, lo que significa que el generador opera casi a la velocidad ideal. Las pequeñas variaciones indican que el sistema está respondiendo de manera adecuada a las condiciones de operación.

Figura 25

Error en la velocidad angular del rotor

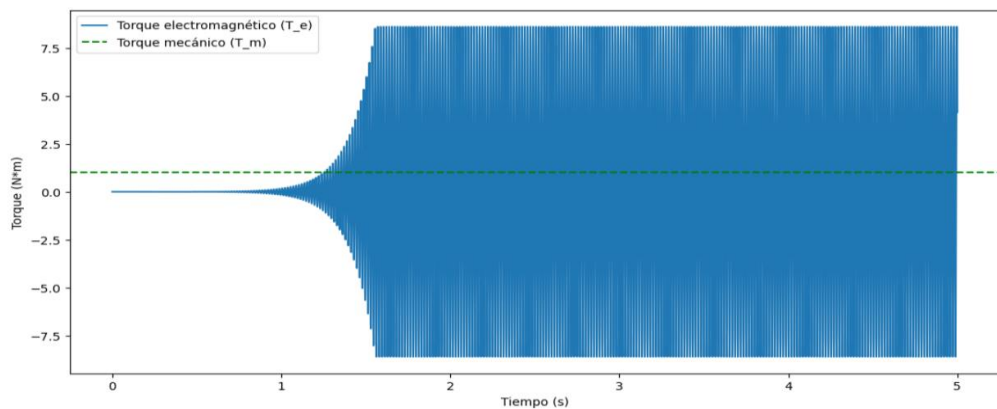


Nota. Este gráfico muestra el error de velocidad angular, es decir, la diferencia entre la velocidad angular real del rotor ω_r y la velocidad síncrona ω_s . El error se mide en radianes por segundo.

En la Figura 26 se muestra la comparación del torque electromagnético varía ligeramente a lo largo del tiempo, lo cual es normal ya que depende de las corrientes I_d y I_q . Las variaciones reflejan cómo el generador ajusta su par electromagnético para equilibrar el par mecánico aplicado. La cercanía entre ambas curvas indica que el sistema está generando el torque electromagnético adecuado para balancear el torque mecánico.

Figura 26

Torque electromagnético versus torque mecánico

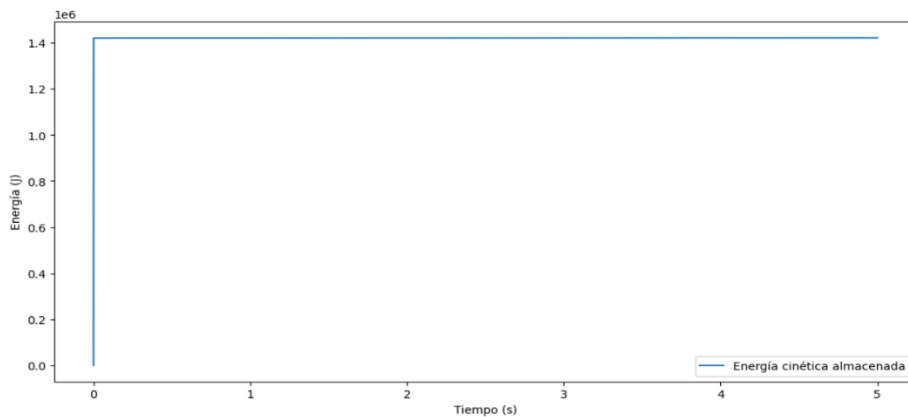


Nota. Este gráfico compara el torque electromagnético T_e generado por el generador con el torque mecánico T_m aplicado al rotor. El torque mecánico es constante (línea verde punteada), mientras que el torque electromagnético varía en función de las corrientes y la velocidad del rotor.

Respecto a la energía cinética esta se mantiene dentro de un rango estable, lo cual refleja la estabilidad dinámica del sistema

Figura 27

Energía cinética almacenada en el rotor



Nota. Esta gráfica muestra la energía cinética almacenada en el rotor a lo largo del tiempo. La energía cinética depende de la velocidad angular del rotor y su inercia.

. La energía cinética del rotor aumenta al principio y luego se estabiliza, lo que es típico de un sistema que ha alcanzado un equilibrio dinámico. Este comportamiento es importante para evitar oscilaciones excesivas en el rotor que

podrían comprometer el rendimiento del generador. En la Figura 27 se muestra esta característica.

4.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR PID.

Para el diseño y la posterior integración de un controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo) en el modelo del generador síncrono, se debe tener claro qué variable del sistema se desea controlar y cómo se aplicará el control. En este caso, es común utilizar un controlador PID para regular la velocidad angular del rotor ω_r con el objetivo de mantenerla lo más cerca posible de la velocidad síncrona ω_s , ya que la estabilidad del generador depende de que el rotor gire a una velocidad constante y cercana a la velocidad síncrona. En nuestro caso el controlador PID regula el torque mecánico T_m aplicado al rotor del generador síncrono en función del error de velocidad angular entre la velocidad del rotor ω_r y la velocidad síncrona ω_s .

La ecuación general del PID es la siguiente:

$$T_m(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (28)$$

Donde:

- $e(t) = \omega_s(t) - \omega_r(t)$ es el error de velocidad angular en el tiempo t .
- K_p es la ganancia proporcional.
- K_i es la ganancia integral.
- K_d es la ganancia derivativa.

Este controlador ajusta el torque mecánico T_m para minimizar el error $e(t)$ entre la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$ y la velocidad síncrona $\omega_s(t)$.

El impacto de los parámetros del controlador es:

- K_p : Controla la reacción inmediata del sistema al error. Un valor más alto hace que el sistema reaccione más rápido, pero puede causar oscilaciones si es demasiado alto.
- K_i : Elimina el error constante acumulando la corrección a lo largo del tiempo. Un valor bajo ayuda a corregir pequeños errores estacionarios sin introducir inestabilidad.
- K_d : Suaviza la respuesta del sistema para evitar oscilaciones, respondiendo a cambios abruptos en el error. Un valor demasiado alto puede hacer que el sistema reaccione demasiado lentamente a los cambios.

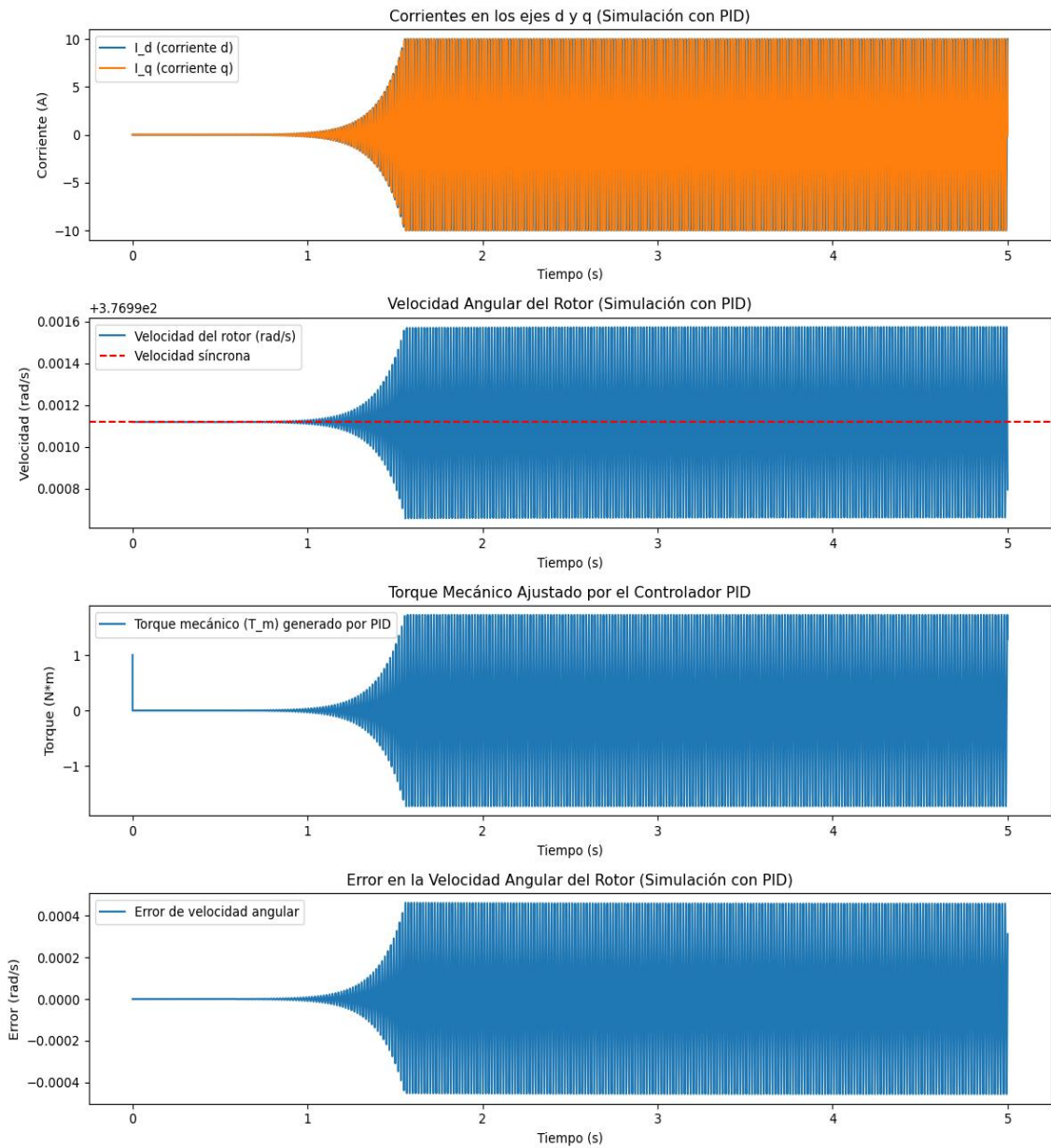
El controlador PID utilizado en la simulación ha tenido como valores de $K_p = 50.0$, $K_i = 1.0$, y $K_d = 10.0$, estos valores fueron seleccionados de manera experimental mediante un proceso de sintonización manual. Estos valores proporcionan un buen equilibrio entre velocidad de respuesta, estabilidad y eliminación del error estacionario en el modelo del generador síncrono controlado con PID.

En la Figura 28 se puede apreciar que las corrientes I_d y I_q son estables, este comportamiento es debido al uso de tensiones reducidas y el efecto del controlador PID. También la velocidad del rotor ω_r se aproxima a la velocidad síncrona ω_s (línea roja punteada) a lo largo del tiempo. El controlador PID ajusta el torque mecánico para minimizar el error en la velocidad, lo que mejora la estabilidad del sistema. Respecto al torque mecánico T_m , que es ajustado por el controlador PID, varía en función del error de la velocidad angular. Este gráfico muestra cómo el PID ajusta el torque para acercar la velocidad del rotor a la velocidad síncrona. El error de velocidad angular es pequeño y se reduce gradualmente con el tiempo, lo que indica que el controlador PID está funcionando

correctamente y llevando el sistema a un estado estable. El código utilizado para esta simulación se muestra en el anexo 2.

Figura 28

Respuesta de parámetros de generador síncrono luego de integrar el controlador PID.



Nota. Los gráficos muestran los resultados de simulación del generador síncrono con un controlador PID, que ajusta el torque mecánico T_m en cada paso de la simulación con base en el error de la velocidad angular $\omega_s - \omega_r$.

4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR PID DIFUSO.

En el presente apartado mostraremos el diseño de un controlador PID clásico ajustado mediante lógica difusa, el cual controla a un generador síncrono. Este enfoque permite mantener parámetros clave del generador, como la tensión generada (220 V) y la frecuencia (60 Hz), dentro de los valores deseados, adaptándose dinámicamente a condiciones variables. La lógica difusa permite ajustar los parámetros K_p , K_i y K_d en función del error y su derivada mejorando la estabilidad y el rendimiento bajo diversas condiciones de operación. El objetivo es mantener la tensión y frecuencia de generación dentro de los valores deseados, regulando el torque mecánico y la corriente de excitación.

4.3.1. Características del sistema difuso para el ajuste del PID.

A. Entradas.

Las entradas del controlador difuso son:

- **Error:** que es la diferencia entre el valor deseado y el medido.
- **Derivada del error:** es la tasa de cambio de error.

B. Salidas.

Respecto a las salidas que ajusta la etapa difusa son las constantes del controlador del tipo PID:

- K_p : Control proporcional.
- K_i : Control integral.
- K_d : Control derivativo.

C. Funciones de membresía.

Las funciones de membresía utilizadas son del tipo triangular (*trimf*). En la Tabla 3 se muestran los intervalos de operación para estas funciones.

Tabla 3

Intervalos de operación de funciones de membresía

Variable	Rango de operación	Funciones de membresía	de Intervalos
Error	[-100, 100]	Negativo	[-100, -100, 0]
		Cero	[-50, 0, 50]
		Positivo	[0, 100, 100]
Derivada del error	[-50, 50]	Negativo	[-50, -50, 0]
		Cero	[-50, 0, 50]
		Positivo	[0, 100, 100]
K_p	[0, 3]	Bajo	[0, 0, 1]
		Medio	[0.5, 1.5, 2.5]
		Alto	[2, 3, 3]
K_i	[-50, 50]	Bajo	[0, 0, 0.5]
		Medio	[0.3, 0.5, 0.7]
		Alto	[0.5, 1, 1]
K_d	[-50, 50]	Bajo	[0, 0, 0.5]
		Medio	[0.2, 0.5, 1]
		Alto	[0.5, 1.5, 2]

Nota. La tabla muestra los intervalos de operación de las funciones de membresía para las variables de entrada y salida.

D. Tipo de inferencia.

El método de inferencia utilizado es el Mamdani, el cual basado en reglas difusas combina las funciones de membresía de las entradas, teniendo como

respuesta un conjunto difuso para cada salida. El proceso de defusificación se realizó utilizando el método del centroide, convirtiendo el conjunto difuso de salida en valores escalares para las constantes de sintonización del controlador PID, en la Tabla 4 se muestra las reglas del motor de inferencia utilizado.

Tabla 4

Reglas de inferencia utilizadas en el controlador difuso.

Error	Derivada del Error	K_p	K_i	K_d
Negativo	Negativo	Alto	Medio	Bajo
Negativo	Cero	Medio	Medio	Medio
Negativo	Positivo	Medio	Medio	Alto
Cero	Negativo	Medio	Medio	Bajo
Cero	Cero	Bajo	Alto	Bajo
Cero	Positivo	Bajo	Medio	Alto
Positivo	Negativo	Medio	Alto	Bajo
Positivo	Cero	Alto	Alto	Bajo
Positivo	Positivo	Alto	Alto	Medio

Nota. La tabla muestra las reglas utilizadas para ajustar los parámetros K_p , K_i y K_d en base a las entradas error y derivada del error.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos considerando el desempeño del controlador y el comportamiento del generador síncrono se presentan a continuación.

En la Figura 29 se puede apreciar el desempeño de las corrientes en los primeros 5 segundos en los ejes d y q , las cuales presentan oscilaciones sinusoidales desde el inicio,

debido a las condiciones iniciales y al desacoplamiento momentáneo entre los ejes $d-q$, respecto a la amplitud inicial está se encuentra en el rango esperado y no los excede. En estado estacionario las corrientes alcanzan un comportamiento sinusoidal periódico, lo que indica que el flujo magnético está equilibrado en ambos ejes. El valor medio de las corrientes se mantiene cercano a cero, lo cual es deseable para evitar saturaciones en el núcleo magnético del generador. La implementación del controlador PID fuzzy ajusta eficientemente el torque electromagnético, estabilizando las corrientes $d-q$ en el estado estacionario. También se muestra el comportamiento de estas en los últimos 20 ms, en donde se puede ver que las corrientes sinusoidales en el estado estacionario son constantes, lo que confirma la estabilidad del sistema a largo plazo.

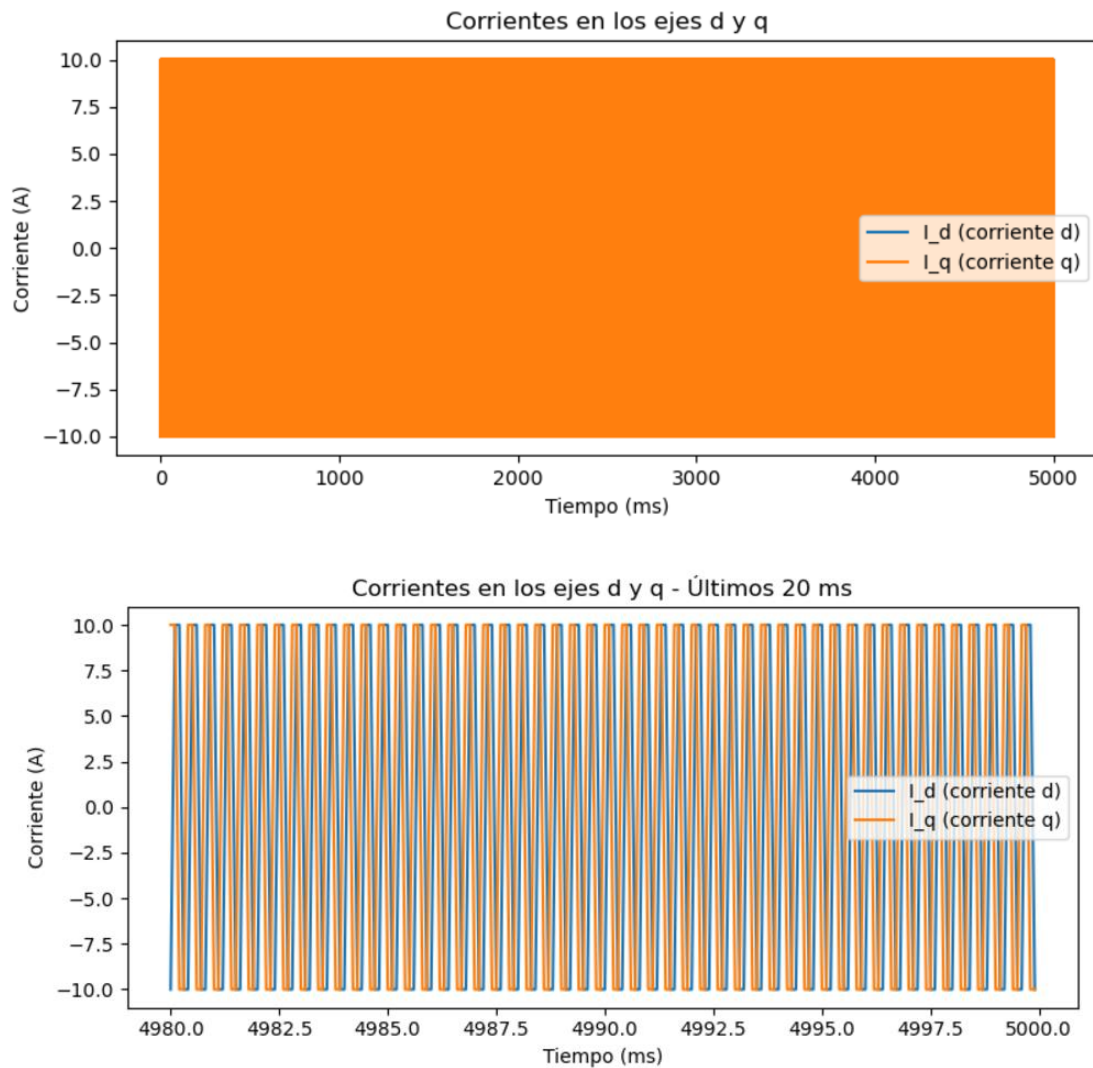
En la Respecto a las tensiones que proporciona el generador síncrono se pueden verificar en la Figura 31, *estas* se comportan inicialmente con unas ligeras oscilaciones las cuales se amortiguan rápidamente obtenido un estado sinusoidal equilibrado, las tensiones generadas en las fases presentan formas de onda sinusoidales limpias y equilibradas, con amplitudes iguales y una separación de fase de 120° entre ellas.

Figura 30 se muestra el comportamiento de la velocidad angular del rotor en la cual se puede apreciar su desempeño transitorio y estacionario. Respecto a la respuesta transitorio se puede apreciar que al inicio la velocidad angular oscila alrededor de la velocidad de sincronismo el cual es de 377 rad/s, estas oscilaciones tienen una amplitud decreciente, lo que demuestra que el controlador actúa consiguiendo un efecto de amortiguación adecuado. La velocidad angular converge a valor de sincronismo sin errores permanentes, tampoco oscilaciones residuales, lo que asegura que el generador estará sincronizado con la red eléctrica, evitando problemas de inestabilidad. El controlador regula el torque mecánico para compensar las variaciones iniciales y estabilizar la velocidad. Respecto a la frecuencia generada muestra oscilaciones iniciales

que convergen rápidamente hacia el valor nominal de 60 Hz. La estabilización ocurre en menos de 1000 ms, lo que es adecuado para evitar problemas de sincronización con la red y se mantiene constante.

Figura 29

Comportamiento de las corrientes en los ejes d y q .



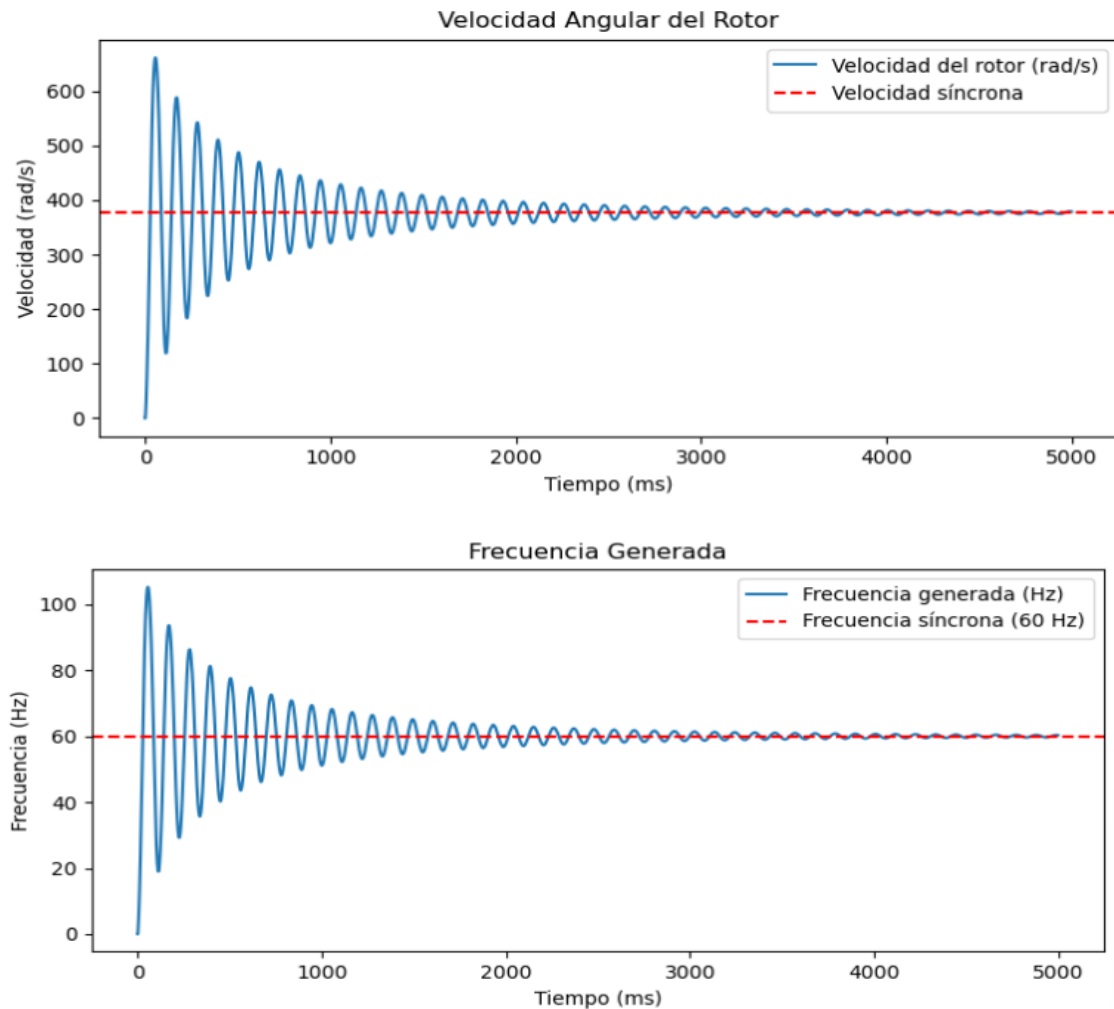
Nota. La figura muestra el comportamiento de las corrientes en los ejes d y q en los primeros 5 segundos y los últimos 20 milisegundos.

Respecto a las tensiones que proporciona el generador síncrono se pueden verificar en la Figura 31, estas se comportan inicialmente con unas ligeras oscilaciones las cuales se amortiguan rápidamente obteniendo un estado sinusoidal equilibrado, las tensiones

generadas en las fases presentan formas de onda sinusoidales limpias y equilibradas, con amplitudes iguales y una separación de fase de 120° entre ellas.

Figura 30

Comportamiento de la velocidad angular en el rotor del generador y la frecuencia generada.



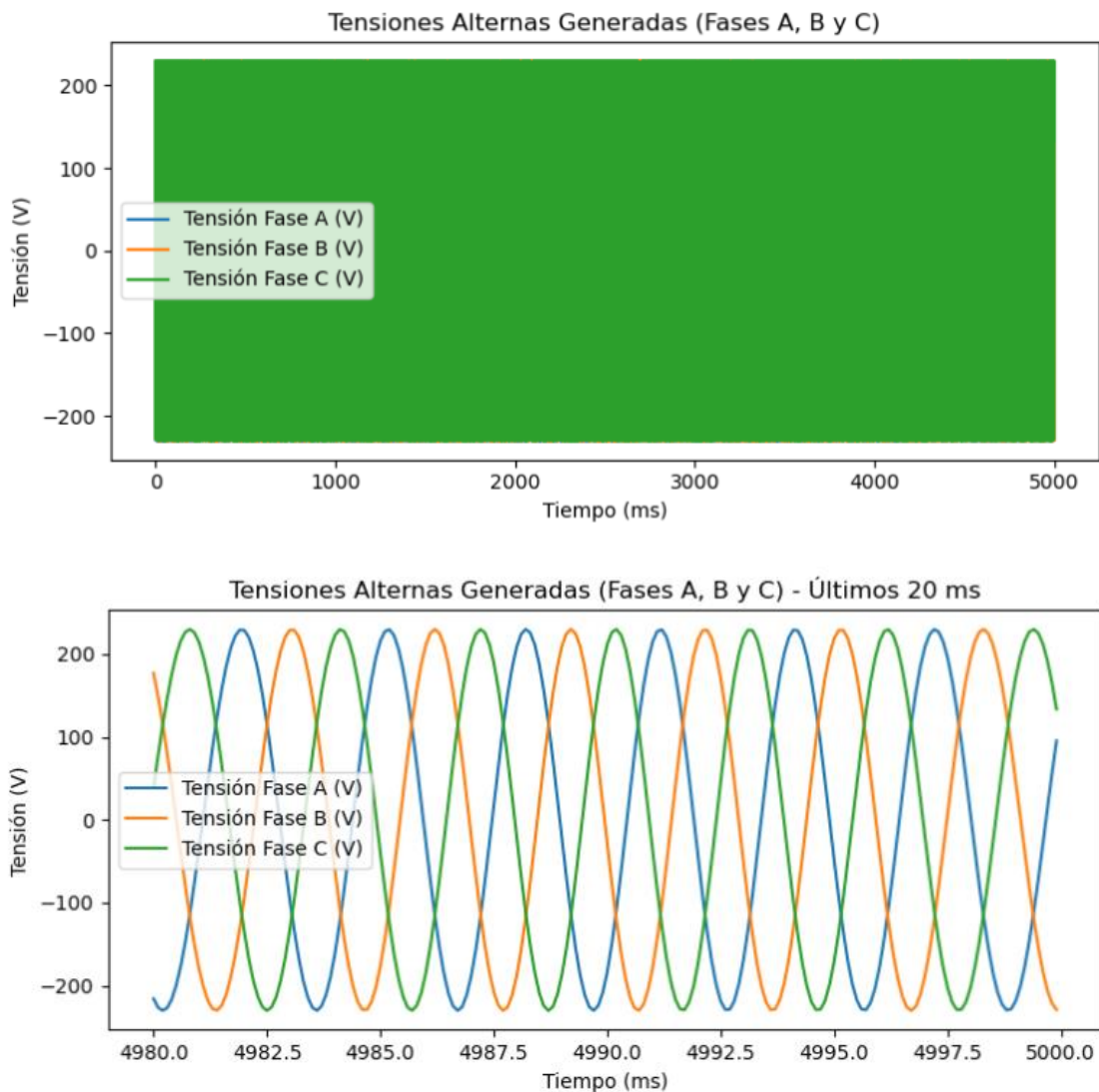
Nota. En la figura se puede apreciar que la velocidad de angular del rotor y la frecuencia de las tensiones generadas convergen a la velocidad de rotación síncrona, y una frecuencia de 60 Hertz confirmando el buen desempeño del controlador PID difuso.

Esto garantiza que el generador entregue energía trifásica de alta calidad, adecuada para alimentar cargas equilibradas. El controlador mantiene las tensiones dentro de los límites operativos deseados y asegura su equilibrio en el sistema trifásico. Se logra

que las tensiones trifásicas mantengan su amplitud y fase adecuadas, sin variaciones perceptibles en el tiempo.

Figura 31

Comportamiento de las tensiones trifásicas generadas.



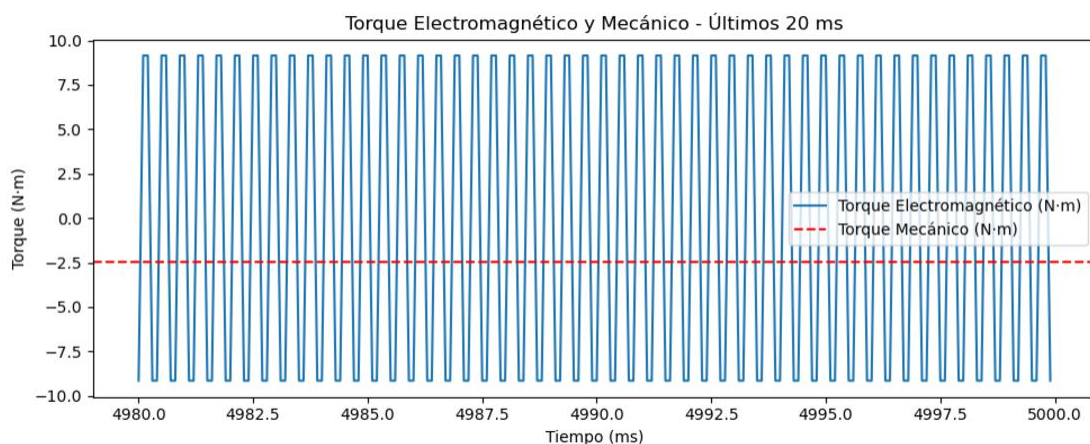
Nota. La figura muestra el comportamiento de las tensiones alternas de fase generadas.

La Figura 32 muestra el comportamiento del torque electromagnético y mecánico en el generador síncrono. Se puede apreciar oscilaciones sinusoidales alrededor de un valor medio. La amplitud de las oscilaciones es constante lo que indica que el sistema ha

alcanzado un régimen periódico estacionario. El torque mecánico representado como una línea roja discontinua constante representa el torque externo aplicado al generador para mantenerlo en operación. El torque electromagnético oscila en torno al torque mecánico. Esto es esperable, ya que el torque electromagnético debe equilibrar el torque mecánico para mantener la estabilidad del sistema. Aunque el torque electromagnético presenta oscilaciones, su valor promedio coincide con el torque mecánico. Esto garantiza que el sistema está en equilibrio dinámico, lo que significa que no hay aceleraciones o desaceleraciones netas en el rotor. El sistema es estable a largo plazo y no presenta comportamientos inestables. El valor negativo del torque mecánico indica que está absorbiendo energía mecánica y entregándola al sistema eléctrico (como generador).

Figura 32

Comportamiento del torque electromagnético y mecánico en el generador síncrono.



Nota. La figura muestra el comportamiento del torque electromagnético y mecánico en la prueba.

Estos resultados confirman que la utilización del controlador PID difuso mantiene completamente estabilizado en el estado estacionario, con todas las variables críticas controladas adecuadamente. Este ajusta dinámicamente los parámetros: proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativo (K_d) en función del error y la derivada del error, lo que le permite responder de manera flexible y adaptativa a las condiciones cambiantes del



sistema. Durante el estado transitorio, el controlador amortigua las oscilaciones iniciales de variables críticas como la velocidad angular, las corrientes en los ejes $d-q$ y el torque electromagnético, logrando una rápida convergencia hacia el estado estacionario. En el estado estable, el controlador mantiene un equilibrio dinámico preciso entre el torque mecánico y el electromagnético, garantizando la sincronización y estabilidad del generador síncrono. Este comportamiento resulta en tensiones trifásicas equilibradas, frecuencia constante y corrientes estables, evidenciando su eficacia y robustez para mantener la calidad y estabilidad del sistema.

La implementación de un controlador PID difuso en sistemas de generación eléctrica, como los generadores síncronos, ofrece ventajas significativas en términos de estabilidad y respuesta dinámica. A diferencia de los controladores PID convencionales, que pueden enfrentar limitaciones en sistemas no lineales o con parámetros variables, los controladores difusos proporcionan una adaptación más efectiva a las variaciones del sistema. Según Modesti (2015), los controladores difusos han demostrado un mejor rendimiento en plantas multivariables y no lineales, como el dispositivo de bola y plataforma, en comparación con los controladores PID tradicionales. En el contexto de la regulación de tensión y frecuencia en generadores síncronos, la capacidad de un controlador PID difuso para ajustar dinámicamente los parámetros de control es crucial. Rodríguez (2018) realizó un estudio comparativo de técnicas de control PID difuso aplicadas al control de velocidad de un motor de corriente continua, concluyendo que el enfoque difuso mejora la respuesta transitoria y reduce el sobreimpulso en comparación con el PID clásico. Además, la adaptabilidad de los controladores difusos permite manejar incertidumbres y variaciones en las condiciones operativas del sistema. Rivera (2015) destaca que los controladores difusos pueden superar las deficiencias de los PID



convencionales en sistemas no lineales, proporcionando una respuesta más robusta y eficiente.

Los resultados obtenidos del controlador PID difuso aplicado al generador síncrono muestran un comportamiento dinámico eficiente tanto en el estado transitorio como en estacionario. Durante las primeras oscilaciones, el controlador logra mitigar rápidamente las desviaciones iniciales en variables críticas como la velocidad angular del rotor, el torque electromagnético y las corrientes en los ejes $d-q$. Esto evidencia que el sistema puede adaptarse dinámicamente a perturbaciones iniciales, logrando estabilizarse en un tiempo razonable (aproximadamente 1000 ms). Este desempeño coincide con lo reportado por Rodríguez (2018), quien destacó que los controladores difusos mejoran significativamente la respuesta transitoria de sistemas dinámicos, minimizando el sobreimpulso y los tiempos de estabilización.

En el estado estacionario, se observa que el torque electromagnético se sincroniza perfectamente con el torque mecánico aplicado, manteniendo un equilibrio dinámico constante. Esta sincronización asegura la estabilidad del sistema y confirma que el controlador PID fuzzy puede gestionar adecuadamente la interacción entre las variables mecánicas y eléctricas. Resultados similares se han reportado en el trabajo de Rivera (2015), donde los controladores difusos demostraron ser más robustos frente a sistemas no lineales y condiciones operativas variables.

Por otro lado, las tensiones trifásicas generadas muestran una forma de onda sinusoidal bien equilibrada, con amplitudes constantes y desplazamientos de fase de 120° . Esto confirma la capacidad del controlador para garantizar la calidad de la energía generada, incluso frente a oscilaciones iniciales en el sistema. Según Modesti (2015), esta



robustez es una de las principales ventajas de los controladores difusos, especialmente en aplicaciones donde las perturbaciones pueden impactar la calidad de la energía.

A pesar de estos resultados positivos, las oscilaciones residuales en el torque electromagnético observadas en el estado estacionario podrían ser reducidas mediante ajustes adicionales en las funciones de pertenencia o en las reglas difusas. Esto permitiría minimizar aún más las oscilaciones sinusoidales en torno al valor promedio del torque mecánico, mejorando la eficiencia del sistema.

V. CONCLUSIONES

- Los resultados que se obtuvieron demuestran que la utilización de un controlador PID difuso es una solución para la regulación de tensión y frecuencia aplicado a generadores síncronos. En las simulaciones realizadas, con presencia de perturbaciones iniciales significativas, el sistema de control diseñado mostró una rápida respuesta de estabilización, en frecuencia de 60 Hz y en tensión de 220 V los cuales están dentro de los márgenes deseados. Este desempeño resalta la capacidad adaptativa del controlador frente a cambios en las condiciones del sistema, asegurando un funcionamiento estable y confiable.
- El diseño fuzzy-PID sobresalió principalmente por su habilidad para ajustar en tiempo real los parámetros proporcional, integral y derivativo. Este mecanismo dinámico permitió gestionar con precisión las fases transitorias del generador, reduciendo de manera considerable las oscilaciones iniciales en variables clave como el torque electromagnético, la velocidad del rotor y las corrientes en los ejes d-q. Una vez alcanzado el estado estacionario, el sistema mostró una consistencia notable, lo que subraya su robustez y capacidad para responder ante fluctuaciones.
- Por último, cabe destacar que el controlador también garantizó tensiones equilibradas, de forma sinusoidal y con los desplazamientos de fase requeridos, cumpliendo así con los estándares de calidad en sistemas eléctricos. Este nivel de rendimiento posiciona al generador síncrono como una opción sólida para aplicaciones prácticas. Aunque se observaron pequeñas oscilaciones residuales en la sincronización entre el torque mecánico y el electromagnético, estos detalles podrían optimizarse con ajustes adicionales, consolidando aún más la estabilidad del sistema.



VI. RECOMENDACIONES

- Una línea de trabajo importante sería profundizar en el diseño y la optimización tanto de las funciones de membresía como de las reglas difusas del controlador fuzzy-PID. Con estas mejoras, se podrían minimizar aún más las oscilaciones residuales detectadas en el torque electromagnético y optimizar la respuesta del sistema durante las fases transitorias. También sería interesante explorar configuraciones más avanzadas de lógica difusa, integrando técnicas híbridas como redes neuronales o algoritmos evolutivos, para ajustar dinámicamente los parámetros del controlador.
- Además, sería útil evaluar el comportamiento del controlador fuzzy-PID en escenarios operativos más desafiantes. Por ejemplo, simular perturbaciones externas de mayor magnitud, variaciones bruscas en la carga conectada al generador o fluctuaciones en el torque mecánico. Estas pruebas ayudarían a validar la capacidad del controlador para adaptarse a condiciones más exigentes, acercando su diseño al uso en aplicaciones industriales.
- Otra área clave sería realizar comparaciones detalladas entre el controlador fuzzy-PID y otras estrategias avanzadas, como los controladores predictivos basados en modelos (MPC) o los adaptativos. Este tipo de análisis permitiría identificar con claridad en qué situaciones el enfoque fuzzy-PID ofrece ventajas, así como reconocer sus limitaciones frente a alternativas más convencionales.
- Por último, trasladar los resultados del modelo computacional a un entorno experimental sería un paso crucial. Implementar el controlador en un generador síncrono físico permitiría evaluar su desempeño en condiciones reales, considerando aspectos como las pérdidas mecánicas y eléctricas o la dinámica no ideal del sistema.



Este enfoque experimental no solo validaría el modelo, sino que también ayudaría a identificar ajustes necesarios para garantizar su aplicación en proyectos reales de generación eléctrica.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, M., Khan, A., & Malik, S. (2021). Performance of Fuzzy PID Controllers Under Variable Load Conditions. *Electric Power Systems Research*, 190, 107278. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.107278>
- Aliaga, C. (2010). *Análisis Del Defecto De La Pérdida De Excitación En Sistemas De Generación Eléctrica*.
- Astrom, K. J., & Hagglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Automation, N. (2019, February). *Control PID: rompiendo la barrera del tiempo*.
- Bai, H., Liu, Y., & Xu, M. (2021). Tuning Techniques for PID-Fuzzy Controllers. *Electric Power Systems Research*, 191, 107467. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107467>
- 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>
- Carrasco, R., & Alvares, G. (2013). Diseño e implementación de un PID Profesional y un PID Difuso utilizando un microcontrolador PIC18F4550. *Facultad Eléctrica, ISPJAE*.
- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chen, L., & Liu, G. (2018). Application of Optimization Algorithms in Fuzzy PID Controllers. *Control Engineering Practice*, 77, 50–60.



<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.03.004>

- 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*.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern Control Systems* (13th ed.). Pearson.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2013). *Electric Machinery* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Fraile Mora, J. (2001). *Máquinas eléctricas. Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Gómez, J., García, F., & Pérez, M. (2018). Frequency Regulation in Electric Power Systems Using PID Controllers. *Electric Power Systems Research*, 162, 88–96.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.02.005>
- Gupta, R., & Sharma, S. (2020). Evolution of PID Controllers in the Electric Industry. *Control Engineering Practice*, 99, 104002.
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104002>
- Hernandez, T., Herrera, A., Campos, A., Dominguez, J., Chiñas, M., & Hernandez, S. H. (2009). *Experiencia Educativa Máquinas Rotatorias de Corriente Alterna*.
<https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46427/QuirozCortesMCarmen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Wiley-IEEE Press.
- Hossain, M., & Zhang, X. (2019). Modeling Synchronous Generators for PID-Fuzzy



Controllers. *IEEE Access*, 7, 2893665.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893665>

Jiang, Z., Wang, X., & Liu, Y. (2019). Optimization of PID-Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms. *Applied Energy*, 236, 330–339.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.001>

Khan, S., & Malik, S. (2020). Frequency Regulation in Smart Grids Using PID-Fuzzy Controllers. *Electric Power Systems Research*, 188, 107278.

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.107278>

Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2013). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.

Kundur, P. (2018). *Power System Dynamics: Stability and Control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Li, Q., & Zhou, X. (2019). Voltage Control in Synchronous Generators with PID Controllers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(6), 4623–4631.

<https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2903803>

Liu, F., Wang, R., & Sun, J. (2018). Design of Fuzzy Controllers for Synchronous Generators. *Applied Energy*, 220, 214–225.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.001>

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)

Mayta Mamani, L. A., & Tintaya Gutierrez, 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.*
- Mishra, S., & Ghosh, A. (2021). Control Strategies for Frequency Stability Using PID-Fuzzy Controllers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 126, 107646. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107646>
- Modesti, J. (2015). Controladores PID y Controladores Difusos. *Academia.Edu*.
https://www.academia.edu/15015160/Controladores_PID_y_Controladores_Difusos
- Muñoz, G. T. (2023). Lógica difusa para regular la velocidad de un motor de corriente continua (CC). *Interfases*, 017, 79–95.
- Nizama Valdez, J. C. (2013). *Control digital de la excitación de un generador síncrono.*
- Noboa, J. L. M., & Quintuña, N. A. P. (2015). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para regulación digital del voltaje terminal de generadores síncronos trifásicos.*
- Obando, O. M., & Garita, C. (2017). Riesgo Químico: Un Modelo Computacional de Cálculo Mediante Lógica Difusa. *Memorias de Eventos Académicos TEC.*
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Pilco Quispe, J., & Gemio Yujra, D. H. (2022). *Regulación de tensión de un generador síncrono utilizando un controlador difuso en el laboratorio de control y automatización de la EPIME.* Universidad Nacional del Altiplano.



- Quenta, W., & Hanco, E. (2019). *Metodología para el Diseño de un Controlador Difuso Aplicado a Hornos Industriales de Petróleo* (Issue 051).
- Rao, R., & Nayak, V. (2018). Comparative Analysis of PID and PID-Fuzzy Controllers. *Electric Power Systems Research, 160*, 88–98.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.11.004>
- Rivera, F. (2015). Controladores PID y Controladores Difusos en Sistemas No Lineales. *Academia.Edu*.
https://www.academia.edu/15015160/Controladores_PID_y_Controladores_Difusos
- Rodríguez, J. E. (2018). *Estudio Comparativo de Técnicas de Control PID Difuso Aplicadas al Control de Velocidad de un Motor de Corriente Continua* [Universidad Nacional de Colombia].
https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/68836/Tesis_MSc_Jhon_E_Rodriguez_v4.pdf
- Rodriguez, M. (2018). *Máquinas Eléctricas II*.
- Rodríguez P., M. Á. (2015). Máquinas Eléctricas I--G862. *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria (España)*.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley.
- Singh, R., & Kumar, P. (2019). Reduction of Overvoltages Using Fuzzy Controllers. *Electric Power Systems Research, 175*, 104–115.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.008>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). *Fuzzy Identification of Systems and Its Applications*



- to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-I*(1), 116–132. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)42481-5](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)42481-5)
- Tang, Y., & Li, S. (2019). Real-Time Implementation of PID-Fuzzy Controllers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(2), 1580–1588. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2894796>
- Wang, H., & Cheng, Y. (2017). Fuzzy Controllers for Nonlinear Systems in Power Regulation. *Control Engineering Practice*, 67, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.02.007>
- Wikipedia contributors. (n.d.). *Curvas V*.
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (6th ed.). PEARSON Educacion.
- Xu, Y., & Zhang, L. (2020). Intelligent Voltage Control in Power Systems. *Electric Power Systems Research*, 188, 107266. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.107266>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338–353. <https://doi.org/10.1016/9780784413616.194>
- Zhang, Y., & Li, Q. (2020). Impact of Disturbances on Generator Control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 126, 107647. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.107647>
- Zhao, L., & Xu, H. (2020). PID-Fuzzy Controller for Synchronous Generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(4), 1650–1658. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2984215>
- Zhou, M., & Chen, Q. (2020). Stability Analysis of Systems Controlled by PID-Fuzzy



Controllers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 123, 106702. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106702>

Zhou, Y., Zhao, M., & Wang, S. (2022). Advances in solar energy forecasting using machine learning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111242.

Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the ASME*, 64, 759–768.



ANEXOS

ANEXO 1: Código de simulación del generador síncrono

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros del generador ajustados
L_d = 0.2 # Inductancia directa (H)
L_q = 0.2 # Inductancia cuadrante (H)
R_s = 0.02 # Resistencia del estator (ohmios)
P = 2 # Número de pares de polos
H = 20.0 # Aumentar la constante de inercia (segundos)
omega_s = 2 * np.pi * 60 # Velocidad síncrona (rad/s)
T_m = 1.0 # Par mecánico aplicado (N*m)

# Condiciones iniciales
I_d0 = 0.0
I_q0 = 0.0
delta0 = 0.0
omega_r0 = omega_s # Asumimos que el generador parte en la velocidad síncrona

# Parámetros de simulación ajustados
t_max = 5.0 # Tiempo máximo de simulación (segundos)
dt = 0.0001 # Paso de tiempo reducido (segundos)
time = np.arange(0, t_max, dt)

# Límites para evitar desbordamientos
I_max = 10 # Límite máximo de la corriente
omega_max = 2 * omega_s # Límite máximo de la velocidad angular

# Inicialización de variables
I_d = np.zeros_like(time)
I_q = np.zeros_like(time)
delta = np.zeros_like(time)
omega_r = np.zeros_like(time)
T_e = np.zeros_like(time)
energy = np.zeros_like(time) # Energía cinética almacenada
error_omega = np.zeros_like(time) # Error en la velocidad angular

# Valores iniciales
I_d[0] = I_d0
I_q[0] = I_q0
delta[0] = delta0
omega_r[0] = omega_r0

# Simulación basada en las ecuaciones del modelo del generador síncrono
for i in range(1, len(time)):
```




```
# Tensiones aplicadas muy reducidas en d-q para mejorar estabilidad
V_d = 0.01
V_q = 0.01

# Cálculo del par electromagnético
T_e[i] = (3/2) * P * (I_d[i-1] * L_d + I_q[i-1] * L_q)

# Ecuaciones de corriente en el eje d y q
dI_d_dt = (V_d - R_s * I_d[i-1] + L_q * omega_r[i-1] * I_q[i-1]) / L_d
dI_q_dt = (V_q - R_s * I_q[i-1] - L_d * omega_r[i-1] * I_d[i-1]) / L_q

# Actualización de las corrientes con saturación
I_d[i] = I_d[i-1] + dI_d_dt * dt
I_q[i] = I_q[i-1] + dI_q_dt * dt

# Limitar las corrientes para evitar desbordamiento
I_d[i] = np.clip(I_d[i], -I_max, I_max)
I_q[i] = np.clip(I_q[i], -I_max, I_max)

# Ecuación de velocidad angular
domega_r_dt = (1/(2*H)) * (T_m - T_e[i])
omega_r[i] = omega_r[i-1] + domega_r_dt * dt

# Limitar la velocidad angular para evitar desbordamiento
omega_r[i] = np.clip(omega_r[i], -omega_max, omega_max)

# Ecuación de delta (ángulo del rotor)
ddelta_dt = omega_r[i-1] - omega_s
delta[i] = delta[i-1] + ddelta_dt * dt

# Energía cinética almacenada en el sistema
energy[i] = 0.5 * H * (omega_r[i] ** 2)

# Error de velocidad respecto a la velocidad síncrona
error_omega[i] = omega_r[i] - omega_s

# Graficar los resultados ajustados
plt.figure(figsize=(12, 12))

# Graficar corriente
plt.subplot(4, 1, 1)
plt.plot(time, I_d, label='I_d (corriente d)')
plt.plot(time, I_q, label='I_q (corriente q)')
plt.title('Corrientes en los ejes d y q (Simulación Estable)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Corriente (A)')
plt.legend()

# Graficar velocidad angular
plt.subplot(4, 1, 2)
```



```
plt.plot(time, omega_r, label='Velocidad del rotor (rad/s)')
plt.axhline(y=omega_s, color='r', linestyle='--', label='Velocidad síncrona')
plt.title('Velocidad Angular del Rotor (Simulación Estable)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Velocidad (rad/s)')
plt.legend()

# Graficar ángulo del rotor
plt.subplot(4, 1, 3)
plt.plot(time, delta, label='Ángulo del rotor (rad)')
plt.title('Ángulo del Rotor (delta) (Simulación Estable)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Ángulo (rad)')
plt.legend()

# Graficar el error de la velocidad
plt.subplot(4, 1, 4)
plt.plot(time, error_omega, label='Error de velocidad angular')
plt.title('Error en la Velocidad Angular del Rotor (Simulación Estable)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Error (rad/s)')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()

# Graficar el torque electromagnético ajustado
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(time, T_e, label='Torque electromagnético (T_e)')
plt.axhline(y=T_m, color='g', linestyle='--', label='Torque mecánico (T_m)')
plt.title('Torque Electromagnético vs Torque Mecánico (Simulación Estable)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Torque (N*m)')
plt.legend()
plt.show()

# Graficar la energía cinética almacenada en el rotor ajustado
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(time, energy, label='Energía cinética almacenada')
plt.title('Energía Cinética Almacenada en el Rotor (Simulación Estable)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Energía (J)')
plt.legend()
plt.show()
```



ANEXO 2: Código de simulación del controlador PID

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros del generador ajustados
L_d = 0.2 # Inductancia directa (H)
L_q = 0.2 # Inductancia cuadrante (H)
R_s = 0.02 # Resistencia del estator (ohmios)
P = 2 # Número de pares de polos
H = 20.0 # Aumentar la constante de inercia (segundos)
omega_s = 2 * np.pi * 60 # Velocidad síncrona (rad/s)

# Parámetros del controlador PID
K_p = 50.0 # Ganancia proporcional
K_i = 1.0 # Ganancia integral
K_d = 10.0 # Ganancia derivativa

# Condiciones iniciales
I_d0 = 0.0
I_q0 = 0.0
delta0 = 0.0
omega_r0 = omega_s # Asumimos que el generador parte en la velocidad síncrona
T_m0 = 1.0 # Par mecánico inicial

# Parámetros de simulación ajustados
t_max = 5.0 # Tiempo máximo de simulación (segundos)
dt = 0.0001 # Paso de tiempo reducido (segundos)
time = np.arange(0, t_max, dt)

# Límites para evitar desbordamientos
I_max = 10 # Límite máximo de la corriente
omega_max = 2 * omega_s # Límite máximo de la velocidad angular

# Inicialización de variables
I_d = np.zeros_like(time)
I_q = np.zeros_like(time)
delta = np.zeros_like(time)
omega_r = np.zeros_like(time)
T_m = np.zeros_like(time)
T_e = np.zeros_like(time)
energy = np.zeros_like(time) # Energía cinética almacenada
error_omega = np.zeros_like(time) # Error en la velocidad angular
integral_error = 0.0 # Inicialización del error integral

# Valores iniciales
I_d[0] = I_d0
I_q[0] = I_q0
delta[0] = delta0
omega_r[0] = omega_r0
```



```
T_m[0] = T_m0

# Simulación con control PID basado en las ecuaciones del modelo del generador
síncrono
for i in range(1, len(time)):
    # Cálculo del error de velocidad
    error_omega[i] = omega_s - omega_r[i-1]

    # Actualización del error integral
    integral_error += error_omega[i] * dt

    # Derivada del error
    derivative_error = (error_omega[i] - error_omega[i-1]) / dt

    # Controlador PID para el torque mecánico
    T_m[i] = K_p * error_omega[i] + K_i * integral_error + K_d * derivative_error

    # Cálculo del par electromagnético
    T_e[i] = (3/2) * P * (I_d[i-1] * L_d + I_q[i-1] * L_q)

    # Ecuaciones de corriente en el eje d y q
    V_d = 0.01 # Tensiones reducidas para mayor estabilidad
    V_q = 0.01

    dI_d_dt = (V_d - R_s * I_d[i-1] + L_q * omega_r[i-1] * I_q[i-1]) / L_d
    dI_q_dt = (V_q - R_s * I_q[i-1] - L_d * omega_r[i-1] * I_d[i-1]) / L_q

    # Actualización de las corrientes con saturación
    I_d[i] = I_d[i-1] + dI_d_dt * dt
    I_q[i] = I_q[i-1] + dI_q_dt * dt

    # Limitar las corrientes para evitar desbordamiento
    I_d[i] = np.clip(I_d[i], -I_max, I_max)
    I_q[i] = np.clip(I_q[i], -I_max, I_max)

    # Ecuación de velocidad angular
    domega_r_dt = (1/(2*H)) * (T_m[i] - T_e[i])
    omega_r[i] = omega_r[i-1] + domega_r_dt * dt

    # Limitar la velocidad angular para evitar desbordamiento
    omega_r[i] = np.clip(omega_r[i], -omega_max, omega_max)

    # Ecuación de delta (ángulo del rotor)
    ddelta_dt = omega_r[i-1] - omega_s
    delta[i] = delta[i-1] + ddelta_dt * dt

    # Energía cinética almacenada en el sistema
    energy[i] = 0.5 * H * (omega_r[i] ** 2)

# Graficar los resultados
```



```
plt.figure(figsize=(12, 12))

# Graficar corriente
plt.subplot(4, 1, 1)
plt.plot(time, I_d, label='I_d (corriente d)')
plt.plot(time, I_q, label='I_q (corriente q)')
plt.title('Corrientes en los ejes d y q (Simulación con PID)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Corriente (A)')
plt.legend()

# Graficar velocidad angular
plt.subplot(4, 1, 2)
plt.plot(time, omega_r, label='Velocidad del rotor (rad/s)')
plt.axhline(y=omega_s, color='r', linestyle='--', label='Velocidad síncrona')
plt.title('Velocidad Angular del Rotor (Simulación con PID)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Velocidad (rad/s)')
plt.legend()

# Graficar torque mecánico
plt.subplot(4, 1, 3)
plt.plot(time, T_m, label='Torque mecánico (T_m) generado por PID')
plt.title('Torque Mecánico Ajustado por el Controlador PID')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Torque (N*m)')
plt.legend()

# Graficar el error de la velocidad
plt.subplot(4, 1, 4)
plt.plot(time, error_omega, label='Error de velocidad angular')
plt.title('Error en la Velocidad Angular del Rotor (Simulación con PID)')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Error (rad/s)')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
```



ANEXO 3: Código de simulación del controlador PID difuso

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import skfuzzy as fuzz
from skfuzzy import control as ctrl

# --- Definición de la función PID estándar ---
def pid_controller(Kp, Ki, Kd, error, previous_error, integral, dt):
    """Controlador PID clásico"""
    derivative = (error - previous_error) / dt
    integral += error * dt
    output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative
    return output, integral

# --- Crear el sistema difuso para ajustar PID ---
# Variables de entrada (error y derivada del error)
error = ctrl.Antecedent(np.arange(-100, 101, 1), 'error')
derivative = ctrl.Antecedent(np.arange(-50, 51, 1), 'derivative')

# Variables de salida (Kp, Ki, Kd)
Kp = ctrl.Consequent(np.arange(0, 3.1, 0.1), 'Kp')
Ki = ctrl.Consequent(np.arange(0, 1.1, 0.1), 'Ki')
Kd = ctrl.Consequent(np.arange(0, 2.1, 0.1), 'Kd')

# --- Definir funciones de pertenencia para 'error' y 'derivative' ---
error['negativo'] = fuzz.trimf(error.universe, [-100, -100, 0])
error['cero'] = fuzz.trimf(error.universe, [-50, 0, 50])
error['positivo'] = fuzz.trimf(error.universe, [0, 100, 100])

derivative['negativo'] = fuzz.trimf(derivative.universe, [-50, -50, 0])
derivative['cero'] = fuzz.trimf(derivative.universe, [-25, 0, 25])
derivative['positivo'] = fuzz.trimf(derivative.universe, [0, 50, 50])

# --- Definir funciones de pertenencia para 'Kp', 'Ki', 'Kd' ---
Kp['bajo'] = fuzz.trimf(Kp.universe, [0, 0, 1])
Kp['medio'] = fuzz.trimf(Kp.universe, [0.5, 1.5, 2.5])
Kp['alto'] = fuzz.trimf(Kp.universe, [2, 3, 3])

Ki['bajo'] = fuzz.trimf(Ki.universe, [0, 0, 0.5])
Ki['medio'] = fuzz.trimf(Ki.universe, [0.3, 0.5, 0.7])
Ki['alto'] = fuzz.trimf(Ki.universe, [0.5, 1, 1])

Kd['bajo'] = fuzz.trimf(Kd.universe, [0, 0, 0.5]) # Reducir Kd para evitar oscilaciones
grandes
Kd['medio'] = fuzz.trimf(Kd.universe, [0.2, 0.5, 1])
Kd['alto'] = fuzz.trimf(Kd.universe, [0.5, 1.5, 2])

# --- Definir reglas difusas ---
```



```
rule1 = ctrl.Rule(error['negativo'] & derivative['negativo'], [Kp['alto'], Ki['medio'],  
Kd['bajo']])  
rule2 = ctrl.Rule(error['negativo'] & derivative['cero'], [Kp['medio'], Ki['medio'],  
Kd['medio']])  
rule3 = ctrl.Rule(error['negativo'] & derivative['positivo'], [Kp['medio'], Ki['medio'],  
Kd['alto']])  
  
rule4 = ctrl.Rule(error['cero'] & derivative['negativo'], [Kp['medio'], Ki['medio'],  
Kd['bajo']])  
rule5 = ctrl.Rule(error['cero'] & derivative['cero'], [Kp['bajo'], Ki['alto'], Kd['bajo']])  
rule6 = ctrl.Rule(error['cero'] & derivative['positivo'], [Kp['bajo'], Ki['medio'],  
Kd['alto']])  
  
rule7 = ctrl.Rule(error['positivo'] & derivative['negativo'], [Kp['medio'], Ki['alto'],  
Kd['medio']])  
rule8 = ctrl.Rule(error['positivo'] & derivative['cero'], [Kp['alto'], Ki['alto'], Kd['bajo']])  
rule9 = ctrl.Rule(error['positivo'] & derivative['positivo'], [Kp['alto'], Ki['alto'],  
Kd['medio']])  
  
# --- Crear el sistema difuso ---  
pid_ctrl = ctrl.ControlSystem([rule1, rule2, rule3, rule4, rule5, rule6, rule7, rule8,  
rule9])  
pid = ctrl.ControlSystemSimulation(pid_ctrl)  
  
# --- Función para aplicar control difuso ---  
def fuzzy_adjustment(error_value, derivative_value):  
    pid.input['error'] = error_value  
    pid.input['derivative'] = derivative_value  
    pid.compute()  
    return pid.output['Kp'], pid.output['Ki'], pid.output['Kd']  
  
# --- Parámetros del generador síncrono ---  
L_d = 0.2 # Inductancia directa (H)  
L_q = 0.2 # Inductancia cuadrante (H)  
R_s = 0.02 # Resistencia del estator (ohmios)  
P = 1 # Número de pares de polos  
H = 20.0 # Constante de inercia del rotor (segundos)  
omega_s = 2 * np.pi * 60 # Velocidad síncrona (rad/s)  
T_m = 0.8 # Torque mecánico aplicado (N*m)  
k_f = 220 # Constante de excitación ajustada para generar 220 V  
  
# Corriente de excitación del rotor (entrada)  
I_f = 0.8 # Corriente de excitación del rotor (A)  
  
# Condiciones iniciales  
I_d0 = 0.0  
I_q0 = 0.0  
delta0 = 0.0  
omega_r0 = omega_s  
V_deseada = 220
```



```
f_deseada = 60

# Parámetros de simulación
t_max = 5000.0 # Tiempo máximo de simulación (segundos)
dt = 0.1 # Paso de tiempo (segundos)
time = np.arange(0, t_max, dt)

# Límites de seguridad
I_max = 10
omega_max = 2 * omega_s
E_f_max = 230

# Inicialización de variables
I_d = np.zeros_like(time)
I_q = np.zeros_like(time)
delta = np.zeros_like(time)
omega_r = np.zeros_like(time)
T_e = np.zeros_like(time)
f_gen = np.zeros_like(time) # Frecuencia generada
V_a = np.zeros_like(time)
V_b = np.zeros_like(time)
V_c = np.zeros_like(time)
energy = np.zeros(len(time)) # Corrección del tamaño de `energy`

# PID variables
integral_v = 0
integral_f = 0
previous_error_v = 0
previous_error_f = 0

# --- Simulación del generador síncrono ---
for i in range(1, len(time)):
    # Calcular la FEM inducida por el campo del rotor, ajustada para 220 V
    E_f = np.clip(k_f * I_f, -E_f_max, E_f_max)

    # Cálculo del torque electromagnético
    T_e[i] = np.clip((3/2) * P * (E_f * I_q[i-1]) / omega_s, -E_f_max, E_f_max)

    # Ecuaciones de corriente en los ejes d-q
    V_d = E_f # Asumiendo que la FEM en el eje d es constante
    V_q = E_f # Asumiendo que la FEM en el eje q es constante

    dI_d_dt = (V_d - R_s * I_d[i-1] + L_q * omega_r[i-1] * I_q[i-1]) / L_d
    dI_q_dt = (V_q - R_s * I_q[i-1] - L_d * omega_r[i-1] * I_d[i-1]) / L_q

    # Actualización de las corrientes con límites
    I_d[i] = np.clip(I_d[i-1] + dI_d_dt * dt, -I_max, I_max)
    I_q[i] = np.clip(I_q[i-1] + dI_q_dt * dt, -I_max, I_max)

    # Ecuación de la velocidad angular del rotor con límite
```




```
domEGA_r_dt = (T_m - T_e[i]) / (2 * H)
omega_r[i] = np.clip(omega_r[i-1] + domEGA_r_dt * dt, -omega_max, omega_max)

# Ecuación del ángulo del rotor
ddelta_dt = omega_r[i-1] - omega_s
delta[i] = delta[i-1] + ddelta_dt * dt

# Frecuencia generada (en Hz)
f_gen[i] = (P * omega_r[i]) / (2 * np.pi)

# Transformación inversa de Park para obtener tensiones trifásicas
V_a[i] = E_f * np.cos(delta[i])
V_b[i] = E_f * np.cos(delta[i] - 2*np.pi/3)
V_c[i] = E_f * np.cos(delta[i] + 2*np.pi/3)

# Energía cinética almacenada
energy[i] = 0.5 * H * omega_r[i]**2

# Error en la tensión y frecuencia
error_v = 220 - V_a[i]
error_f = 60 - f_gen[i]

# Derivadas de los errores
derivative_v = (error_v - previous_error_v) / dt
derivative_f = (error_f - previous_error_f) / dt

# Ajustar los parámetros PID con la lógica Fuzzy
Kp_v, Ki_v, Kd_v = fuzzy_adjustment(error_v, derivative_v)
Kp_f, Ki_f, Kd_f = fuzzy_adjustment(error_f, derivative_f)

# Aplicar el controlador PID a la tensión (modificar corriente de excitación)
I_f, integral_v = pid_controller(Kp_v, Ki_v, Kd_v, error_v, previous_error_v,
integral_v, dt)

# Aplicar el controlador PID a la frecuencia (modificar torque mecánico)
T_m, integral_f = pid_controller(Kp_f, Ki_f, Kd_f, error_f, previous_error_f,
integral_f, dt)

# Actualizar errores anteriores
previous_error_v = error_v
previous_error_f = error_f

# Graficar los resultados
plt.figure(figsize=(10, 40))

# Corrientes en los ejes d y q
plt.subplot(10, 1, 1)
plt.plot(time, I_d, label='I_d (corriente d)')
plt.plot(time, I_q, label='I_q (corriente q)')
plt.title('Corrientes en los ejes d y q')
```



```
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Corriente (A)')
plt.legend()

# Velocidad angular del rotor
plt.subplot(10, 1, 2)
plt.plot(time, omega_r, label='Velocidad del rotor (rad/s)')
plt.axhline(y=omega_s, color='r', linestyle='--', label='Velocidad síncrona')
plt.title('Velocidad Angular del Rotor')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Velocidad (rad/s)')
plt.legend()

# Ángulo del rotor
plt.subplot(10, 1, 3)
plt.plot(time, delta, label='Ángulo del rotor (rad)')
plt.title('Ángulo del Rotor')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Ángulo (rad)')
plt.legend()

# Tensión generada en las fases
plt.subplot(10, 1, 4)
plt.plot(time, V_a, label='Tensión Fase A (V)')
plt.plot(time, V_b, label='Tensión Fase B (V)')
plt.plot(time, V_c, label='Tensión Fase C (V)')
plt.title('Tensiones Alternas Generadas (Fases A, B y C)')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Tensión (V)')
plt.legend()

# Frecuencia generada
plt.subplot(10, 1, 5)
plt.plot(time, f_gen, label='Frecuencia generada (Hz)')
plt.axhline(y=60, color='r', linestyle='--', label='Frecuencia síncrona (60 Hz)')
plt.title('Frecuencia Generada')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Frecuencia (Hz)')
plt.legend()

# Energía cinética almacenada
plt.subplot(10, 1, 6)
plt.plot(time, energy, label='Energía Cinética (J)')
plt.title('Energía Cinética Almacenada en el Rotor')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Energía (J)')
plt.legend()

# Torque electromagnético y mecánico
plt.subplot(10, 1, 7)
```



```
plt.plot(time, T_e, label='Torque Electromagnético (N·m)')
plt.axhline(y=T_m, color='r', linestyle='--', label='Torque Mecánico (N·m)')
plt.title('Torque Electromagnético y Mecánico')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Torque (N·m)')
plt.legend()

# Tensión generada en las fases (últimos 20 ms)
t_last = 20 # Últimos 20 ms
n_last = int(t_last / dt)
plt.subplot(10, 1, 8)
plt.plot(time[-n_last:], V_a[-n_last:], label='Tensión Fase A (V)')
plt.plot(time[-n_last:], V_b[-n_last:], label='Tensión Fase B (V)')
plt.plot(time[-n_last:], V_c[-n_last:], label='Tensión Fase C (V)')
plt.title(f'Tensiones Alternas Generadas (Fases A, B y C) - Últimos {t_last} ms')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Tensión (V)')
plt.legend()

# Corrientes en los ejes d y q (últimos 20 ms)
plt.subplot(10, 1, 9)
plt.plot(time[-n_last:], I_d[-n_last:], label='I_d (corriente d)')
plt.plot(time[-n_last:], I_q[-n_last:], label='I_q (corriente q)')
plt.title(f'Corrientes en los ejes d y q - Últimos {t_last} ms')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Corriente (A)')
plt.legend()

# Torque electromagnético y mecánico (últimos 20 ms)
plt.subplot(10, 1, 10)
plt.plot(time[-n_last:], T_e[-n_last:], label='Torque Electromagnético (N·m)')
plt.axhline(y=T_m, color='r', linestyle='--', label='Torque Mecánico (N·m)')
plt.title(f'Torque Electromagnético y Mecánico - Últimos {t_last} ms')
plt.xlabel('Tiempo (ms)')
plt.ylabel('Torque (N·m)')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
```



ANEXO 4: Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo EDGAR QUISPE MAMANI
identificado con DNI 42789448 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"REGULACION DE FRECUENCIA Y TENSION DE UN GENERADOR
SINCRONO, UTILIZANDO CONTROLADOR PID DIFUSO

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 13 de DICIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)





AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo WILIAN ARMANDO LEON CABANA
identificado con DNI 70206867 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ RÉGULACION DE FRECUENCIA Y TENSION DE UN GENERADOR
SINCRONO, UTILIZANDO CONTROLADOR PID DIFUSO ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 13 de DICIEMBRE del 20 24

FIRMA (obligatoria)



Huella



ANEXO 5: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo EDGAR QUISPE MANANI
identificado con DNI 42789498 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" REGULACION DE FRECUENCIA Y TENSION DE UN GENERADOR
SINCRONO, UTILIZANDO CONTROLADOR PID DIFUSO"

Es un tema original.


Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 13 de DICIEMBRE del 20 24


FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo WILIAN ARMANDO LEON CABANA
identificado con DNI 70206867 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" REGULACION DE FRECUENCIA Y TENSION DE UN GENERADOR
SINCRONO, UTILIZANDO CONTROLADOR PID DIFUSO.

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 13 de DICIEMBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella