



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Análisis comparativo entre controladores clásicos e inteligentes, aplicados al control de velocidad de motores trifásicos a través de la implementación de un módulo de control lógico programable (PLC).

Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingeniero en Telecomunicaciones

Autores:

Puma Chugchilan Daniela Stefania
Vallejo Izurieta Brayan Mauricio

Tutor:

MsC. Eduardo Daniel Haro Mendoza

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, Daniela Stefania Puma Chugchilan con cédula de ciudadanía 060552678-9 y Brayan Mauricio Vallejo Izurieta con cédula de ciudadanía 060579437-9, autores del trabajo de investigación titulado: **“Análisis comparativo entre controladores clásicos e inteligentes, aplicados al control de velocidad de motores trifásicos a través de la implementación de un módulo de control lógico programable (PLC)”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, junio 2025.



Daniela Stefania Puma Chugchilan

C.I: 060552678-9



Brayan Mauricio Vallejo Izurieta

C.I: 060579437-9

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Eduardo Daniel Haro Mendoza catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación **“Análisis comparativo entre controladores clásicos e inteligentes, aplicados al control de velocidad de motores trifásicos a través de la implementación de un módulo de control lógico programable (PLC).”**, bajo la autoría de Daniela Stefania Puma Chugchilan y Brayan Mauricio Vallejo Izurieta; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 15 días del mes de mayo de 2025.



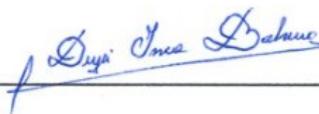
Ing. Eduardo Daniel Haro Mendoza PhD.
C.I: 0603387531

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

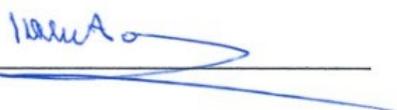
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Análisis comparativo entre controladores clásicos e inteligentes, aplicados al control de velocidad de motores trifásicos a través de la implementación de un módulo de control lógico programable (PLC)**”, presentado por Daniela Stefania Puma Chugchilan, con cédula de identidad número 060552678-9, bajo la tutoría de Mgs. Eduardo Daniel Haro Mendoza; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 09 de junio de 2025.

Mgs. Deysi Inca.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Dr. Klever Torres.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



PhD. Leonardo Rentería.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

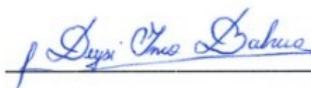


CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Análisis comparativo entre controladores clásicos e inteligentes, aplicados al control de velocidad de motores trifásicos a través de la implementación de un módulo de control lógico programable (PLC)**”, presentado por Brayan Mauricio Vallejo Izurieta, con cédula de identidad número 060579437-9, bajo la tutoría de Mgs. Eduardo Daniel Haro Mendoza; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 09 de junio de 2025.

Mgs. Deysi Inca.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Dr. Klever Torres.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



PhD. Leonardo Rentería.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **PUMA CHUGCHILAN DANIELA STEFANIA** con CC: **0605526789**, estudiante de la Carrera **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES CLÁSICOS E INTELIGENTES, APLICADOS AL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES TRIFÁSICOS A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)**", cumple con el 4%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 28 de mayo de 2025



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO DANIEL HARO
MENDOZA**

Validar únicamente con FirmADIC

Ing. Daniel Haro Mendoza PhD.
TUTOR



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **VALLEJO IZURIETA BRAYAN MAURICIO** con CC: **0605794379**, estudiante de la Carrera **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES CLÁSICOS E INTELIGENTES, APLICADOS AL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES TRIFÁSICOS A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)**", cumple con el 4%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 28 de mayo de 2025



Ing. Daniel Haro Mendoza PhD.
TUTOR

DEDICATORIA

Con todo el corazón dedico este trabajo a Dios quien me ha brindado sabiduría, fe y resiliencia cuando más lo necesitaba. A mi familia, por ser mi raíz y mi fuerza, sobre todo, a mi madre Martha, por enseñarme a luchar con el corazón, por sus sacrificios silenciosos y su amor constante. A mi hermana Sonia, por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía. Y sin olvidar a mi fiel compañero de cuatro patas Valentin, que con solo estar cerca me dio paz y tranquilidad en los momentos más difíciles. Finalmente, a mis amigos que, con su cariño y compañía, estuvieron presentes en cada momento de este camino.

Daniela S. Puma

Primeramente, a Dios por darme la bendición de contar con una hermosa familia y guiar mi camino hasta este momento. A mi querida madre que ha sido mi pilar fundamental en vida por su amor, confianza y nunca dejarme solo en este largo camino. A mi hermano mayor por ser mi apoyo incondicional y siempre darme ánimos de seguir adelante y cumplir con mis sueños. A mi hermana y sobrina con las que siempre puedo contar y han estado siempre presentes en cada paso y momento a pesar de los momentos difíciles. A mi querido padre de a pesar de la distancia siempre ha tratado de apoyarme y aconsejarme para ser una persona correcta. A mis queridos abuelitos que con su inmenso corazón siempre han estado presentes y nunca me han dejado sentirme solo. Por último y no menos importante a mis amigos por todos los momentos alegres y tristes que marcaron mi vida y me motivaron a seguir adelante y no abandonar todos mis esfuerzos.

Brayan M. Vallejo

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios, a mi madre Martha y a mi padre Julio, por su amor, paciencia y sacrificio; por inculcarme valores y enseñarme que el esfuerzo y la dedicación siempre rinden frutos.

A mi hermana Sonia por ser quien ha creído en mi desde siempre, a mis sobrinas Lesly y Ayleth, por llenar de alegría mi vida. También a toda mi familia materna, quienes han sido parte de este camino.

A mis amigos Milena, Dennys, Jordan y Shani, quienes con su compañía, consejos y ánimos hicieron que este proceso fuera más llevadero. Su amistad ha sido un refugio en los momentos de estrés y cansancio. Y a mi ángel Mónica, cuya luz me acompaña desde el cielo.

A la Ing. Deysi Inca quien no solo compartió su conocimiento, sino que con su ejemplo me motivó a seguir adelante y luchar por mis sueños. Gracias por su apoyo y confianza en mí.

A mi querido Valentín, mi fiel compañero de patas suaves y mirada curiosa, quien estuvo a mi lado en madrugadas eternas, en momentos de frustración y también de calma.

Por último, a mis compañeros que con el tiempo se convirtieron en grandes amigos, gracias por hacer este camino universitario más llevadero y, sobre todo, más divertido.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro.

Daniela S. Puma

Agradezco a la Universidad Nacional De Chimborazo por abrirme las puertas y permitirme formarme como profesional, brindándome la oportunidad de adquirir conocimientos y destrezas indispensables como futuro ingeniero.

Agradezco a mis profesores por su tiempo y paciencia, por algunos que muchas veces laboraron más allá de su deber, por su humanidad y empatía que en muchos momentos me hicieron sentir en el camino correcto de mi desarrollo personal y me inspiraron a seguir adelante.

Agradezco a mis amigos y compañeros parte por su solidaridad y colaboración en cada ciclo de la carrera, que han sido indispensables para superar obstáculos y crecer como personas y profesionales.

Por último, agradezco infinitamente a mi familia por su constante apoyo, su cariño, sus valores que me han dado la fuerza y me han guiado en el camino de perseguir mis sueños y logros de mi vida.

Brayan M. Vallejo

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	17
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Antecedentes	17
1.2. Planteamiento del problema.....	18
1.3. Justificación.....	18
1.4. Objetivos	19
1.4.1. General	19
1.4.2. Específicos	19
CAPÍTULO II.....	20
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Estado del Arte	20
2.2. Términos y definiciones.....	21
2.2.1. Controladores Clásicos	21
2.2.2. Controladores PID	21
2.2.3. Controladores Modernos Inteligentes.....	21

2.2.4.	Lógica difusa (fuzzy).....	22
2.2.5.	Modelos matemáticos	22
2.2.6.	Sistemas de segundo orden	22
2.2.7.	Motores Trifásicos.....	23
2.2.8.	Simatic S7-1200, CPU 1212C AC/DC/Rly 6ES7 212-1BE40-0XB0.....	23
2.2.9.	Módulo de salida analógica SM 1232AQ2.....	24
2.2.10.	Variador de frecuencia Siemens Simamics V20	24
2.2.11.	Tia Portal.....	25
CAPÍTULO III.....		26
3.	METODOLOGÍA.....	26
3.1.	Tipo de Investigación.....	26
3.1.1.	Investigación experimental	26
3.1.2.	Investigación descriptiva:	26
3.2.	Enfoque de la Investigación.....	26
3.3.	Población y Muestra	26
3.3.1.	Población.....	26
3.3.2.	Muestra	26
3.4.	Diseño de la Investigación.....	27
	Fase 1. Estudio de controladores clásicos y modernos.....	27
	Fase 2. Diseño e implementación de los controladores.....	29
	Fase 3. Comparación de los sistemas de control.....	41
3.5.	Operacionalización de Variables.....	41
3.6.	Técnica de recolección de datos.....	42
CAPÍTULO IV.....		43
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1.	Prueba de U de Mann-Whitney	43

4.2.	Prueba de Kruskal-Wallis	43
CAPÍTULO V.....		45
5.	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	45
5.1.	Conclusiones	45
5.2.	Recomendaciones	45
BIBLIOGRAFÍA		46
ANEXOS.....		48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y desventajas de controladores clásicos	28
Tabla 2 Ventajas y desventajas de controladores inteligentes.....	28
Tabla 3. Tabla Ziegler-Nichols lazo abierto[20].	32
Tabla 4. Constantes PID obtenidas.	33
Tabla 5. Reglas Fuzzy.....	37
Tabla 6. Resumen de áreas y centroides.....	38
Tabla 7. Valores asignados al control Fuzzy.....	40
Tabla 8. Operacionalización de variables.....	41
Tabla 9. Datos del tiempo de estabilidad para cada controlador a diferentes velocidades .	42
Tabla 10. Resultados de la prueba de hipótesis del tiempo de estabilidad considerando el tipo de controlador, con un nivel de significancia 0.5.	43
Tabla 11. Resultados de la prueba de hipótesis del tiempo de estabilidad en función de la velocidad, con un nivel de significancia 0.5.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. PLC S7-1200 [15].....	23
Figura 2. Variador de frecuencia V20 [17].	24
Figura 3. Diagrama de las fases de trabajo.....	27
Figura 4. Diagrama de conexión del sistema de control.	29
Figura 5. Implementación física del tablero de control.	29
Figura 6. Diagrama de controlador PID en lazo cerrado.	30
Figura 7. Respuesta del motor trifásico.	31
Figura 8. Estimación de la función de transferencia del motor trifásico.	31
Figura 9. Parámetros en la curva sigmoïdal [20].....	32
Figura 10. Diagrama de implementación PID en PLC.	33
Figura 11. Instrucción PID compact en PLC.	33
Figura 12. Respuesta del sistema mediante control PID.....	34
Figura 13. Diagrama de controlador Fuzzy.....	35
Figura 14. Diagrama de estructura control Fuzzy.	35
Figura 15. Conjunto de parámetros de entrada.....	36
Figura 16. Conjunto de parámetros de salida.	36
Figura 17. Vista general de áreas.....	38
Figura 18. Diagrama de control Fuzzy en PLC.....	39
Figura 19. Bloque de función en SCL.	39
Figura 20. Estructura de programación bloque Fuzzy.....	39
Figura 21. Diagrama de flujo conjunto difuso VAI.....	40
Figura 22. Respuesta del sistema mediante control Fuzzy.....	41

RESUMEN

El control de velocidad en motores trifásicos representa una tarea fundamental en el ámbito de la automatización industrial, a razón de mantener condiciones estables de operación, como la velocidad y la estabilidad. Considerando lo mencionado, la presente investigación compara el desempeño de un controlador clásico, como el PID, con un controlador inteligente, como el Fuzzy, aplicados al control de un motor trifásico mediante un PLC Siemens S7-1200.

Ambos controladores se implementan en el entorno TIA Portal, utilizando un motor trifásico equipado con un encoder para medir la velocidad en tiempo real. Los datos obtenidos durante las pruebas experimentales se analizan mediante métricas estadísticas, y a partir de esto los resultados, arrojaron que no existen diferencias significativas en el tiempo de estabilidad con respecto al tipo de controlador ni a la velocidad de setpoint.

Palabras claves: Automatización, tiempo, estabilidad, control, velocidad, comparación.

ABSTRACT

The speed control in three-phase motors represents a fundamental task in the field of industrial automation, maintaining stable operating conditions such as speed and stability. Considering the above, the present research compares the performance of a classical controller, such as a PID, with that of an intelligent controller, such as a Fuzzy Controller, applied to the control of a three-phase motor using a Siemens S7-1200 PLC.

Both controllers are implemented in the TIA Portal environment, utilizing a three-phase motor equipped with an encoder to measure speed in real time. The data obtained during the experimental tests are analyzed using statistical metrics, and the results show that there are no significant differences in stability time between the types of controllers and the setpoint speeds.

Keywords: Automation, time, stability, control, speed, comparison.



firmado electrónicamente por:
MARCELA PATRICIA
GONZALEZ ROBALINO

Validar electrónicamente con FirmasCC

Reviewed by

Mgs. Marcela González R.
ENGLISH PROFESSOR

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes

La industria ha evolucionado significativamente en la historia de la humanidad, desde la Revolución Industrial hasta la actualidad, es decir, la industria ha sido definida por métodos de producción secuenciales y, en su mayoría, manuales, donde la mejora de la eficiencia y la productividad se lograba mediante avances en la gestión laboral y la adopción de maquinaria cada vez más avanzada. Sin embargo, con la llegada de la Industria 4.0, que marca una etapa trascendental en la evolución de la industria, donde el crecimiento exponencial de la tecnología y de las TIC, son la clave en la integración de las fábricas con el Internet, a través del diseño e implantación de mecanismos inteligentes dotados de identidades digitales propias, con el objetivo de facilitar su manejo y reparación a distancia [1].

Siguiendo con la aplicación de la industria 4.0, se involucra a los sistemas de control modernos inteligentes: sistemas automatizados que emplean tecnologías avanzadas para controlar e inspeccionar procesos de manera eficaz y adaptable. Estos sistemas integran componentes de inteligencia artificial, como servicios de aprendizaje automático, redes neuronales, lógica difusa y procesamiento de datos en tiempo real, los que permiten tomar decisiones según las condiciones del entorno y los objetivos específicos del sistema [2]. Mientras que los sistemas de control clásico, como el control Proporcional Integral Derivativo (PID), sigue siendo el sistema más usado industrial, proporcionando un tratamiento para la respuesta de estado estacionario y transitoria. Este ofrece una solución genérica y eficiente a los problemas de control del mundo real [3]. Aunque, su rendimiento depende de la correcta selección de sus parámetros, lo que requiere un ajuste fino y optimizado.

En cuanto a los actuadores o motores, los mismos que están en casi toda la industria, y requieren una determinada cantidad de electricidad para proporcionar potencia y velocidad [4]. Particularmente, los motore trifásicos, funciona con un suministro de energía de tres fases, y son conocidos por su eficiencia, confiabilidad y capacidad para dar un alto par de arranque.

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento de los controladores al controlar la velocidad de un actuador trifásico, se propone implementar un módulo PLC, diseñado para controlar procesos ejecutables en un ambiente industrial, robusto y con espacio para aguantar circunstancias ambientales severas, que ayudan a aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar contactos móviles, las mismas máquinas programables pueden indicar y detectar defectos [5].

En ciertas aplicaciones, se han utilizado métodos como el control industrial, neumático y electroneumático a través de PLC, utilizando lógica cableada. Este método incluye el diseño de automatización mediante diagramas de cableado utilizando contactos auxiliares de relés electromecánicos, contactores de corriente, relés horarios, relés contadores, válvulas de

presión de aceite y neumáticas y otros componentes según las necesidades del cliente [2]. En cambio, la lógica difusa aplicada en módulos PLC, permite tomar decisiones más flexibles, basadas en una lógica similar al razonamiento humano. Esto facilita una mejor adaptación al mundo real en la que se vive e incluso la capacidad de comprender y aplicar expresiones del ser humano [4].

Este proyecto tiene como finalidad analizar comparativamente los controladores clásicos e inteligentes aplicados en el control de velocidad de motores trifásicos, mediante la implementación en un módulo de control lógico programable PLC. Con ellos, se busca incluir las nuevas tecnologías en el campo industrial y mejorar la eficiencia, precisión, flexibilidad y adaptabilidad. Además, se pretende discutir los beneficios y desventajas de cada uno de los sistemas de control, proporcionando herramientas y conocimientos que ayuden al control de la velocidad de los actuadores trifásicos.

1.2. Planteamiento del problema

El control de velocidad en motores trifásicos representa un desafío en la automatización industrial debido a la dificultad de mantener estabilidad y precisión ante variaciones en la carga y perturbaciones externas. Tradicionalmente, los sistemas de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) han sido la opción común debido a su capacidad de respuesta rápida y facilidad de implementación. Sin embargo, estos sistemas presentan limitaciones cuando enfrentan perturbaciones externas, como ruidos e interferencias, o cambios en las características del motor debido al desgaste o fatiga de materiales. Estas situaciones pueden complicar la estabilidad del sistema y requerir ajustes constantes en los parámetros del controlador.

Por otro parte, los controladores inteligentes, como aquellos basados en lógica difusa, ofrecen ventajas significativas en términos de adaptabilidad y robustez ante cambios en las condiciones del sistema. A pesar de sus beneficios, su ayuda en la industria sigue siendo limitada debido a diversos factores, como la falta de conocimiento sobre su implementación en módulos de control lógico programable (PLC) y la percepción de que su integración con los sistemas industriales actuales puede ser compleja y costosa.

Ante esta situación, surge la necesidad de realizar un análisis comparativo entre los controladores clásicos (PID) y los controladores inteligentes (lógica difusa), evaluando su desempeño aplicado al control de velocidad y tiempo de estabilidad, de un motor trifásico en condiciones de trabajo. Por lo tanto, es esencial determinar si la lógica difusa implementada en un PLC puede ofrecer mejores resultados en comparación con los sistemas PID convencionales en entornos de control de motores trifásicos.

1.3. Justificación

El estudio comparativo entre controladores clásicos e inteligentes aplicados al control de motores trifásicos es relevante por su impacto en la eficiencia y estabilidad de los sistemas industriales. La automatización industrial requiere recursos de control que sean robustos, adaptables y capaces de mantener la estabilidad del sistema frente a variaciones de carga y condiciones ambientales cambiantes.

Los controladores PID han demostrado su eficiencia en la industria, pero su desempeño puede verse afectado cuando el sistema enfrenta perturbaciones externas o requiere ajustes constantes. Por lo contrario, los controladores basados en lógica difusa pueden ofrecer ventajas en términos de estabilidad y adaptabilidad, pero el desconocimiento y la falta de capacitación en la industria han limitado su implementación.

Esta investigación busca proporcionar evidencia analizable sobre el desempeño de ambos tipos de control mediante su implementación en un módulo PLC. El objetivo es comparar el comportamiento de cada controlador en términos de tiempo de estabilidad y capacidad de adaptación a variaciones en la velocidad del motor, generando resultados que permitan establecer conclusiones para fomentar el uso de tecnologías más eficientes en la industria.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

- Analizar los modelos de controladores clásicos e inteligentes, aplicados al control y estabilidad de velocidades en tiempo real para motores trifásicos, por medio de un módulo de control lógico programable (PLC) y estudiar su comportamiento y funcionamiento en condiciones de trabajo.

1.4.2. Específicos

- Estudiar las diferentes tecnologías clásicas y modernas para el control de actuadores trifásicos y la lógica programable PLC apropiada para su control.
- Diseñar e implementar en un módulo PLC, los sistemas modernos y clásicos aplicados al control de velocidad de motores trifásicos.
- Comparar el sistema de controlador moderno con el controlador clásico, respecto al control de velocidad de los motores trifásicos.

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

Para lograr un correcto análisis entre las distintas técnicas a implementar para el control de velocidad de un motor trifásico se realizó una investigación y revisión de tesis, artículos o revistas científicas, información afín al proyecto de investigación, con el objetivo de tener una idea clara de los resultados que se desearon obtener. A continuación, se presentan algunas de las investigaciones encontradas respecto a los ciertos métodos utilizados para el control de procesos industriales:

Como se menciona en la investigación realizada por Miranda Gamarra y Ruíz Quishpe, sobre “Diseño e implementación de un módulo educativo controlado mediante PLC S7-1200 con interfaz HMI, para simulación de procesos industriales neumáticos y electroneumáticos” [2], cual incluye el diseño de automatización mediante diagramas de cableado utilizando contactos auxiliares de relés electromecánicos, contactores de corriente, relés horarios, relés contadores, válvulas de presión de aceite y neumáticas y otros componentes según las necesidades del cliente. Mientras que, por otro lado está, la investigación realizada por Cazalla Moral sobre “Diseño e implementación de controladores avanzados en PLC's industriales”[3] , en esta investigación se utilizó la técnica de redes neuronales, un modelo informático que simula el comportamiento del cerebro humano, conectadas entre sí para transmitirse señales.

El trabajo elaborado por Chacha Yugcha, titulado “Análisis de la operación de motores trifásicos mediante el diseño e implementación de un módulo didáctico en el laboratorio de electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi - La Maná.” [6], en este proyecto se realiza un módulo educativo con controlador clásico para que los estudiantes utilicen en sus prácticas con motores trifásicos.

Sin embargo, en el artículo de investigación elaborado por Samuel Araujo titulado “Control de velocidad de motores de inducción trifásico mediante metodología PID” [5], este artículo fue publicado en 2024 en la editorial Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de Goiás, Brasil. En el que demuestra qué es el control de velocidad de motores de inducción trifásicos y sus modelos utilizando la metodología PID, de gran relevancia en el control de nivel de fluidos en entornos industriales, el cual es una de las técnicas a analizar en este trabajo de investigación.

Finalmente, se encontró el trabajo de investigación elaborado por Jordan Noguera y Oscar Ramos titulado “Diseño e implementación de un control difuso de temperatura para etapa de calentamiento y enfriamiento de planta térmica del Grupo de Investigación Integra” [7], en este trabajo se implementa un sistema de control difuso para regular la temperatura. Cuando es necesario aumentarla, el sistema de control difuso de calentamiento entra en operación, mientras que el de enfriamiento se mantiene en su nivel mínimo, la técnica corresponde al segundo método que será comprobado en el presente trabajo.

2.2. Términos y definiciones

El control de la velocidad en motores trifásicos es significativo para asegurar un control eficiente y preciso durante su operación, en algunos casos extender la vida útil del motor, además de poder implementarlo en distintos ámbitos, dependiendo las diferentes técnicas de control que se requiera.

2.2.1. Controladores Clásicos

Los controladores clásicos, como los PD, PI y PID, se han utilizado en la industria durante décadas por su simplicidad y eficacia en muchas aplicaciones.

2.2.2. Controladores PID

El control PID (proporcional-integral-derivativo), ajusta la salida del sistema en función del error actual, el error acumulado y la tasa de cambio del error, lo que permite un control preciso de la velocidad del motor.

Aunque los controladores PID son robustos y fáciles de implementar, pueden no ser óptimos para sistemas no lineales o sujetos a perturbaciones significativas.

A pesar de los sorprendentes avances en la teoría del control y el soporte técnico necesario para su implementación, los controladores estructurales PID se utilizan casi exclusivamente en entornos industriales en todo el mundo, especialmente para el control de procesos térmicos y químicos [8].

Ventajas

- Simplicidad y facilidad de implementación.
- Una gran versatilidad en aplicaciones.
- Corrección de errores a corto y largo plazo.
- Menor carga computacional.

Desventajas

- Sensibilidad al ruido.
- Inestable o poco efectivo en sistemas con retardo significativo.

2.2.3. Controladores Modernos Inteligentes

Los controladores modernos, como los controladores con redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos y fuzzy ofrecen una alternativa a los métodos clásicos al permitir un control más adaptable y flexible.

Los controladores borrosos son esencialmente útiles para sistemas no lineales o con dinámicas variables, pueden capturar la incertidumbre y adaptarse a condiciones cambiantes. Las redes neuronales artificiales pueden aprender y modelar relaciones complejas entre las entradas y las salidas del sistema, lo que las hace adecuadas para aplicaciones donde la dinámica del sistema es desconocida o difícil de modelar de manera analítica [9]. Y los algoritmos genéticos logran optimizar automáticamente los parámetros del controlador para lograr un rendimiento óptimo, aunque pueden intimar más recursos computacionales que otros enfoques.

2.2.4. Lógica difusa (fuzzy)

La lógica difusa, es un enfoque de inteligencia artificial que emplea términos lingüísticos para llevar a cabo razonamientos, lo que permite analizar e interpretar información imprecisa de manera más sencilla. Su uso contribuye a simplificar el modelado de sistemas, ya que puede disminuir la necesidad de formulaciones matemáticas complejas. A lo largo de las últimas décadas, este campo ha experimentado un gran desarrollo, con múltiples investigaciones y aplicaciones documentadas [8].

La incorporación de la lógica difusa en los sistemas de control da lugar a lo llamado sistemas de control difuso. Existen dos áreas principales dentro de los sistemas de control: el modelado o identificación y el control mismo o control directo. El control de procesos, asume que se conoce su modelo, trata de determinar lógicamente qué se debe hacer para lograr los objetivos de control de la mejor manera posible a partir del conocimiento del operador humano [10].

Ventajas

- Tolerancia a la incertidumbre y al ruido
- Flexible y adaptable modificando sus reglas.
- Corrección de errores a corto y largo plazo.

Desventajas

- Diseño complejo requiriendo tiempo y conocimiento al crear el conjunto de reglas.
- Requiere más recursos computacionales

2.2.5. Modelos matemáticos

Son herramientas esenciales en la descripción y análisis de sistemas físicos, biológicos, económicos. Dentro de los modelos matemáticos están; el modelo lineal en el cual las variables independientes y sus coeficientes están relacionados de manera lineal. Esto significa que cualquier cambio en una variable independiente producirá un cambio proporcional en la variable dependiente, y las ecuaciones involucradas son de primer grado [11]. Y el modelo no lineal en el que las variables independientes y sus coeficientes están relacionados de manera no lineal. Las ecuaciones involucradas pueden incluir términos cuadráticos, cúbicos, exponenciales, logarítmicos, entre otros, y la respuesta no es proporcional a la entrada [12].

2.2.6. Sistemas de segundo orden

En ingeniería de control, un sistema de segundo orden se diferencia por la presencia de dos polos. La función de transferencia típica de un sistema de segundo orden en lazo cerrado se utiliza para representar su comportamiento [13].

Parámetros Importantes:

- **Frecuencia Natural (ω_n):** Indica la velocidad con la que el sistema oscilaría en ausencia de amortiguación.
- **Coefficiente de Amortiguación(ζ):** Determina la naturaleza de la respuesta transitoria del sistema.

En el análisis de sistemas dinámicos o de segundo orden, el comportamiento ante una perturbación permite clasificarlos según su nivel de amortiguamiento. Un sistema críticamente amortiguado retorna al estado de equilibrio sin oscilaciones y en el menor tiempo posible, siendo ideal para evitar sobre impulsos. Un sistema subamortiguado muestra oscilaciones antes de estabilizarse, representadas por un sobre impulso y un tiempo de asentamiento más prolongado. A diferencia, de un sistema sobreamortiguado el cual también evita las oscilaciones, pero su retorno al equilibrio es más lento que en el caso crítico. Finalmente, un sistema no amortiguado oscila indefinidamente con amplitud constante, debido a que no existe disminución de energía en el sistema.

2.2.7. Motores Trifásicos

Los motores trifásicos conocidos también como motores de inducción o motores asíncronos se alimentan de la corriente alterna permitiendo crear un campo inductor, su arranque puede definirse como el proceso inicial donde la velocidad del motor se aumenta, desde un estado en reposo hasta que lograr conseguir su velocidad nominal [14].

2.2.8. Simatic S7-1200, CPU 1212C AC/DC/Rly 6ES7 212-1BE40-0XB0

SIMATIC S7-1200 ofrece potentes capacidades de proceso, comunicación y memoria ampliada, lo que garantiza un procesamiento de datos más rápido y una mayor capacidad multitarea.



Figura 1. PLC S7-1200 [15].

Este módulo PLC se puede observar en la figura 1, el cual sus características son; SIMATIC S7-1200, CPU 1212C, CPU compacta, CA/CC/relé, E/S integradas: 8 DI 24 V CC; 6 DO relé 2 A; 2 AI 0-10 V CC, alimentación: CA 85-264 V CA a 47-63 Hz, memoria de programa/datos 100 KB [15].

A continuación, se realiza una breve descripción de las ventajas y desventajas del PLC seleccionado para el desarrollo del trabajo de titulación:

Ventajas

- Ocupa poco espacio en paneles de control.
- Cuenta con entradas analógicas y digitales suficientes.
- Ocupa alimentación CA directa por lo que no fue necesario utilizar una fuente externa.
- Cuenta con una potente memoria y procesador.

- Soporta varios lenguajes de programación como LAD y SCL que se utilizaron para los dos tipos de controladores.
- Salidas Rly compatibles con cargas de CA y CC.

Desventajas

- Costo elevado.
- No cuenta con salidas analógicas.

2.2.9. Módulo de salida analógica SM 1232AQ2

El módulo de salida analógica SM 1232 es un dispositivo principal en los sistemas de automatización industrial, debido a que admite la conversión de señales digitales en señales analógicas para controlar diversos dispositivos, como variadores de velocidad, actuadores y sistemas de regulación. Tiene tiempos de conversión extremadamente cortos los cuales ayudan a una adaptación óptima, conexión directa de actuadores en una resolución de hasta 14 bits permitiendo la conexión de actuadores sin un amplificador adicional y flexibilidad [16].

2.2.10. Variador de frecuencia Siemens Simamics V20

El variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20 observado en la figura 3, es diseñado para ofrecer un equilibrio entre rendimiento y simplicidad, este variador permite ajustar la velocidad y el torque de motores eléctricos, optimizando el consumo de energía y mejorando la eficiencia operativa.



Figura 2. Variador de frecuencia V20 [17].

Posee diferentes características relevantes, entre las que se destaca el voltaje de 200-240 V 1 AC $-10/+10\%$, frecuencia de 47-63 Hz potencia nominal 0,55 kW con sobrecarga del 150 % durante 60 s sin filtrar E/S: 4 DI, 2 DO, 2 AI, 1 AO bus de campo: USS/Modbus RTU con panel de operador básico incorporado protección: IP20/UL abierto tamaño: AB 68 × 142 × 128 (An × Al × P) [17].

2.2.11. Tia Portal

Con el objetivo implementar el modelo de control por medio del PLC, se utilizó el IDE de Tia portal, debido a que posee un entorno intuitivo, estandarizado y utilizado mayormente en gran parte de la industria. Para facilitar la compatibilidad de equipos y tener contratiempos se decidió usar todos los elementos de la marca Siemens como variador, modulo analógico y motor trifásico que era algo con lo que ya se contaba y representó un ahorro dentro del presupuesto establecido.

Tia Portal (Totally Integrated Automation Portal) es el portal de automatización totalmente integrada desarrollado por Siemens que proporciona acceso sin restricciones a la gama completa de servicios de automatización digitalizada, desde la planificación digital y la ingeniería integrada hasta la operación transparente. Este software integra en una sola plataforma diversas herramientas para la programación de PLCs, HMIs, variadores de frecuencia, redes industriales y otros dispositivos de control [18].

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA.

3.1. Tipo de Investigación

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, fue fundamental analizar y evaluar las técnicas seleccionadas para el control de la velocidad de un motor trifásico. En particular, se realizó una comparación entre los controladores clásicos y los controladores inteligentes, mediante un análisis estadístico de los datos del tiempo de estabilidad para cada controlador a diferentes velocidades, con el objetivo de determinar si existe o no una diferencia significativa entre ellos.

3.1.1. Investigación experimental

Debido al análisis comparativo, el diseño de investigación es de tipo experimental debido a que se llevó a cabo mediante experimentos rigurosamente diseñados y controlados, donde se manipularon variables independientes y se midieron las respuestas obtenidas, lo que permitió una evaluación del trabajo de cada controlador.

3.1.2. Investigación descriptiva:

El enfoque descriptivo se basa en la recopilación sistemática de datos mediante diversas técnicas, con el propósito de obtener información relevante para la investigación. En este estudio, se han empleado métodos de recolección de datos a diferentes velocidades, con el fin de realizar un análisis estadístico que permita evaluar el comportamiento del sistema.

3.2. Enfoque de la Investigación

Se utiliza el enfoque cuantitativo, ya que permite recolectar datos numéricos e interpretarlos, como la velocidad y el tiempo de estabilidad en tiempo real aplicados a motores trifásicos. Según Hernández, se "utiliza la recolección de datos para la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías" [8], con esto se puede establecer un análisis puntual para poder interpretarlo de manera objetiva.

3.3. Población y Muestra

3.3.1. Población

La población está compuesta por los datos generados por la variable dependiente, que corresponde al tiempo de estabilidad del motor trifásico, evaluado con cada tipo de controlador.

3.3.2. Muestra

La muestra se obtuvo la selección aleatoria de datos provenientes de la población previamente definida.

3.4. Diseño de la Investigación

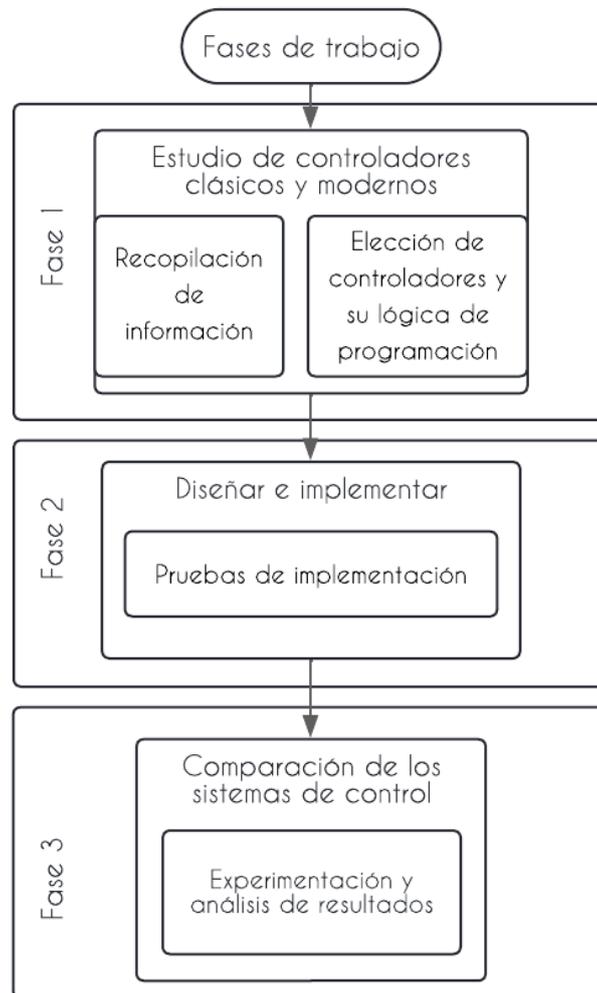


Figura 3. Diagrama de las fases de trabajo.

En la figura 3, se muestran las fases que tienen este trabajo de titulación. A continuación, se detallan las actividades correspondientes a cada fase:

Fase 1. Estudio de controladores clásicos y modernos

1.1. Recopilación de información:

- Se realizó una investigación para obtener la información sobre las diferentes tecnologías de controladores clásicos e inteligentes aplicadas al control de velocidades en motores trifásicos.
- En las tablas 1 y 2, se puede evidenciar el estudio realizado respecto a cada tipo de controlador.

Tabla 1 Ventajas y desventajas de controladores clásicos

	PD	PI	PID
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la respuesta transitoria. - Previene los cambios y reduce las oscilaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil de implementar, apto para sistemas lentos. - Menor sensibilidad de ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la respuesta transitoria. - Flexible y aplicable a una extensa variedad de sistemas.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilidad al ruido. - Difícil de ajustar por la necesidad de una derivada precisa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Respuesta más lenta que el PD o PID. - Puede ocasionar oscilaciones y no prevenir cambios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajuste complejo - Puede ocasionar sobre impulso u oscilaciones.

- A partir del análisis de la tabla 1, se optó por el controlador PID para su implementación y análisis representando al controlador clásico, debido a su flexibilidad, que permite ajustar la precisión, velocidad y estabilidad en un motor trifásico. Además, para este tipo de controladores existe métodos de ajuste como el Ziegler-Nichols, que proporciona una forma sistemática y rápida de sintonización.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de controladores inteligentes.

	Redes neuronales artificiales	Algoritmos genéticos	Fuzzy
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Aprenden a partir de datos. - Adaptables en línea a cambios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Optimización global. - Versatilidad y adaptación automática. 	<ul style="list-style-type: none"> - No necesitan modelo matemático. - Fácil de interpretar y ajustar.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Entrenamiento costoso. - Difíciles de interpretar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso lento. - No son en línea. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil de escalar por sus ajustes artesanales.

- Respecto a la tabla 2, la mejor opción para su implementación y análisis como representante del controlador inteligente es el método Fuzzy, debido a su fácil interpretación y ajuste, ya que sus reglas son comprensibles y modificables. Aunque, estas son conocidas como “artesanales”, se debe a que el ser humano las define en función de su necesidad de interpretación.

Fase 2. Diseño e implementación de los controladores.

2.1. Diagrama de conexiones del tablero de control.

Tanto en controlador PID como el Fuzzy utilizan el mismo diagrama de conexiones, como se observa en la figura 4. Su única diferencia radica en el tipo de método con el que calcula el proceso para cada controlador dentro del módulo PLC.

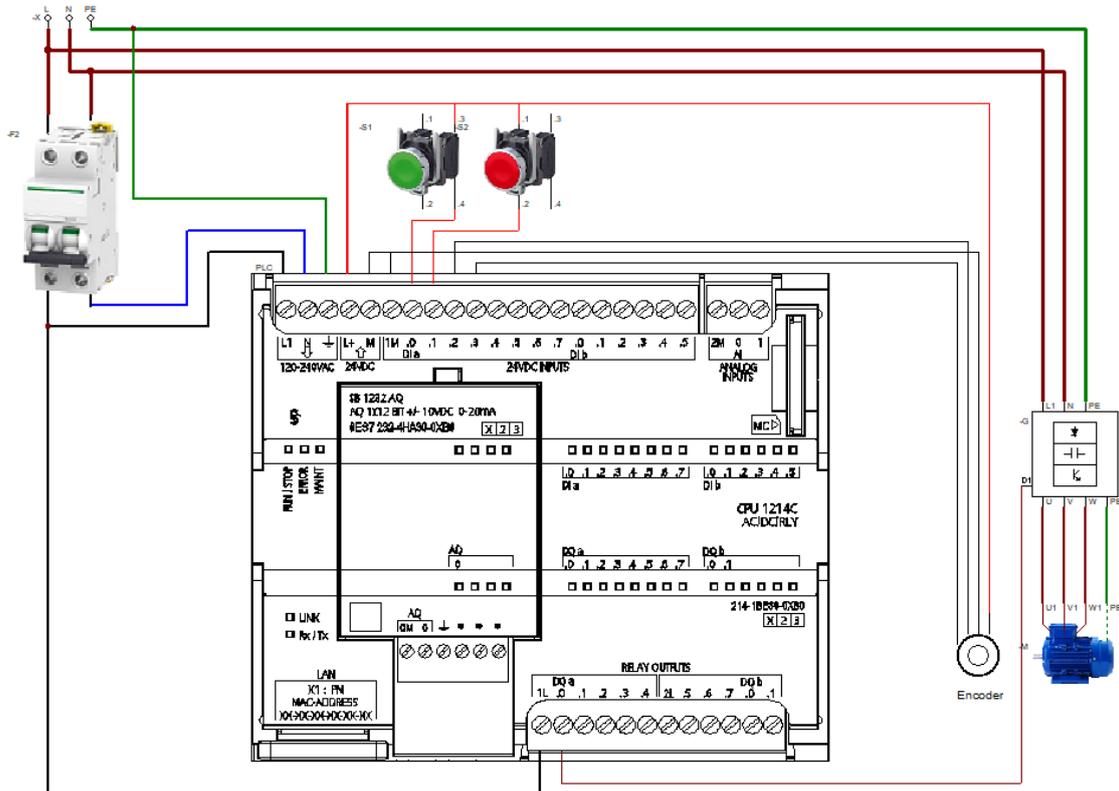


Figura 4. Diagrama de conexión del sistema de control.

La figura 5 muestra el esquema físico del sistema, tal como se presenta en el diagrama de conexiones del tablero, donde se observan las conexiones reales entre los componentes utilizados en el lazo de control.



Figura 5. Implementación física del tablero de control.

2.1.1. Materiales y Equipos

- Motor trifásico Siemens 1200 rpm
- PLC Simatic S7-1200, CPU 1212C AC/DC/Rly
- Módulo de salida analógica SM 1232AQ2
- Variador de frecuencia Siemens Simamics V20
- Encoder Incremental Hohner Serie 59

2.2. Controlador PID

2.2.1. Diseño del controlador PID

La figura 6 representa un sistema de control en lazo cerrado, diseñado para regular la velocidad de un motor trifásico utilizando el controlador PID.

Este controlador consta de tres parámetros: el proporcional (P), el derivativo (D) e integral (I). La combinación de estos permite ajustar un sistema partiendo de un elemento de control [19].

$$CV = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$\begin{matrix} P & I & D \end{matrix}$

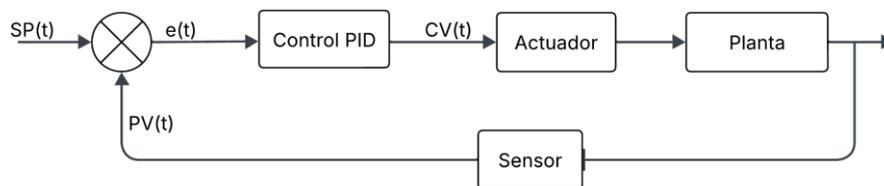


Figura 66. Diagrama de controlador PID en lazo cerrado.

El parámetro de ganancia proporcional ajustable consiste en hacer que el error se aproxime a cero a través del producto entre el error y la constante proporcional. Es importante cuidar que el sistema no llegue a una sobre oscilación; por motivo de seguridad, no debe sobrepasar el 30%. Lo más prudente es que la parte proporcional ni siquiera provoque dicha acción.

La acción de control integral disminuye y elimina el estado del error que la parte proporcional no ha sido capaz de ajustarse por sí sola. Esta acción interviene cuando la variable y la consigna tienen una desviación, integrando el error en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.

La acción derivativa mantiene el error al mínimo evitando que se incremente, y corrige en función de la velocidad con la que se produce. Sin embargo, habitualmente es poco utilizada por su sensibilidad al ruido y al efecto que puede generar en el sistema.

2.2.2. Función de transferencia

Para obtener la función de transferencia del motor trifásico, se utilizó una prueba en lazo abierto. Se aplicó una señal escalón a través del variador de frecuencia y se registró la

respuesta en velocidad del motor mediante un encoder. A partir de la curva obtenida, se estimaron los parámetros característicos del sistema, como la ganancia, la constante de tiempo y el posible retardo. Finalmente, se ajustó un modelo de primer orden que representa adecuadamente el comportamiento dinámico del motor.

A partir de la respuesta obtenida, mostrada en la figura 7, donde la línea roja representa la señal escalón y la línea azul muestra la respuesta en velocidad del motor trifásico en rpm.

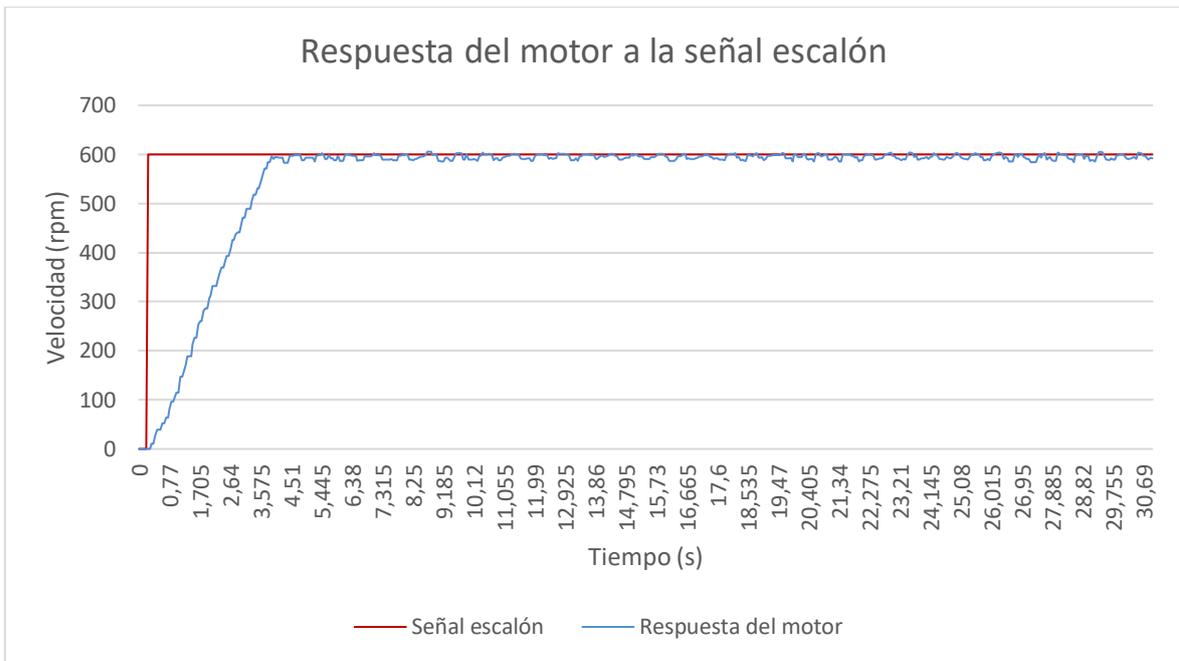


Figura 77. Respuesta del motor trifásico.

Se obtuvo la función de transferencia del sistema y la función continua, con una estimación del 88.96 % y un tiempo de muestreo de 0.3s, como se observa en la figura 8, donde la línea gris representa la respuesta en velocidad del motor trifásico, mientras que la línea azul muestra la respuesta simulada del modelo estimado.

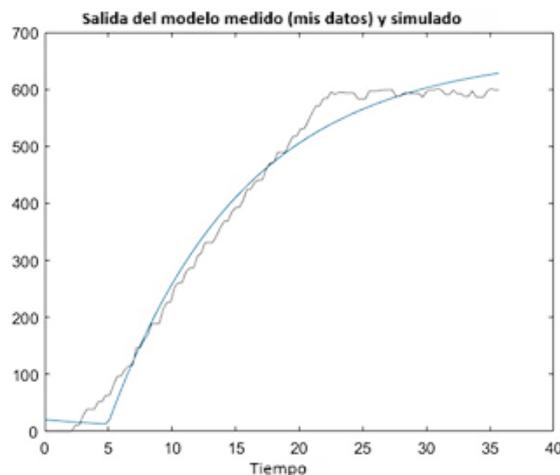


Figura 88. Estimación de la función de transferencia del motor trifásico.

Función de transferencia obtenida para el motor trifásico de 1200 rpm.

$$H(s) = \frac{1.108(e^{-3.17*s})}{10.66s + 1} \quad (2)$$

2.2.3. Cálculo de las constantes K_p , K_i y K_d

Un sistema que se comporta aproximadamente como un modelo de primer orden con retardo, cuya respuesta tiene que ser una curva de forma S o sigmoideal estimada por una tangente y un punto, se puede aplicar el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto [20]. Para desarrollar este método, se envió valor unitario al motor como se observa en la figura 7, y a partir de la respuesta en la salida se obtuvo los parámetros del controlador.

La forma de la curva depende del retardo en el tiempo L y por la constante de tiempo τ . Su función de transferencia se representa como se observa en la ecuación (3):

$$G_p(s) = \frac{K e^{-L*s}}{\tau * s + 1} \quad (3)$$

Se puede obtener los parámetros de retardo y la constante de tiempo, dibujando la tangente en el punto de inflexión de la curva sigmoideal y luego determinar las intersecciones de la línea tangente con el eje del tiempo y el eje donde $c(t) = K$ como se muestra en la figura 9:

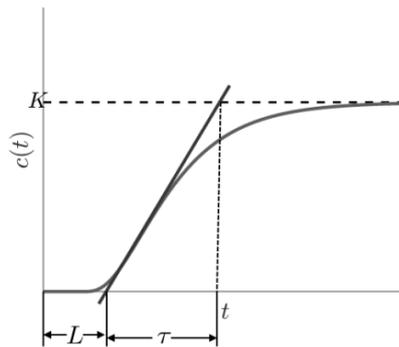


Figura 99. Parámetros en la curva sigmoideal [20].

Ziegler y Nichols sugirieron un ajuste del PID de acuerdo como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Tabla Ziegler-Nichols lazo abierto[20].

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{K \cdot L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{K \cdot L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{K \cdot L}$	$2 \cdot L$	$0.5 \cdot d$

Finalmente, con valores obtenidos se obtuvo las constantes en la ecuación (4).

$$G_c(s) = K_p(1 + T_i s + T_d s) \quad (4)$$

Tabla 4. Constantes PID obtenidas.

Kp	1.611
Ti	10.812
Td	0

2.2.4. Implementación del control PID

Para la implementación del controlador PID en el módulo lógico programable (PLC), se siguieron las etapas representadas en la figura 10.

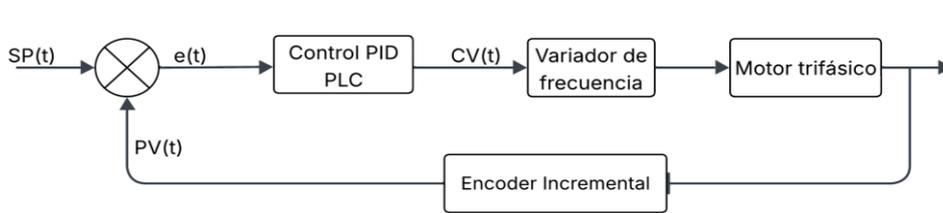


Figura 1010. Diagrama de implementación PID en PLC.

El PLC tuvo la ventaja de contar con una instrucción específica para implementar el control PID, mediante el bloque funcional denominado PID_Compact, como se muestra en la figura 11.

Para su correcta implementación, fue necesario realizar un proceso de normalización y escalado de señales, ya que la consigna de velocidad seleccionada se expresaba en un rango de 0 a 1200 rpm.

Se utilizaron las dos entradas principales del bloque PID Compact (Setpoint e Input) y una salida (Output), las cuales fueron escaladas a un rango porcentual de 0 a 100 % para garantizar la compatibilidad con el formato requerido por el controlador.

De forma similar, la salida del bloque PID, correspondiente a la variable de control (CV), fue escalada al rango de 0 a 27648. Este ajuste fue necesario para que el variador de frecuencia pudiera interpretar correctamente la señal y así regular la velocidad del motor trifásico de manera precisa y estable.

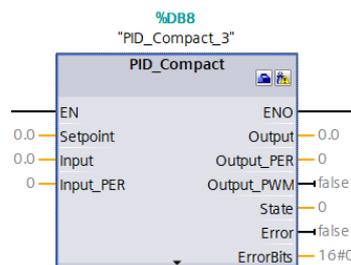


Figura 1111. Instrucción PID compact en PLC.

Para la realimentación del sistema se lo realizó mediante el encoder incremental, tomando en cuenta la ecuación (5).

$$Vel_{rpm} = FR \times \left(\frac{1rev}{IMP}\right) \times \left(\frac{60 seg}{1min}\right) \quad (5)$$

Donde:

FR = frecuencia del encoder (pulsos/s)

IMP = pulso/vuelta del encoder

2.2.5. Resultado del controlador PID

Finalmente, en la figura 12 se muestran dos señales: el setpoint, en color azul, y la respuesta del motor, en color rojo.

Tras enviarse, el setpoint permanece constante, representando la velocidad deseada en el sistema. Por otra parte, la señal de respuesta muestra como el sistema evoluciona en el tiempo hasta alcanzar dicho valor.

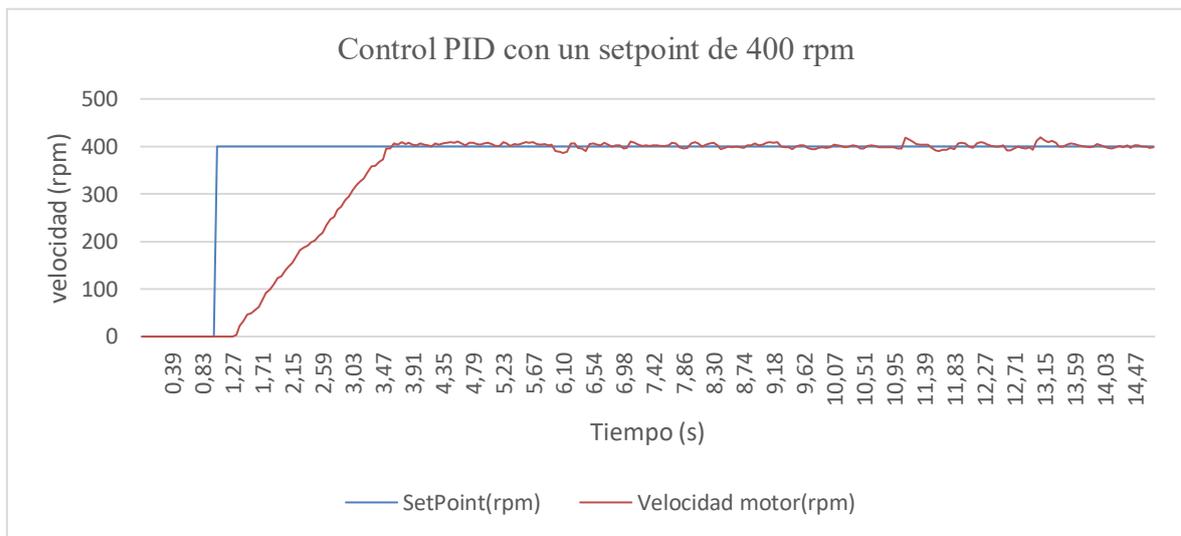


Figura 12. Respuesta del sistema mediante control PID.

2.3. Controlador con Lógica Difusa

A diferencia de los métodos convencionales, las técnicas basadas en lógica difusa, a través en conjuntos difusos, destacan por su capacidad para captura y adaptarse a entornos dinámicos con múltiples matices [21].

Como se observa en la figura 13, el control Fuzzy presenta exactamente la misma estructura de un PID; simplemente cambió el bloque de programación.

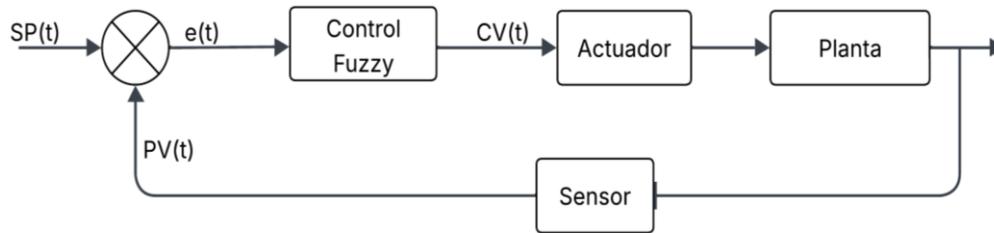


Figura 1313. Diagrama de controlador Fuzzy.

El PLC integraba entre sus bloques de función la facilidad de introducir código en lenguaje SCL. Esta característica permitió implementar las reglas difusas de forma más eficiente, sin la necesidad de programar desde cero algoritmos complejos, facilitando su desarrollo.

2.3.1. Diseño del controlador difuso

El funcionamiento básico del controlador Fuzzy se estructuró en tres etapas: difusor, inferencias y desdifusor [22], como se indica en la figura 14. El primer paso consistió en definir claramente las variables de entrada y salida del sistema, lo cual fue fundamental para establecer la base de reglas y el comportamiento deseado del controlador.

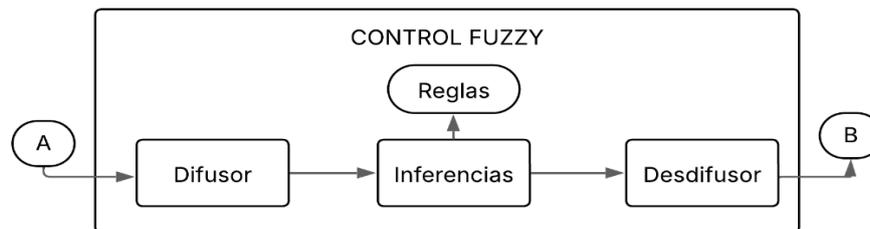


Figura 1414. Diagrama de estructura control Fuzzy.

Se estableció los parámetros de entrada y salida para estimar el comportamiento del sistema, basado en un juicio propio. Estos parámetros permitieron que el sistema tomara decisiones derivadas de un juicio humano cuando la información fue imprecisa o incierta.

- **Entrada:**
A= Establece la velocidad de motor en rpm.
- **Salida:**
B= Control porcentual en función del variador de frecuencia.
- **Establecer los universos:**
 $A = [-a3 \dots a3]$
 $B = [-b3 \dots b3]$

2.3.2. Difusor

Es la primera etapa del controlador difuso. Su función fue convertir los valores numéricos de entrada en conjuntos difusos, se utilizaron funciones de afiliación triangulares y trapezoidales para expresar A, por medio de las funciones de membresía [23].

Se establece los conjuntos difusos.

Estos se establecen para darle un grado de pertenencia a cada valor ingresado, indicando en qué medida dicho valor forma parte de un conjunto como se observa en la figura 15, y en la figura 16 para los valores de salida.

A

- Velocidad Alta Izquierda (VAI)
- Velocidad Media Izquierda (VMI)
- Centrado (C)
- Velocidad Media Derecha (VMD)
- Velocidad Alta Derecha (VAD)

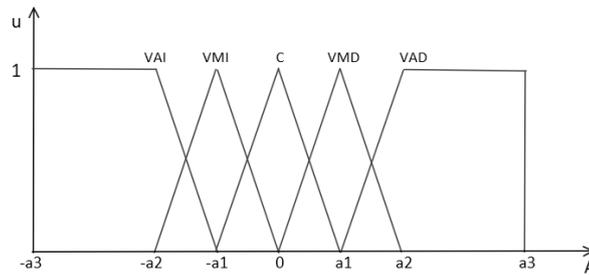


Figura 1515. Conjunto de parámetros de entrada.

B

- Máximo Izquierda (MI)
- Medio Izquierda (NI)
- Quieto (Q)
- Medio Derecha (ND)
- Máximo Derecha (MD)

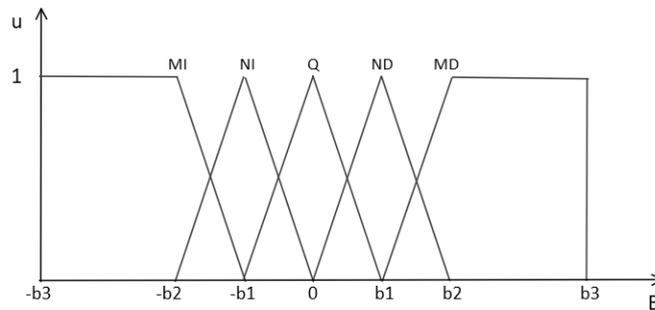


Figura 1616. Conjunto de parámetros de salida.

Para A (Funciones de membresía)

Los conjuntos difusos se definen mediante funciones de membresía, las cuales fijan en qué grado un valor pertenece a un conjunto difuso. Estas funciones permiten asignar un grado de pertenencia a un valor específico.

$$\begin{aligned}
\mu_{VAI} &= \begin{cases} 1, & A < -a2 \\ \frac{A + a1}{a1 - a2} & -a2 \leq A < -a1 \\ 0, & A \geq -a1 \end{cases} & \mu_{VMI} &= \begin{cases} 0, & A < -a2 \\ \frac{A + a2}{a2 - a1} & -a2 \leq A < -a1 \\ \frac{-A}{a1} & -a1 \leq x < 0 \\ 0, & A \geq 0 \end{cases} \\
\mu_C &= \begin{cases} 0, & A < -a1 \\ \frac{A + a1}{a1} & -a1 \leq A < 0 \\ \frac{-a1 - A}{a1} & 0 \leq A < a1 \\ 0, & A \geq a1 \end{cases} & \mu_{VAD} &= \begin{cases} 0, & A < 0 \\ \frac{A}{a1} & 0 \leq A < a1 \\ \frac{a2 - A}{a2 - a1} & a1 \leq x < a2 \\ 0, & A \geq a2 \end{cases} \\
\mu_{VAI} &= \begin{cases} 0, & A < a1 \\ \frac{A + a1}{a1 - a2} & a1 \leq A < a2 \\ 1, & A \geq -a2 \end{cases} & & (6)
\end{aligned}$$

2.3.3. Inferencias

Las inferencias es el proceso en el que el sistema analizó los datos difusos obtenidos del difusor y aplicó las reglas difusas para determinar la respuesta del sistema.

- 1) Establecer las reglas

Tabla 5. Reglas Fuzzy.

VAI	MI
VMI	NI
C	Q
VAD	ND
VAI	MD

- 2) Ejecutar las inferencias según las reglas:

$$\begin{aligned}
u_{VAI} &= u_{MI} \\
u_{VMI} &= u_{NI} \\
u_C &= u_Q \\
u_{VAD} &= u_{ND} \\
u_{VAI} &= u_{MD}
\end{aligned}$$

2.3.4. Desdifusor

Es la última etapa del controlador difuso. Su función fue convertir los valores difusos generados por la inferencia en un valor numérico preciso que el sistema pueda usar como salida. Para ello, se obtuvo su área y centroide de cada función de membresía.

En la figura 17, se aprecia un ejemplo de un área de un triángulo y de un trapecio de manera general.

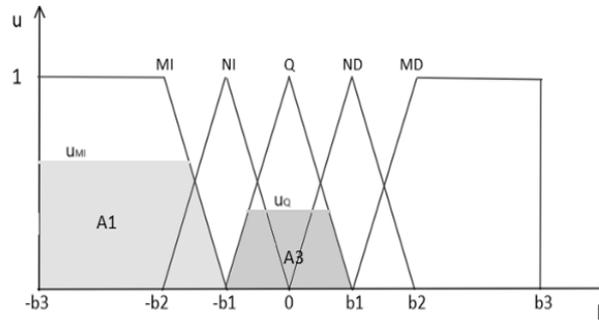


Figura 1717. Vista general de áreas.

Tabla 6. Resumen de áreas y centroides.

Áreas	Centroides
$A_1 = \left[\frac{X + (b_3 - b_1)}{2} \right] \mu_{MI}$	$C_1 = -b_1 - x_c$ Donde, $x_c = \frac{x_{c1}A_1 + x_{c2}A_2}{A_1 + A_2}$
$A_2 = \left[\frac{b_2(1 - \mu_{NI}) + b_2}{2} \right] \mu_{NI}$	$C_2 = \frac{-b_2}{2}$
$A_3 = b_1 \mu_Q (2 - \mu_Q)$	$C_3 = 0$
$A_4 = \frac{b_2 \mu_{ND}}{2} (2 - \mu_{ND})$	$C_4 = \frac{b_2}{2}$
$A_5 = \left[\frac{X + (b_3 - b_1)}{2} \right] \mu_{MD}$	$C_5 = b_1 + x_c$ Donde, $x_c = \frac{x_{c1}A_1 + x_{c2}A_2}{A_1 + A_2}$

Finalmente, la salida:

$$Salida = \frac{\sum A_i C_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 C_1 + A_2 C_2 + A_3 C_3 + A_4 C_4 + A_5 C_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5} \quad (7)$$

2.3.5. Implementación del control con lógica difusa

Para la implementación del controlador Fuzzy en el módulo lógico programable (PLC), se siguieron las etapas representadas en la figura 18. La única diferencia notoria respecto al sistema PID anteriormente implementado consistió en sustituir el bloque PID por el bloque Fuzzy diseñado para esta aplicación.

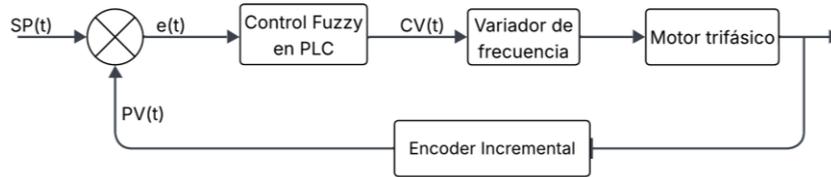


Figura 1818. Diagrama de control Fuzzy en PLC.

A continuación, en la figura 19, se presenta la programación implementada en un bloque de función para PLC mediante lenguaje SCL.

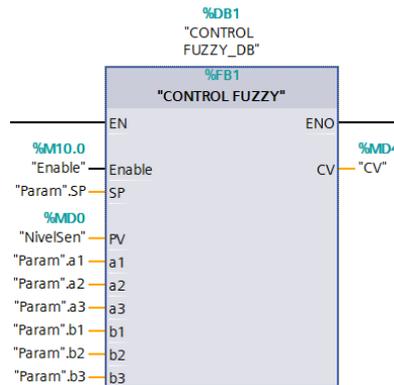


Figura 19. Bloque de función en SCL.

Dentro de este bloque de función difusa, primero se definió la entrada, designada con la letra A, correspondiente al error obtenido a partir de la diferencia entre la consigna (SP) y la variable de proceso (PV).

Se empleó una estructura condicional principal tipo *if*, organizada según el orden mostrado en la figura 20.

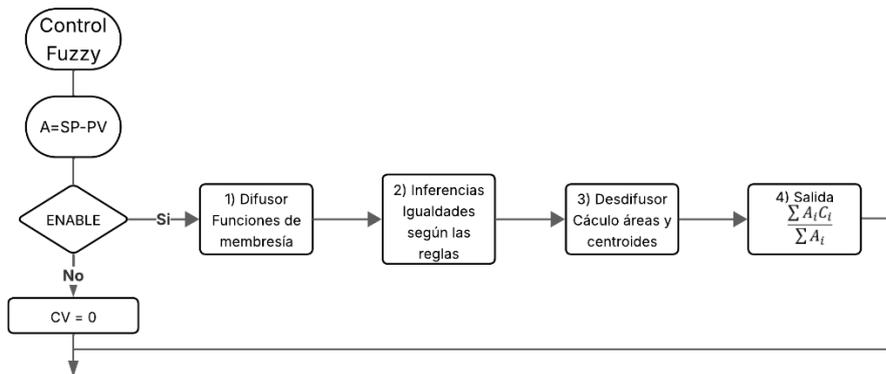


Figura 20. Estructura de programación bloque Fuzzy.

Esta estructura se dividió en 4 bloques, los cuales solo empezaron a procesarse siempre y cuando en bloque fuzzy estuviera habilitado.

- 1) **Difusor.** – Se definieron las funciones de membresía dentro de estructuras *if* secundarias, siguiendo la secuencia como se muestra en la figura 21. Esta función de membresía determinó cómo se traduce el error (A) a un grado de pertenencia (μ)

dentro del conjunto difuso "VAI". Este proceso se repitió para las cuatro funciones de membresía restantes.

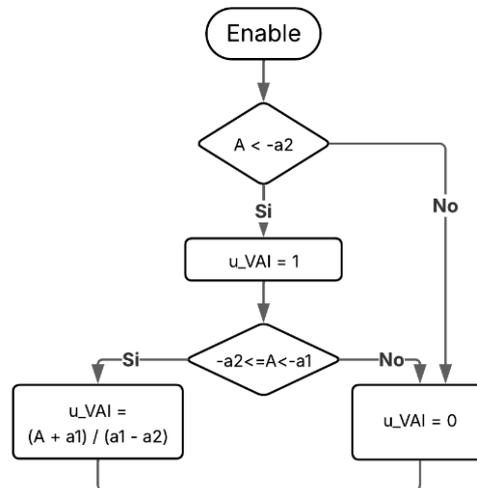


Figura 21. Diagrama de flujo conjunto difuso VAI.

- 2) **Inferencias.** – Se ejecutaron las inferencias según las reglas propuestas en la sección 2.3.2, apartado 2.
- 3) **Desdifusor.** – En la tabla 6 se realizó un resumen de los cálculos realizados, correspondientes a las áreas y centroides de cada figura. Estas operaciones se ingresaron en este apartado mediante código SCL.
- 4) **Salida.** – Como indica la ecuación (7), el resultado del producto de la suma entre áreas y centroides entre la suma de todas las áreas se obtiene en la salida de la variable controlada (CV), en valores de porcentaje del 0 a 100 respectivamente. Cuando el control Fuzzy no se encontraba activo, CV tomaba un valor de 0.

Finalmente, los valores que se asignó a las variables de entrada y salida se resumen en la tabla 7. Cabe resaltar que estos fueron valores asignados a juicio propio y con los que se obtuvo mejor respuesta del sistema.

Tabla 7. Valores asignados al control Fuzzy.

Entrada (A) rpm		Salida (B) %	
a1	5	b1	2
a2	300	b2	30
a3	1200	b3	100

2.3.6. Resultados del controlador Fuzzy

Finalmente, en la figura 22 se muestran dos señales: el setpoint en color azul y la respuesta del motor en color rojo. Tras enviarse, el setpoint permanece constante, representando la velocidad deseada en el sistema. Por su parte, la señal de respuesta muestra como el sistema va creciendo en el tiempo hasta alcanzar el valor deseado.

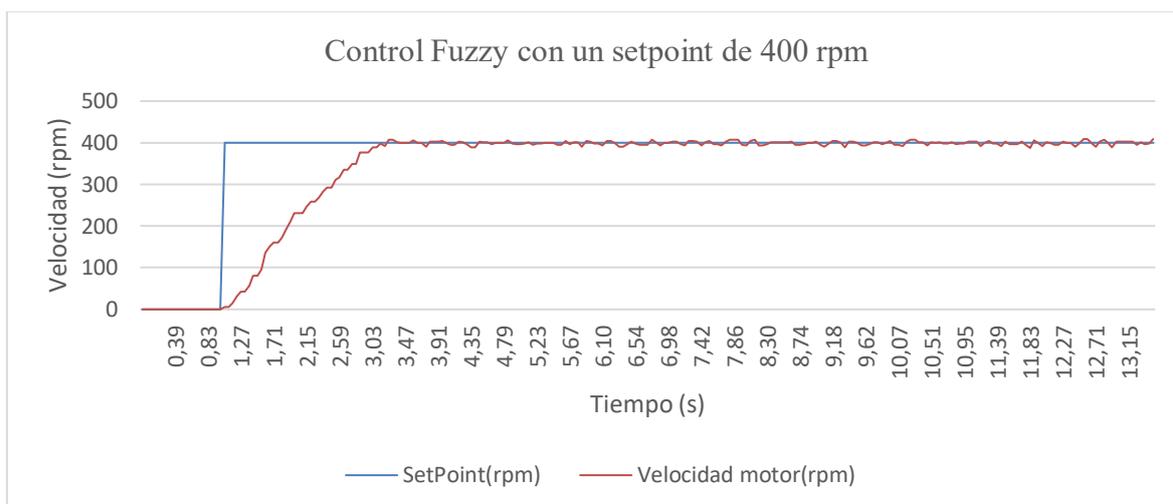


Figura 22. Respuesta del sistema mediante control Fuzzy.

Fase 3. Comparación de los sistemas de control

1.1. Experimentación:

- Se realizaron pruebas experimentales del módulo PLC implementado para el control de velocidades de motores trifásicos, aplicando ambos modelos a comparar.

1.2. Análisis de resultados:

- Se evaluó el rendimiento de los controladores respecto al tiempo de estabilidad, a partir de los datos recopilados durante las pruebas. Y se discutió los beneficios y desventajas de cada uno de los sistemas de control, basándose en los resultados obtenidos mediante un análisis estadístico.

3.5. Operacionalización de Variables

En la tabla 8 se detalló las variables a ser consideradas para la experimentación y análisis comparativo entre los dos tipos de controladores.

Tabla 8. Operacionalización de variables.

Variable	Descripción	Indicador	Técnicas e Instrumentación
Independiente			
Velocidad	Se refiere a la velocidad de rotación del rotor del motor.	RPM	Encoder
Tipo de controlador	Se refiere a una clasificación de la forma que se va a	Clásico/moderno	Observación directa

	controlar la velocidad.		
Dependiente			
Tiempo de estabilidad	Tiempo que tarda el motor en alcanzar un estado de equilibrio.	segundos	Observación directa

3.6. Técnica de recolección de datos

En primer lugar, se recopiló la información respecto a la investigación, con el fin de implementar las técnicas seleccionadas para su análisis. Y con ello, se llevó a cabo la recolección de datos bajo la condición de trabajo, en la que el sistema controla la velocidad del motor, para poder observar y analizar en que tiempo se estabiliza el mismo.

Según la noción de estabilidad; BIBO-estabilidad, un sistema es estable cuando responde de forma limitada una excitación limitada [24] de entrada con respecto a su salida, sin cambios significativos. Para esta recolección de datos se estableció como criterio de estabilidad que no tenga un cambio significativo mayor al 5% en el error.

Por lo tanto, su tiempo de estabilidad fue seleccionado desde el momento que su error fue menor al 5%, entre el setpoint y la velocidad dada del motor.

Tabla 9. Datos del tiempo de estabilidad para cada controlador a diferentes velocidades

Tipo controlador	Velocidad	Tiempo estabilidad
Clásico	100	1,82
Clásico	200	1,76
Clásico	400	2,59
Clásico	800	4,68
Inteligente	100	0,61
Inteligente	200	1,32
Inteligente	400	2,09
Inteligente	800	4,07

La tabla 9 muestra los datos que fueron utilizados para su análisis, como es la velocidad, el tiempo que se llegó a estabilizar el sistema y el tipo de controlador al que corresponde.

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizaron los datos presentados en la tabla 9 para realizar el análisis de los resultados. Dado que el tipo de controlador y la velocidad son datos fijos, se realizaron dos pruebas estadísticas para el análisis con respecto al tiempo de estabilidad.

Para el análisis del tiempo de estabilidad con el tipo de controlador se empleo la prueba de U de Mann-Whitney. Por otro lado, para analizar la relación entre el tiempo de estabilidad y la velocidad se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, la cual permite comparar más de dos grupos independientes.

4.1. Prueba de U de Mann-Whitney

Esta prueba fue utilizada para comparar las medias de una variable cuantitativa en este caso, el tiempo de estabilidad, entre dos categorías de una variable cualitativa dicotómica, correspondiente a los tipos de controladores [25].

Cada tipo de controlador es considerado independiente, debido a que se aplicó diferentes métodos para la recolección de muestras.

Se tomó en cuenta las hipótesis de la prueba que son:

- **Hipótesis nula (H_0):** Los dos tipos de controladores tienen el mismo tiempo de estabilidad.
- **Hipótesis alternativa (H_a):** Los dos tipos de controladores tienen diferentes tiempos de estabilidad.

Como se muestra en la tabla 10, que corresponde al resultado de la prueba de hipótesis sobre el tiempo de estabilidad considerando el tipo de controlador, se acepta la hipótesis nula, dado que el p-valor obtenido fu de 0,485714, el cual resulta ser significativo al 95%.

Tabla 10. Resultados de la prueba de hipótesis del tiempo de estabilidad considerando el tipo de controlador, con un nivel de significancia 0.5.

	Hipótesis Nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Tiempo estabilidad es la misma entre categorías de Tipo controlador.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	0,485714	Conserve la hipótesis nula.

4.2. Prueba de Kruskal-Wallis

Esta prueba fue utilizada para comparar los valores medianos de dos o más muestras independientes [26] haciendo referencia a la velocidad como variable categórica, respecto a una variable continua como es el tiempo de estabilidad.

Se planteo la prueba de hipótesis donde:

- **Hipótesis nula (H_0):** La distribución del tiempo de estabilidad es la misma sin importar la velocidad.
- **Hipótesis alternativa (H_a):** La distribución del tiempo de estabilidad es diferente sin importar la velocidad.

Como se muestra en la tabla 11, que corresponde al resultado de la prueba de hipótesis del tiempo de estabilidad en función de la velocidad, se acepta la hipótesis nula, debido a que se obtuvo un p-valor de 0,111610, el cual resulta ser significativo al 95%.

Tabla 11. Resultados de la prueba de hipótesis del tiempo de estabilidad en función de la velocidad, con un nivel de significancia 0.5.

	Hipótesis Nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Tiempo estabilidad es la misma entre categorías de Velocidad.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	0,111610	Conserve la hipótesis nula.

Finalmente, los resultados obtenidos respecto al análisis comparativo de cada variable independiente con la dependiente fueron:

- Los dos tipos de controladores tienen el mismo tiempo de estabilidad según la prueba de U de Mann-Whitney.
- De igual manera el tiempo de estabilidad es igual con respecto a la velocidad, según la prueba de Kruskal-Wallis.

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- En este trabajo se realizó un estudio previo considerando diferentes tipos de controladores como PD, PI, PID, redes neuronales artificiales, algoritmos genéricos y lógica difusa. Tras analizar sus ventajas y desventajas, se seleccionaron dos alternativas para su implementación; una clásica, el PID, y otra inteligente, basada en lógica difusa.
- Se diseñó e implementó exitosamente un sistema de control de velocidades para motores trifásicos aplicando dos tipos de controladores, uno clásico y el otro inteligente mediante un PLC S7-1200.
- Se llevó a cabo un estudio comparativo del efecto tanto de la velocidad de setpoint como del tipo de controlador respecto al tiempo de estabilización del sistema. Los resultados arrojaron que no existen diferencias significativas, es decir, no hay efecto ni por el tipo de controlador ni por la velocidad de setpoint.

5.2. Recomendaciones

- La aplicación del método de Ziegler-Nichols presentan una buena alternativa para realizar un ajuste manual de un controlador de tipo PID, facilitando la captación en tiempo real dentro del entorno de trabajo. Además, para mejorar la eficiencia y robustez del controlador Fuzzy, se sugiere optimizar las funciones de pertenencia mediante algoritmos de aprendizaje, los cuales ayudan a que se adapte a distintas condiciones del funcionamiento del actuador.
- Tener siempre presente el tipo de dato de la variable en la entrada del controlador, sea unidades físicas, medidas directas o valores normalizados según los requerimientos del sistema de control. También, la variable de salida dependerá de dichas condiciones, ya que cada dispositivo del sistema también tendrá su variable de funcionamiento, la cual dependerá del tipo de acoplamiento que el operador elija utilizar para la correcta respuesta entre todos los dispositivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Rozo-García, “Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 2, pp. 177–191, 2020., doi: 10.18273/revuin.v19n2-2020019.
- [2] A. M. Miranda Gamarra and D. R. Ruiz Quishpe, “Diseño e implementación de un módulo educativo controlado mediante PLC S7-1200 con interfaz HMI, para simulación de procesos industriales neumáticos y electroneumáticos,” Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24091>
- [3] J. A. Cazalla Moral, “Diseño e implementación de controladores avanzados en PLC’s industriales,” Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2023. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/198543>
- [4] A. F. Alaminos-Fernández, “Introducción a la teoría de conjuntos difusos y sus aplicaciones en investigación social e IA.” Universidad de Alicante. Departamento de Sociología II | Universidad de Alicante. Instituto Interuniversitario de Desarrollo Social y Paz, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10045/132732>
- [5] D. R. Navarrete Diaz and H. Cevallos Ulloa, “Análisis comparativo de controladores clásicos versus controladores avanzados aplicados a una planta real de control de nivel de dos tanques no interactivos bajo la plataforma de LABVIEW,” Thesis, ESPOL. FIEC, 2019. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52559>
- [6] J. L. Chacha Yugcha, “Análisis de la operación de motores trifásicos mediante el diseño e implementación de un módulo didáctico en el laboratorio de electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi - La Maná,” Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), Ecuador : La Maná : Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7928>
- [7] J. C. Noguera Barahona and O. E. Ramos Rodríguez, “Diseño e implementación de un control difuso de temperatura para etapa de calentamiento y enfriamiento de planta térmica del Grupo de Investigación Integra,” Dec. 2024, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/92057>
- [8] F. A. Sepúlveda Sánchez, “Desarrollo de una estrategia de control PID para el sistema bola y viga,” Universidad Francisco de Paula Santander, 2021. [Online]. Available: <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/handle/20.500.14167/985>
- [9] A. A. Ba Villareal, “Desarrollo y diseño de una interfaz para una red de PLC’s basada en internet de las cosas,” Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Quintana Roo, México, 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12249/2772>
- [10] O. Camacho *et al.*, “Control basado en lógica difusa: De los fundamentos a las aplicaciones,” *Rev. Digit. Novasinerгия*, vol. 4, no. 2, pp. 6–37, Nov. 2021, doi: 10.37135/ns.01.08.01.
- [11] G. A. A. Salvador, *Ejemplario: Ecuaciones Diferenciales Ordinarias*. UNAM, Facultad de Química, 2023.
- [12] N. J. Hernández Bueno, “Modelo de prospectiva para la formulación de escenarios del consumo energético de los sectores de consumo en Colombia,” Thesis, Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB, 2022. [Online]. Available: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/16165>
- [13] J. González Delgado, “Diseño e implementación analógica de un controlador por asignación de polos,” 2023, [Online]. Available: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33585>

- [14] D. G. Andrango Quishpe and J. L. Angueta Ramos, “Diseño de un simulador en entorno virtual Labview con el análisis de variables eléctricas y técnicas de arranque de motores trifásicos’.” Feb. 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7305>
- [15] SiePortal, “CPU 1212C,” Siemens Argentina. Accessed: Mar. 14, 2025. [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/6ES7212-1BE40-0XB0>
- [16] SiePortal, “SM 1232 analog output modules,” Siemens Argentina. Accessed: Mar. 14, 2025. [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10045689?activeTab=productinformation®ionUrl=WW>
- [17] SiePortal, “Convertidores básicos SINAMICS V20,” Siemens Argentina. Accessed: Mar. 14, 2025. [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/EC/Catalog/Product/?mlfb=6SL3210-5BB15-5UV1&SiepCountryCode=EC>
- [18] Siemens, “TIA Portal,” Siemens Argentina. Accessed: Mar. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/ar/es/productos/automatizacion/software-industrial/tia-portal.html>
- [19] B. C. Kuo, *Sistemas de control automático*. Pearson Educación, 1996.
- [20] M. A. Andrade-Zeballos, “Comparativa de Técnicas de Aprendizaje Automático para Análisis y Predicción de Sequía,” masterThesis, 2022. [Online]. Available: <https://reunir.unir.net/handle/123456789/13248>
- [21] J. Lu, G. Ma, and G. Zhang, “Fuzzy Machine Learning: A Comprehensive Framework and Systematic Review,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 32, no. 7, pp. 3861–3878, Jul. 2024, doi: 10.1109/TFUZZ.2024.3387429.
- [22] W. Mei, “Formalization of Fuzzy Control in Possibility Theory via Rule Extraction,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 90115–90124, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928137.
- [23] Y. Feng and L. Wei, “Fuzzy Control of Drilling Rig Winch Motor Based on SAWS-SSA Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 136496–136506, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3338239.
- [24] A. A. Á. Sáez, “Estabilidad de sistemas lineales en tiempo continuo,” *Rev. Cient. UNANCHAY ISSN 2953-6707*, vol. 3, no. 1, pp. 14–30, Jun. 2024.
- [25] E. Ortega Páez, C. Ochoa Sangrador, and M. Molina Arias, “Pruebas no paramétricas,” *Evidencias en Pediatría*. Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: <https://evidenciasenpediatria.es/articulo.php?lang=es&id=7892>
- [26] R. Meléndez Surmay, R. Giraldo Henao, F. Rodríguez Cortes, R. Meléndez Surmay, R. Giraldo Henao, and F. Rodríguez Cortes, “Kruskal-Wallis Test for Functional Data Based on Random Projections Generated from a Simulation of a Brownian Motion,” *TecnoLógicas*, vol. 27, no. 59, Apr. 2024, doi: 10.22430/22565337.2986.

ANEXOS

Código en lenguaje SCL del bloque Fuzzy

```
//VALOR DE ERROR
#A := #SP - #PV;
//FUNCIONES DE MEMBRESÍA
IF #Enable THEN
  IF #A < - #a2 THEN
    #u_VAI := 1;
  ELSIF #A >= - #a2 AND #A < - #a1 THEN
    #u_VAI := (#A + #a1) / (#a1 - #a2);
  ELSE
    #u_VAI := 0;
  END_IF;
  IF #A < - #a2 THEN
    #u_VMI := 0;
  ELSIF #A >= - #a2 AND #A < - #a1 THEN
    #u_VMI := (#A + #a2) / (#a2 - #a1);
  ELSIF #A >= - #a1 AND #A < 0 THEN
    #u_VMI := (- #A) / (#a1);
  ELSE
    #u_VMI := 0;
  END_IF;
  IF #A < - #a1 THEN
    #u_C := 0;
  ELSIF #A >= - #a1 AND #A < 0 THEN
    #u_C := (#A + #a1) / (#a1);
  ELSIF #A >= 0 AND #A < #a1 THEN
    #u_C := (#a1 - #A) / (#a1);
  ELSE
    #u_C := 0;
  END_IF;
  IF #A < 0 THEN
    #u_VMD := 0;
  ELSIF #A >= 0 AND #A < #a1 THEN
    #u_VMD := (#A) / (#a1);
  ELSIF #A >= #a1 AND #A < #a2 THEN
    #u_VMD := (#a2 - #A) / (#a2 - #a1);
  ELSE
    #u_VMD := 0;
  END_IF;

  IF #A < #a1 THEN
    #u_VAD := 0;
  ELSIF #A >= #a1 AND #A < #a2 THEN
    #u_VAD := (#A - #a1) / (#a2 - #a1);
  ELSE
    #u_VAD := 1;
  END_IF;
  //INFERENCIAS (SEGUN REGLAS)
  #u_MI := #u_VAI;
  #u_NI := #u_VMI;
  #u_Q := #u_C;
  #u_SD := #u_ND;
  #u_ID := #u_MD;
  //DEFUZIFICANDO
  #X1 := #b3 - #b1 + #u_MI * (#b1 - #b2);
  #A_1 := ((#X1 + (#b3 - #b1)) / 2) * #u_MI;
  #C_1 := - #b1 - (((SQR(#b3 - #b1 - #X1) / 3) + (#b3 - #b1 - (#X1 / 2)) * #X1) / ((#b3 - #b1 + #X1) / 2));
  #A_2 := (#b2 * #u_NI / 2) * (2 - #u_NI);
  #C_2 := - #b2 / 2;
```

```

#A_3 := #b1 * #u_Q * (2 - #u_Q);
#C_3 := 0;
#A_4 := (#b2 * #u_SD / 2) * (2 - #u_SD);
#C_4 := #b2 / 2;
#X2 := #b3 - #b1 + #u_ID * (#b1 - #b2);
#A_5 := ((#X2 + (#b3 - #b1)) / 2) * #u_ID;
#C_5 := #b1 + (((SQR(#b3 - #b1 - #X2) / 3) + (#b3 - #b1 - (#X2 / 2)) * #X2) / ((#b3 -
#b1 + #X2) / 2));
//SALIDA FUZZY
#CV := (#A_1 * #C_1 + #A_2 * #C_2 + #A_3 * #C_3 + #A_4 * #C_4 + #A_5 * #C_5) / (#A_1
+ #A_2 + #A_3 + #A_4 + #A_5);
ELSE
#CV := 0;
END_IF;

```

Evidencias de implementación y obtención de datos.

