



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONTROL
FUZZY Y PID DE VELOCIDAD DE MOTORES.**

PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECÁNICO

AUTORES:

Edison Fabricio León Pilatasig

Marco Vinicio Pilco Landa

TUTOR:

Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C.

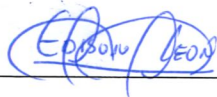
**LATACUNGA – ECUADOR
FEBRERO 2025**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Nosotros, León Pilatasig Edison Fabricio con cédula de ciudadanía No. 0504359407 y Pilco Landa Marco Vinicio con cédula de ciudadanía No.0504417304, declaramos ser autores de la presente propuesta **“ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONTROL FUZZY Y PID EN VELOCIDAD DE MOTORES”**, siendo Ing. MSc. Luigi Orlando Freire Martínez, Tutor del presente trabajo; eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posible reclamos o acciones legales.

Además, Certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 25 de febrero de 2025.



León Pilatasig Edison Fabricio

C.C: 0504359407



Pilco Landa Marco Vinicio

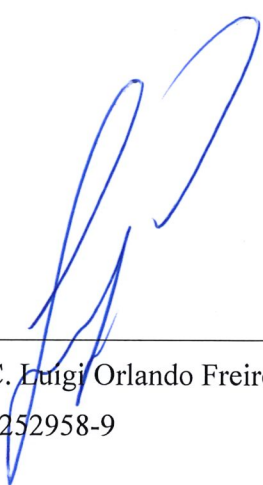
C.C: 0504417304

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONTROL FUZZY Y PID DE VELOCIDAD DE MOTORES”, de León Pilatasig Edison Fabricio y Pilco Landa Marco
Inicio de la carrera de Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 25 de febrero de 2025



Ing. MsC. Luigi Orlando Freire Martínez
C.C. 050252958-9

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: León Pilatasig Edison Fabricio y Pilco Landa Marco Vinicio, con el título de la Propuesta Tecnológica: **“ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONTROL FUZZY Y PID DE VELOCIDAD DE MOTORES”** ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometidos al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.


Latacunga, 25 de febrero 2025



Ing. Porras Reyes Jefferson Alberto

C.C: 0704400449

LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Ing. Cevallos Betún Segundo Ángel

C.C: 0501782437

LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Navarrete López Luis Miguel

C.C. 1803747284

LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios, quien me ha bendecido con salud y vida, por darme la fuerza, la perseverancia y la oportunidad de alcanzar esta meta.

A mis padres, quienes siempre creyeron en mí, por su amor incondicional, su apoyo incansable y sus palabras de aliento en cada paso de este camino. Gracias por enseñarme que el esfuerzo y la disciplina son clave para lograr cualquier objetivo.

A mi familia, quienes siempre me brindaron su apoyo y consejos ante cualquier circunstancia.

A la Universidad, gracias por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente.

A mis amigos y compañeros de estudio, por su apoyo, compañía y por compartir conmigo este proceso, haciéndolo más llevadero con su amistad y buenos momentos.

Edison León

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme guiado en cada paso de este camino, por darme la capacidad, la paciencia y la perseverancia para superar los desafíos y llegar hasta este punto en mi vida.

A mis padres y hermanos, gracias por su confianza en mí y por recordarme siempre que los sueños se alcanzan con trabajo y determinación.

A la universidad, que ha sido mi segundo hogar brindándome el conocimiento y las herramientas necesarias para mi crecimiento personal y profesional.

A mis compañeros de la carrera, con quienes compartí innumerables horas de estudio, alegrías y desafíos. Gracias por ser más que colegas.

A cada persona que de una u otra manera, ha sido parte de este proceso, mis más sinceros agradecimientos.

Marco Pilco

DEDICATORIA

A mis padres, Fausto y Ventura, por su amor incondicional y su apoyo inquebrantable, incluso cuando les fallé. Gracias por creer en mí cuando ni yo mismo lo hacía, por no darme la espalda en mis tropiezos y por demostrarme que su cariño siempre estará por encima de mis errores.

A mi familia, por su compañía, paciencia y palabras de aliento en los momentos difíciles. Su confianza en mí ha sido un motor invaluable en este proceso.

Y con un profundo amor y gratitud, dedico este logro a mi abuelito Andrés, quien, aunque ya no está físicamente conmigo, sé que me ha acompañado en cada paso. Su ejemplo, sus enseñanzas y su amor inquebrantable siguen vivos en mi corazón. Este triunfo también es para él, porque siempre creyó en mí y en mis sueños.

Edison León

DEDICATORIA

A mis padres, quienes que con sus enseñanzas y sacrificios sembraron en mí los valores que hoy me definen, me enseñaron a luchar con valentía y a no rendirme ante los obstáculos.

A mis abuelitos, aunque ya no están esencialmente a mi lado, siguen viviendo en cada uno de mis logros, aunque el destino no me permitió compartir con ustedes este momento, sé que desde el cielo me acompañan, guiando mis pasos con su luz y su bendición.

Con eterna gratitud, para ustedes, papá, mamá y abuelitos, este logro es en su honor.

Marco Pilco

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONTROL FUZZY Y PID DE VELOCIDAD DE MOTORES”

Autores:

León Pilatasig Edison Fabricio
Pilco Landa Marco Vinicio

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un entorno adecuado para el análisis comparativo de sistemas de control, específicamente entre un controlador PID y un controlador Fuzzy, aplicados a un sistema de control de velocidad. Para llevar a cabo esta comparación, se establecieron las condiciones técnicas de operación mediante modelos matemáticos que describen las variables de control y de proceso. Los sistemas de control fueron implementados utilizando un PLC Siemens S7-1200, aprovechando sus librerías específicas para la ejecución de los algoritmos de control en la memoria física. Como interfaz de comunicación, se empleó la plataforma OPC, lo que permitió una integración eficiente entre el prototipo experimental y el software KepServerEX, facilitando la ejecución de ambos controladores en tiempo real, en el motor trifásico, se aplicó los controladores para poder tener una velocidad estable y preestablecida por el usuario el motor está acoplado a un encoder incremental el cual mediante pulsos se pudo medir la velocidad. Cada controlador fue diseñado y simulado en Matlab Simulink, asegurando que las condiciones de implementación fueran óptimas. Una de las etapas más críticas fue la sintonización de los parámetros de control, buscando un equilibrio entre estabilidad y velocidad de respuesta del sistema.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el motor, evaluando el desempeño de ambos controladores frente a cambios de referencia y perturbaciones externas, El comportamiento de los controladores sobre el motor se analizó mediante dos métodos, con carga constante sobre el eje y carga nula sobre el eje, permitiendo establecer las diferencias, efectividad, desempeño entre los controladores y así obtener el comportamiento más óptimo del sistema en análisis. Se analizaron parámetros clave como el tiempo de estabilización, el sobre impulso y el tiempo de respuesta. Los resultados mostraron que, el control Fuzzy muestra una mayor rapidez en la estabilización, con tiempos entre 47% y 50% menores que el PID en la mayoría de los casos. En términos de respuesta, el controlador Fuzzy es generalmente más rápido en comparación al controlador PID. En cuanto al error, el sistema Fuzzy muestra un mejor desempeño, con menores variaciones en comparación con el PID, lo que sugiere una mayor precisión en el seguimiento de la referencia.

Palabras clave: Fuzzy, PID, encoder, OPC, PLC.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TITLE: “COMPARATIVE STUDY OF FUZZY AND PID ENGINE SPEED
CONTROL SYSTEMS”**

Authors:

León Pilatasig Edison Fabricio
Pilco Landa Marco Vinicio

ABSTRACT

In this project, a suitable environment was developed for the comparative analysis of control systems, specifically focusing on evaluating PID controllers in contrast to fuzzy controllers within a speed control system. To ensure a thorough comparison, we defined the technical operating conditions utilizing mathematical models that describe the control and process variables.

The control systems were implemented using a Siemens S7-1200 PLC, taking advantage of its specific libraries to execute control algorithms in physical memory. An OPC platform was employed as the communication interface, facilitating efficient integration between the experimental prototype and the KepServerEX software. This arrangement enables the real-time execution of both controllers within a three-phase motor system. The controllers were applied to have a stable speed and preset by the user. Furthermore, the motor is coupled with an incremental encoder, enhancing the capability for speed measurement through pulse counting. Each controller was designed and simulated in Matlab Simulink to ensure optimal implementation conditions. One of the most critical stages was tuning the control parameters, seeking a balance between stability and speed of response of the system.

Experimental tests were carried out on the motor, evaluating the performance of both controllers against reference changes and external disturbances. The behaviour of the controllers on the motor was analyzed by two methods, with a constant load on the shaft and zero loads on the shaft, allowing to establish the differences, effectiveness, and performance between the controllers and thus obtain the most optimal behaviour of the system in question. The key parameters analyzed included settling time, overshoot, and response time. The results indicated that the Fuzzy control system exhibits a notably faster settling time, with decreases of approximately 47% to 50% compared to the PID controller in most scenarios. Additionally, the Fuzzy controller generally responds more quickly than the PID controller. Regarding error performance, the Fuzzy system demonstrates greater accuracy, exhibiting minor variations compared to the PID controller, which suggests it is more effective in tracking the reference input.

Keywords: Fuzzy, PID, encoder, OPC, PLC.

ÍNDICE

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	SITUACIÓN PROBLÉMICA	3
2.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
2.3.	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	3
2.3.1.	Objeto de investigación	3
2.3.2.	Campo de Acción: 3310 Tecnología Industrial.....	3
2.4.	BENEFICIARIOS	3
2.4.1.	Directo	3
2.4.2.	Indirecto.....	4
2.5.	JUSTIFICACIÓN	4
2.6.	OBJETIVOS.....	4
2.6.1.	General.....	4
2.6.2.	Específicos.....	4
2.6.3.	Sistema de tareas	5
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1.	Antecedentes.....	6
3.2.	Proceso industrial	8
3.2.1.	Proceso continuo	8
3.3.	Sistema de REGULACIÓN O control	8
3.3.1.	Control Automático	9
3.3.2.	Sistema de control en lazo abierto.....	9
3.3.3.	Sistema de control en lazo cerrado.....	9
3.3.4.	Sistemas de control lineales.....	10
3.3.5.	Sistemas de control no lineales.....	11

3.3.6.	Sistemas de variantes en el tiempo	11
3.3.7.	Sistemas de control invariantes en el tiempo	11
3.3.8.	Sistemas de control en el tiempo continuo	11
3.3.9.	Función de transferencia.....	11
3.3.10.	Sistemas de primer orden	12
3.3.11.	Sistemas de segundo orden.....	12
3.4.	CONTROLADOR	13
3.4.1.	Controlador lógico programable.....	13
3.4.2.	Actuador	13
3.4.3.	Motor eléctrico	13
3.4.4.	Variador de frecuencia.....	14
3.4.5.	Encoder.....	14
3.5.	CONTROLADOR PID	14
3.5.1.	Control Proporcional Integral (PI).....	15
3.5.2.	Control Proporcional Derivativo (PD)	15
3.6.	CONTROLADOR FUZZY	16
3.6.1.	Conjuntos Fuzzy	16
3.6.2.	Función de membresía.....	17
3.6.3.	Operaciones FUZZY	18
3.6.4.	Fuzzificación	18
3.6.5.	Reglas Fuzzy	19
3.6.6.	Defusificación.....	20
3.6.7.	Sistema de inferencia Fuzzy	21
3.6.8.	Indicadores de rendimiento	21
3.6.9.	Matlab.....	21
3.6.10.	Comunicación OPC (Ole for Process Control).....	21
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	22

4.1.	REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE	23
4.1.1.	Motor de corriente alterna TECHTOP	23
4.1.2.	Controlador lógico programable (PLC).....	24
4.1.3.	Encoder incremental E6B2-CWZ6C	24
4.1.4.	Softwares y computadora	24
4.2.	ADQUISICIÓN DE DATOS Y OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	25
4.2.1.	Diseño del modelo de obtención de datos.	25
4.2.2.	Obtención de datos	27
4.2.3.	Procesamiento de datos	27
4.2.4.	Estimación de modelos	27
4.2.5.	Validación de modelos	30
4.3.	DESARROLLO DE CONTROLADORES.....	31
4.3.1.	Estructura de comunicación.....	32
4.3.2.	Programación en TIA Portal.....	32
4.3.3.	Configuración de OPC	33
4.3.4.	Programación de perturbación del sistema.....	34
4.3.5.	Desarrollo del control PID.....	35
4.3.6.	Implementación del controlador PID	36
4.3.7.	Desarrollo del control Fuzzy	37
4.4.	Validación de velocidad	41
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	42
5.1.	Análisis comparativo entre el control PID y Fuzzy.....	42
5.1.1.	Tiempo de asentamiento de señal.....	42
5.1.2.	Sobre impulso	45
5.1.3.	Tiempo de estabilización en descenso.....	47
5.1.4.	Tiempo de respuesta	50
5.1.5.	Comportamiento a diferentes SP	51

5.1.6.	Resumen del análisis comparativo	54
5.2.	Presupuesto	56
5.3.	Análisis de impactos	58
5.3.1.	Impacto práctico	58
5.3.2.	Impacto tecnológico	59
5.3.3.	Impacto epistemológico.....	59
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
6.1.	CONCLUSIONES.....	59
6.2.	RECOMENDACIONES	60
7.	REFERENCIAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema del funcionamiento de un sistema. [3].....	8
Figura 3.2. Sistema de control lazo abierto. [10]	9
Figura 3.3. Sistema de control lazo cerrado.[11].....	10
Figura 3.4. Función de transferencia. [5].....	11
Figura 3.5. Curva característica del sistema de primer orden. [5].....	12
Figura 3.6. Control Proporcional – Integral [8].....	15
Figura 3.7. Estructura del control PID. [8]	16
Figura 3.8. Conjuntos Difusos [5]	17
Figura 3.9. Partes de una función de membresía. [8]	17
Figura 3.10. Operaciones Fuzzy. [3]	18
Figura 3.11. Fuzzificación [5]	19
Figura 3.12. Estructura de comunicación OPC server.[3].....	22
Figura 4.1. Motor TECHTOP. [25]	23
Figura 4.2 PLC Siemens S7-1200.[26].....	24
Figura 4.3 Encoder E6B2-CWZ6C. [27].....	24
Figura 4.4 Etapas de diseño para el modelo del controlador.....	25
Figura 4.5 Modelado del sistema en Simulink para adquisición de datos.....	26
Figura 4.6 Diagrama de conexión del prototipo experimental.	26
Figura 4.7 Programación en el Workspace.....	28
Figura 4.8 Gráfica del comportamiento de velocidad sin filtro y con el filtro EMA.	28
Figura 4.9 Herramienta IDENT en Matlab.....	29
Figura 4.10 Selección de la opción Time domain data.....	29
Figura 4.11 Configuración de la pestaña de importación de valores.	30
Figura 4.12 Función de transferencia obtenida mediante IDENT.....	30
Figura 4.13 Validación de la modelación de la función de transferencia.....	31
Figura 4.14 Diagrama de conexión control PID y Fuzzy.	31
Figura 4.15 Estructura de Comunicación	32
Figura 4.16 Bloques de programación.....	32
Figura 4.17 Diseño de pantalla HMI	33
Figura 4.18 Variables de comunicación	34
Figura 4.19 Algoritmo de control PID en lazo cerrado	35

Figura 4.20 Obtención de parámetros del control PID mediante el uso de la opción Tuner....	36
Figura 4.21 Sintonización de parámetros del controlador PID.	36
Figura 4.22 Diagrama del controlador PID implementado.	37
Figura 4.23 Definición de entradas y salidas para el controlador Fuzzy.....	38
Figura 4.24 Determinación de rangos y funciones de pertinencia de la entrada 1.	38
Figura 4.25 Determinación de rangos y funciones de pertinencia de la entrada 2.	38
Figura 4.26 Determinación de rangos y funciones de pertinencia en la salida.	39
Figura 4.27 Reglas de pertinencia agregadas al Rule Editor.	40
Figura 4.28 Surface del controlador Fuzzy.	40
Figura 4.29 Esquema de simulación del controlador Fuzzy en Simulink	41
Figura 4.30 Validación de velocidad con el tacómetro	41
Figura 5.1 Tiempo de asentamiento de señal en el control PID sin carga.....	42
Figura 5.2 Tiempo de asentamiento se señal en el control Fuzzy sin carga.....	43
Figura 5.3 Tiempo de asentamiento de señal PID con carga de 6,50 N.....	44
Figura 5.4 Tiempo de asentamiento de señal Fuzzy con carga de 6,50 N.....	44
Figura 5.5 Sobre impulso en el control PID.	45
Figura 5.6 Sobre impulso en el control Fuzzy.....	45
Figura 5.7 Sobre impulso PID con carga de 6,5 N	46
Figura 5.8 Sobre impulso Fuzzy con carga de 6,5 N.....	47
Figura 5.9 Tiempo de estabilización en descenso del control PID sin carga.	48
Figura 5.10 Tiempo de estabilización en descenso del control Fuzzy sin carga.....	48
Figura 5.11 Tiempo de estabilización en descenso del control PID con carga de 6,5 N.....	49
Figura 5.12 Tiempo de estabilización en descenso del control Fuzzy con carga de 6,5 N	49
Figura 5.13 Tiempo de respuesta del control PID ante una carga de 6,50 N	50
Figura 5.14 Tiempo de respuesta del control Fuzzy ante una carga de 6,50 N.....	51
Figura 5.15 Comportamiento con SP escalón del control PID sin carga	52
Figura 5.16 Comportamiento con SP escalón del control Fuzzy sin carga.....	52
Figura 5.17 Comportamiento con SP escalón del control PID con carga de 6,50 N.....	53
Figura 5.18 Comportamiento con SP escalón del control Fuzzy con carga de 6,50 N	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1]	1
Tabla 2.1 Sistema de tareas	5
Tabla 4.1 Metodología del desarrollo.....	23
Tabla 4.2 Especificaciones generales del motor TECHTOP.....	23
Tabla 4.3 Softwares utilizados y características de PC.	25
Tabla 4.4 Matriz para determinar las reglas de pertinencia. [28]	39
Tabla 5.1 Resumen del análisis comparativo en el control PID con carga de 3,5 N.....	54
Tabla 5.2 Resumen del análisis comparativo en el control Fuzzy con carga de 3,5 N	54
Tabla 5.3 Resumen del análisis comparativo en el control PID con carga de 6,5 N.....	55
Tabla 5.4 Resumen del análisis comparativo en el control Fuzzy con carga de 6,5 N	55
Tabla 5.5 Materiales y suministros.....	56
Tabla 5.6 Equipos para el uso directo del proyecto.....	56
Tabla 5.7 Gastos indirectos y profesionales	57
Tabla 5.8 Valor presente neto.....	58

1.INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Estudio comparativo de sistemas de control Fuzzy y PID de velocidad de motores.

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Electromecánica

Trabajo de titulación vinculado al proyecto: No aplica

Equipo de Trabajo: León Pilatasig Edison Fabricio, Pilco Landa Marco Vinicio

Tutor: Ing. M.Sc. Freire Martínez Luigi Orlando

Área de Conocimiento:

En el presente proyecto de investigación se trabajó en el área 3311 que corresponde a Tecnologías de la Instrumentación; con el campo 3311.01 Tecnologías de la Automatización y finalmente con el campo detallado en 3311.05 de equipos eléctricos de control y 3311.06 Instrumentos Eléctricos como se puede apreciar en la Tabla 1.1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].

Tabla 1.1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1]

3311 Tecnologías de la Instrumentación.	3311.01 Tecnología de la Automatización
	3311.05 Equipos Eléctricos de Control
	3311.06 Instrumentos Eléctricos

Línea de investigación: Procesos Industriales.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos.

2.INTRODUCCIÓN

Actualmente, el control de velocidad de motores eléctricos es fundamental en el ámbito de la ingeniería, dado que estos motores desempeñan un papel esencial en diversas aplicaciones especiales en la industria, tales como en el control de: una banda transportadora, un ascensor, sistemas de aire acondicionado y refrigeración, entre otras. La precisión y la eficacia en la regulación de la velocidad de un motor, puede influir de manera considerable en el desempeño global del sistema, la calidad de la de producción y la optimización del mismo.

Este trabajo tiene como propósito realizar un estudio comparativo entre los controladores PID y Fuzzy aplicados al control de velocidad de un motor de ¼ Hp trifásico de manera didáctica. A través de simulaciones y experimentos, en los cuales se evaluarán los desempeños de cada uno de los controladores bajo diferentes condiciones operativas, analizando las variables como la estabilidad, el tiempo de respuesta, el sobre impulso y la robustez ante perturbaciones. Se anticipa que el presente estudio brindará una perspectiva clara de las ventajas y limitaciones de cada sistema.[2]

En la primera fase de la investigación, se analizan los dos métodos de control: Control PID (proporcional-integral-derivativo) y el controlador Fuzzy o difuso el cual utiliza reglas lingüísticas conjuntamente con variables de entrada y salida para tomar decisiones de control. Se obtiene un modelo matemático del proceso, expresado en términos de funciones de transferencia. Después, el modelo se utiliza para diseñar un controlador PID y Fuzzy.[3]

En la segunda parte de desarrollo, mediante el software Matlab se implementará la estrategia de control para la variable de velocidad por medio de OPC el cual es un software que habilita un intercambio de datos bidireccional, una vez implementado el controlador se realizarán pruebas de funcionamiento para determinar los rangos de operación. [4]. Los resultados de este estudio proporcionarán información suficiente sobre las funcionalidades y limitaciones de cada controlador en el proceso de control de velocidad analizado. Esto permitirá tomar decisiones acertadas sobre qué controladores utilizar en situaciones similares y cómo optimizar el rendimiento.

Finalmente, se realizará la comparativa de los sistemas de control Fuzzy y PID los cuales serán implementados y desarrollados bajo las mismas condiciones de operación. Esto permitirá obtener parámetros de desempeño para cada estrategia de control. Con base en estos resultados, se pueden obtener conclusiones comparativas sobre la efectividad de los controladores PID y Fuzzy en términos de su capacidad para controlar procesos.[3]

2.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA

En la actualidad existen diversos procesos industriales que operan con motores trifásicos, en los cuales están inmersos los sistemas de control por lo cual es importante considerar y analizar estos procesos para optimizar su desempeño, en el laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi no existe un estudio de los sistemas de control enfocados a la velocidad de motores trifásicos, actualmente el control PID ha sido la solución en la mayoría de los procesos industriales debido a su simplicidad y efectividad. Sin embargo, su desempeño puede verse expuesto en sistemas no lineales o bajo condiciones operativas alterables. Por otro lado, el sistema de control Fuzzy, el cual está basado en la lógica difusa, ha surgido como una alternativa, especialmente en situaciones donde la dinámica del sistema es compleja y difícil de modelar con precisión.

Debido a los diferentes enfoques de los controladores PID y Fuzzy, en la presente propuesta tecnológica se realiza un análisis comparativo de velocidad aplicado en un prototipo experimental el cual simula la operación de un motor trifásico de ¼ Hp con carga, con ello se puede proporcionar una evaluación integral de cada sistema de control.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Escaso conocimiento práctico sobre las diferencias funcionales entre los sistemas de control PID y Fuzzy en el control de velocidad de motores trifásicos.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de investigación

Control Fuzzy y Control PID en el control de velocidad de motores eléctricos.

2.3.2. Campo de Acción: 3310 Tecnología Industrial

Como campo de acción de obtiene la tecnología industrial ya que esta se obtiene mediante la implantación de los diferentes controles y su aplicación en la industria, donde su principal área de desarrollo es la Automatización e Ingeniería de Control de Procesos. [1]

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Directo

Estudiantes de la facultad de CIYA de la Universidad Técnica de Cotopaxi, quienes podrán obtener una comprensión más profunda de los sistemas de regulación de velocidad de motores y su aplicación práctica en proyectos de ingeniería. El estudio realizado les proporcionará conocimientos y habilidades adicionales que podrán aplicar en su formación y futuros proyectos.

2.4.2. Indirecto

Profesionales inmersos en el ámbito de la ingeniería de control y automatización de procesos, los cuales podrán aplicar los resultados de la investigación para mejorar sus proyectos y mantenerse actualizados en cuanto a avances y tendencias en el campo.

2.5. JUSTIFICACIÓN

En la siguiente propuesta tecnológica teniendo en cuenta los avances de la tecnología se propone realizar un estudio comparativo entre sistemas Fuzzy y PID ya que el control de velocidades en un motor trifásico es muy importante en la automatización y control de procesos que involucran un sistema con un motor trifásico.

Mediante la comparativa de los sistemas de control Fuzzy y PID en el contexto del control de velocidad de motores. Los resultados de esta investigación no solo no solo ayudarán a entender mejor las fortalezas y restricciones de cada método en la Universidad Técnica de Cotopaxi, sino que también proporcionarán orientación para la selección y manejo efectivo de sistemas de control en aplicaciones específicas esperando que beneficie a la optimización de la eficiencia y la confiabilidad de los sistemas encargados del control de velocidad de motores.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General

Realizar un estudio comparativo del comportamiento de los sistemas de control PID y Fuzzy mediante un prototipo experimental con un motor trifásico de ¼ Hp para la determinación de las condiciones de desempeño de los controladores en la velocidad del motor.

2.6.2. Específicos

- Investigar el principio de funcionamiento de los controladores Fuzzy Y PID mediante una investigación bibliográfica para conocer su aplicación.

- Obtener la función de transferencia definiendo los límites y condiciones del prototipo experimental de un motor trifásico de ¼ Hp.
- Diseñar un algoritmo de control PID y un algoritmo de control Fuzzy mediante el software Matlab.
- Implementar los algoritmos de control Fuzzy y PID en el prototipo experimental del control de velocidad de un motor trifásico de ¼ Hp.
- Analizar los resultados obtenidos mediante la implementación del control Fuzzy y PID evaluando su desempeño en términos de estabilidad, tiempo de respuesta y precisión.

2.6.3. Sistema de tareas

En la Tabla 2.1 Sistema de tareas, se visualiza todas las actividades de la presente propuesta tecnológica.

Tabla 2.1 Sistema de tareas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDAD	RESULTADOS	MEDIO DE VERIFICACION
Investigar el principio de funcionamiento de los controladores Fuzzy Y PID mediante una investigación bibliográfica para conocer su aplicación.	Recopilación de información bibliográfica sobre los controladores difuso y PID.	Comprenderemos el funcionamiento de los controladores PID y difuso.	Artículos Científicos, Tesis, Libros.
	Revisión documental de las principales aplicaciones del control Fuzzy y PID, sus requerimientos del modelo matemático.	Requerimientos para la implementación de un control Fuzzy y PID en el control de velocidad.	Artículos Científicos, Tesis, Libros.
Obtener la función de transferencia estableciendo los límites y restricciones del prototipo experimental de un motor trifásico de ¼ Hp.	Identificación y verificación de funcionamiento de los elementos del prototipo experimental.	Funcionamiento de operación del prototipo experimental para ver las condiciones de operación y seguridad de las mismas.	Software de Programación
	Recopilación de datos del funcionamiento del prototipo experimental de un motor de ¼ Hp.	Desarrollo del sistema de gestión de datos y sus estimaciones.	Función de transferencia.

Diseñar un algoritmo de control PID y un algoritmo de control Fuzzy mediante el software Matlab.	Desarrollo de un controlador PID y Fuzzy utilizando el modelo matemático en Matlab para su funcionamiento e implementación.	Organización del desarrollo de los controladores PID y difuso (Fuzzy).	Simulaciones de los programas que determinan los controles en condiciones estables.
	Desarrollo de la comunicación y la programación en el software para el funcionamiento de los controladores.	Funcionamiento correcto de los controladores mediante la programación.	Software de programación.
Implementar los algoritmos de control Fuzzy y PID en el prototipo experimental del control de velocidad de un motor trifásico de ¼ Hp de forma real y simulada.	Implementación de los controladores de forma simulada en el software.	Control de la variable dependiente en el sistema de velocidad del motor.	Simulaciones de los controladores en los softwares utilizados.
	Implementación del modelo de control PID y Fuzzy en el prototipo utilizando conexión OPC.	Control de la variable dependiente en el sistema de velocidad del motor.	Simulaciones de los controladores en los softwares utilizados.
Analizar los resultados obtenidos mediante la implementación del control Fuzzy y PID evaluando su desempeño en términos de estabilidad, tiempo de respuesta y precisión.	Verificación que el sistema funcione correctamente.	Datos recomendables de sintonización para un funcionamiento estable en el sistema.	Obtención de datos en tiempo real de cada uno de los controles.
	Análisis del tiempo de respuesta de los sistemas de control PID y Fuzzy al gestionar la variable dependiente en la regulación de velocidad ante variaciones en los parámetros.	Comparación de resultados obtenidos por cada uno de los controles.	Graficas de los controladores

3.FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

En un entorno industrial, la aplicación de técnicas de control, como los controladores PID (considerados controles clásicos) con ganancias, derivadas e integrales pueden hacer que el proceso sea más estable en el tiempo. En términos generales, un sistema de regulación o control

es un conjunto de componentes que se integran y colaboran de manera conjunta para alcanzar un objetivo común. Un sistema puede presentar diversas características y consta de dispositivos operativos llamados actuadores. Estas unidades pueden ser: motores, bombas, pistones.[5]

Se han llevado a cabo diversas investigaciones comparativas entre los controladores Fuzzy y los controladores PID con el propósito de mejorar la eficacia de los mecanismos. Por ejemplo, en el trabajo de tesis titulado “Estudio comparativo de control PID, predictivo y difuso en un proceso de flujo” de Edgar Benjamín Aquieta Tibán se demuestra un mejor comportamiento dinámico con un menor sobre impulso en comparación con el control PID, lo que resulta en una mayor permanencia de la variable de proceso dentro del rango de operación requerido, lo que se traduce en una mayor eficiencia y posibles beneficios económicos. [3]

Por otro lado, Alberto Londari y Guillermo Hermida en el artículo con el tema "Controladores PID y controladores Difusos", después de implementar ambos controladores y realizar pruebas de control con diferentes parámetros de operación, obtienen un desempeño similar para ambos controladores, lo cual según los autores demuestra por qué el PID debido a su simplicidad y estabilidad sigue siendo el método de control más utilizado. [6]

Un análisis contrastante adicional se llevó a cabo por Luis Eduardo Mayorga Miranda en su proyecto de titulación con el tema “Diseño e implementación de una plataforma para el estudio comparativo de un controlador predictivo (MPC) con controladores PID y FUZZY, aplicado al control de velocidad de un motor DC” realizado en los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional el cual creó una plataforma para realizar el análisis comparativo de controladores utilizando el modelo matemático de un motor DC en la cual aplicaron los controladores para tener una variable estable y previamente definida, concluyendo que ambos sistemas son de gran utilidad pero cuando se requiere un controlador con mayor exactitud el sistema Fuzzy tiene una respuesta más rápida. [7]

Es significativo resaltar los logros alcanzados por Daniel Eduardo Calle Calle y Pablo Fernando Guamán Novillo en su estudio titulado "Diseño e implementación de un control difuso de velocidad para el motor hidráulico HRE Hidraulic". En dicho trabajo, se lleva a cabo el control de la velocidad de un motor mediante el controlador Fuzzy mencionando que este control es de alta aproximación es estable y tiene precisión. Implementaron una táctica en el controlador para minimizar las oscilaciones de la señal y poder obtener un mejor control, transformándose en una de las opciones más destacadas para reemplazar la regulación de variables físicas que no operan de manera satisfactoria con controladores PID [8]

3.2. PROCESO INDUSTRIAL

El proceso industrial es el encargado de obtener, procesar y trasladar uno o más productos básicos, conocidos como materias primas, se conoce como proceso industrial. El objetivo de un proceso industrial es transformar las materias primas en productos, herramientas, productos o recursos que cumplan una serie de necesidades o exigencias de un cliente o audiencia en particular. [5]

3.2.1. Proceso continuo

La línea de producción nunca cesa de producir miles de productos idénticos. Este tipo de proceso tiene dos objetivos principales: maximiza el nivel de producción y, por otro lado, disminuye los costos derivados de las paradas e inicios del proceso industrial. Los algoritmos, tipos de variables y modos de acción en este tipo de mecanismos no cambian mucho en el tiempo. Aunque la dinámica del sistema puede parecer simple y sin complejidad, es posible gestionar variables críticas y su estabilidad en procesos continuos.[5]

3.3. SISTEMA DE REGULACIÓN O CONTROL

El sistema de regulación o control permite gestionar y ajustar el comportamiento de sistemas complejos para garantizar que funcionen de manera eficiente y según los requerimientos específicos del proceso o aplicación. Estos sistemas se caracterizan por ser un conjunto de componentes conectados que actúan como receptores de intervenciones de control externas, que también se denominan parámetros de entrada. La contestación a estas intervenciones externas se manifiesta en parámetros de producción o variables de proceso [3].

De manera conceptual se ilustra la representación de operatividad de un sistema en la Figura 3.1. Esquema del funcionamiento de un sistema. [3].

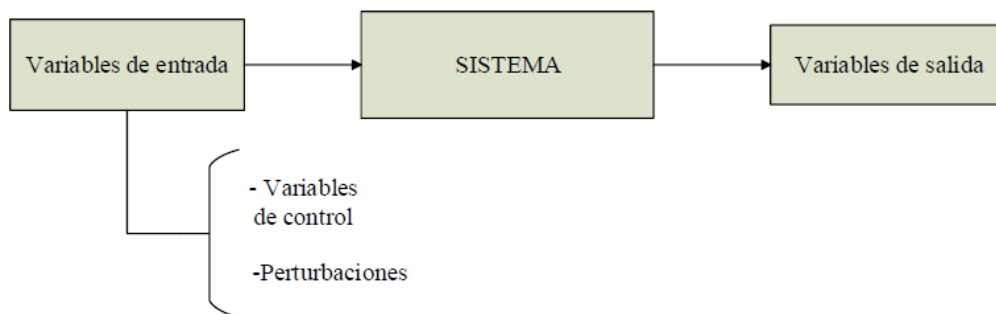


Figura 3.1. Esquema del funcionamiento de un sistema. [3]

3.3.1. Control Automático

Los sistemas de control automático son esenciales porque gestionan los procesos de producción. Además, han tenido un impacto positivo en la industria, ya que han incrementado de manera significativa su productividad. [8]

El control automático ha jugado un papel crucial en la ingeniería y la ciencia, siendo fundamental para los procesos de fabricación modernos y para cualquier operación industrial que necesite variables regulares como temperatura, presión, humedad, flujo, velocidad, entre otras. [7] El desafío del control se simplifica a resolver un problema de optimización con restricciones a lo largo del horizonte de predicción. [9]

3.3.2. Sistema de control en lazo abierto

Un sistema de control en lazo abierto no mide la salida ni la retroalimenta para compararla con la entrada. Este tipo de control se emplea en la práctica únicamente cuando se tiene conocimiento de la relación entre la entrada y la salida, y se supone que no hay perturbaciones, tanto internas como externas.[8] En la Figura 3.2. Sistema de control lazo abierto. [10] se observa su estructura.

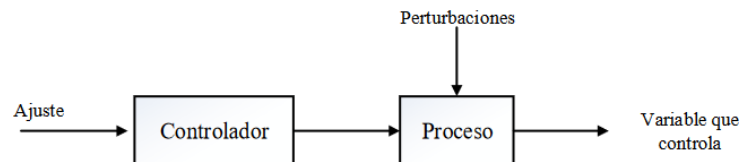


Figura 3.2. Sistema de control lazo abierto. [10]

En los sistemas de control en lazo abierto, la salida no se compara con la señal de entrada de referencia. Esto implica que cada entrada de referencia se asocia con un estado de operación constante, lo que hace que la precisión del sistema dependa directamente de la calibración.[10]

3.3.3. Sistema de control en lazo cerrado

Un sistema de control en lazo cerrado es aquel en el que la acción de control depende de la salida, ya que la señal controlada se retroalimenta y se compara con el valor de referencia (set point). Para corregir el error, se envía una señal actuante proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida a través del sistema. Este tipo de sistema es el enfoque principal de esta investigación, ya que las estrategias de control que se analizarán están diseñadas para sistemas

de lazo cerrado.[5] En la Figura 3.3. Sistema de control lazo cerrado.[11] se puede visualizar el esquema de control lazo cerrado.

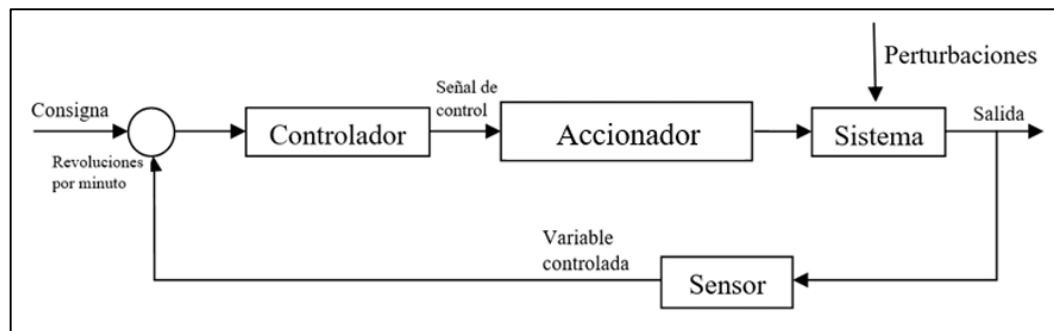


Figura 3.3. Sistema de control lazo cerrado.[11]

Variable controlada: Es el resultado del sistema, en otras palabras, la proporción que se controla y mide. La velocidad de giro del motor en el la investigación se retroalimenta al sistema a través del sensor y ayuda al controlador a tomar decisiones al ejecutar el sistema.

Sensor: Se trata de un dispositivo que capta una magnitud física del entorno y la convierte en una señal, generalmente eléctrica, que puede ser medida y controlada.

Señal de control: Conocida también como una variable manipulada, es la condición que el controlador ajusta para influir en el valor de la variable controlada.

Accionador: Hace referencia a la parte del sistema responsable de amplificar la señal de control, ya que el controlador la genera con una potencia demasiado baja para manejar directamente equipos eléctricos, como un motor.

Consigna: Es el valor deseado para la variable controlada, es decir, el valor predefinido al que se espera que se establezca la respuesta del sistema.

Perturbaciones: Es la señal interna o externa (entrada) que influye de manera negativa en el valor de la variable controlada de algún sistema. [11]

3.3.4. Sistemas de control lineales

De manera estricta, los sistemas lineales en la práctica no existen, ya que todos los sistemas físicos presentan cierto grado de no linealidad. Los sistemas de control realimentados son modelos teóricos desarrollados por el analista con el fin de simplificar el proceso de análisis y diseño del sistema. Sin embargo, cuando las magnitudes de las señales en un sistema de control se encuentran dentro de rangos donde los componentes del sistema muestran un comportamiento lineal (por ejemplo, cuando se aplica el principio de superposición), el sistema puede considerarse como lineal en ese contexto. [12]

3.3.5. Sistemas de control no lineales

Cuando la amplitud de la señal en el sistema de control excede la parte lineal, dependiendo de la gravedad de la no linealidad, el sistema ya no se considera lineal. Por ejemplo, los amplificadores utilizados en sistemas de control suelen presentar efectos de recorte cuando la señal de entrada es muy grande. [12]

3.3.6. Sistemas de variantes en el tiempo

En la práctica, la mayoría de los sistemas físicos incluyen elementos cuyos parámetros varían con el tiempo durante la operación. Estos cambios en los parámetros pueden influir en el comportamiento del sistema de control.[12]

3.3.7. Sistemas de control invariantes en el tiempo

Un sistema se considera estable en el tiempo cuando sus indicadores permanecen constantes a lo largo de la operación, es decir, no varían con el tiempo durante el funcionamiento del sistema de control.[12]

3.3.8. Sistemas de control en el tiempo continuo

El sistema en el tiempo continuo se refiere a aquellos en los que las señales en cada componente del sistema dependen de la variable de tiempo (t). En los sistemas de control de tiempo continuo, las señales se clasifican en señales de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC). Esto difiere de las definiciones generales de señales de CA y CC empleadas en el campo de la ingeniería.[12]

3.3.9. Función de transferencia

En un sistema lineal e invariante en el tiempo la función de transferencia se define como la razón entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son iguales a cero. [5] en la Figura 3.4. Función de transferencia. [5] se observa la estructura de la función.

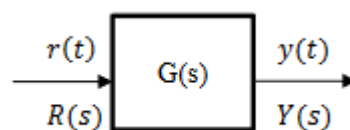


Figura 3.4. Función de transferencia. [5]

La función de transferencia del sistema $G(s)$ es:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)}$$

Las raíces del polinomio en el numerador de $G(s)$ corresponden a los ceros del sistema (z_i), mientras que las raíces del polinomio en el denominador de $G(s)$ representan los polos del sistema (p_j). El orden del sistema se define por el grado del polinomio en el denominador de $G(s)$ [5].

3.3.10. Sistemas de primer orden

Un sistema de primer orden es aquel que sólo tiene un polo, sus respuestas son funciones de tiempo que tienen un simple término exponencial, se observa en la Figura 3.5. Curva característica del sistema de primer orden. [5] en la cual se tiene la forma de la función de transferencia [13]:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{T_{s+1}}$$

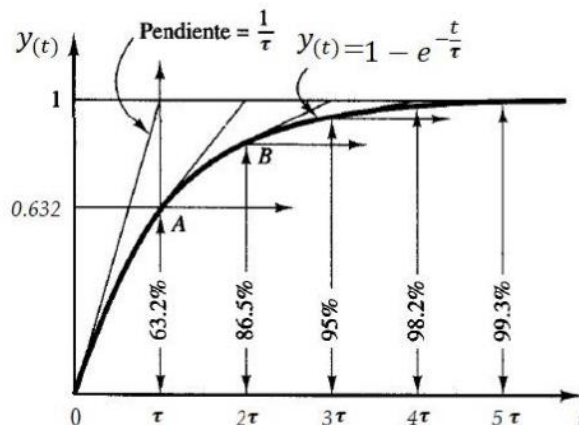


Figura 3.5. Curva característica del sistema de primer orden. [5]

3.3.11. Sistemas de segundo orden

La función de transferencia tiene la siguiente forma, en la cual tiene dos polos [13]:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2}$$

Donde:

- W_n : es la oscilación originaria
- ζ : coeficiente de amortiguación

3.4. CONTROLADOR

El componente encargado de determinar el proceder del elemento de control final para que las variables del proceso estén dentro de los límites permitidos, el controlador cumple dos funciones principales: primero, compara la variable de proceso medida con la señal de referencia deseada para calcular el error entre ambas, y segundo, envía una señal al actuador para corregir la discrepancia para cambiar su operación en la dirección apropiada para disminuir la inexactitud. [14]

3.4.1. Controlador lógico programable

Por sus siglas en inglés más conocidos como PLC, son computadoras utilizadas en la optimización de las industrias para mecanizar automáticamente procesos electromecánicos. Los PLC están diseñados para monitorear de manera simultánea varias señales diferentes de manera eficiente y en tiempo real. Se utilizan ampliamente en la industria debido a su resistencia, de modo que logran operar en un amplio rango de temperaturas y son resistentes al ruido eléctrico, las vibraciones y los golpes.[5]

3.4.2. Actuador

El actuador es el componente que finalmente se encarga de regular la variable de proceso utilizando la variante operada que respeta a la marca dirigida por el control. En la industria se pueden encontrar diversos ejemplos de actuadores, tales como motores, válvulas, variadores de frecuencia, entre otros. [5]

3.4.3. Motor eléctrico

El motor eléctrico generalmente transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Se utilizan para impulsar varios equipos y se conectan a las instalaciones eléctricas con los elementos adecuados. Los motores son esenciales para un extenso campo de utilización industrial, de transporte y de equipos de uso doméstico, proporcionando la fuerza necesaria para realizar trabajo mecánico. [15]

3.4.3.1. Motor trifásico asíncrono

El motor asíncrono, es una máquina eléctrica rotativa, que tiene la suficiencia de transformar la energía eléctrica trifásica en energía mecánica.[4] Uno de los motores eléctricos más comunes y ampliamente empleados en la industria es el motor de inducción trifásico. Su popularidad se

debe a su diseño sencillo y resistente, así como a su funcionamiento casi sin necesidad de preservación. [16]

3.4.4. Variador de frecuencia

Un dispositivo regulador industrial es el variador de frecuencia el cual que se coloca entre la fuente de energía y el motor. La energía proveniente de la red pasa a través del variador, que ajusta la potencia antes de enviarla al motor, modulando la frecuencia y la tensión según las necesidades del proceso. Los variadores permiten reducir la potencia de salida en aplicaciones como bombas o ventiladores, controlando la velocidad del motor y asegurando que no operen a una velocidad mayor de la requerida. [17]

3.4.5. Encoder

Es un dispositivo electromecánico diseñado para medir y registrar el movimiento de rotación de un eje. Actúa como un sensor que convierte el movimiento angular en señales eléctricas, las cuales pueden ser entendidas por el sistema de control. La información de los codificadores es esencial para la determinación de la posición, la rapidez y la dirección de circulación del eje, lo que permite un control preciso en aplicaciones industriales y de automatización.[18] Un sistema óptico infrarrojo de emisor y receptor detecta la variación en la superficie del disco, generando dos señales desfasadas 90° (en cuadratura).[19]

3.5. CONTROLADOR PID

El controlador PID se ha sido empleado de manera acertada en muchas técnicas de regulación en la industria por mucho tiempo debido a su aceptabilidad en la industria. Este tipo de control es el combinado de tres acciones de control proporcional, integral y derivativa las cuales pueden dar lugar a los controles P, PI, PD y PID. [10]

Acción proporcional: Este componente busca minimizar el error entre la consigna y la respuesta del sistema en régimen permanente, llevándolo lo más cerca posible de cero. Sin embargo, su ajuste puede causar un sobre impulso excesivo en el sistema, algo que debe evitarse.[20]

Acción integral: La acción integradora reduce el fallo en régimen permanente y complementa la acción del control proporcional. A distinción de este, no solo aplica un factor de proporcionalidad al error, sino que acumula todos los valores del error a través de su acción

integradora. Esto mejora la exactitud y estabilidad del sistema ayudando a controlar los parámetros en régimen permanente, aunque puede reducir su rapidez.[20]

Acción derivativa: Realiza una función predictiva de control, estimando los datos futuros de inexactitud a partir de su inclinación (pendiente o derivada). Su constante ajusta las condiciones del sistema en régimen transitorio, como el tiempo de estabilización, el tiempo de ascenso y el sobre impulso pico. A un valor superior, el sistema gana en oscilación y velocidad de respuesta, pero también aumenta el riesgo de inestabilidad.[20]

3.5.1. Control Proporcional Integral (PI)

Genera una señal que resulta de la mezcla de las acciones proporcional e integral. El control integral se ocupa de disminuir o suprimir el fallo estacionario, mientras que el control proporcional ayuda a mejorar el tiempo de estabilización provocado por el control integral. Normalmente, si las ganancias proporcionales (k_p) e integral (k_i) son bajas, la señal se mantendrá estabilizada y el fallo tenderá a cero. Sin embargo, si la ganancia integral es mayor, la señal de control se vuelve inestable, resultando en un fallo distinto a 0. Esta conducta de la señal de control ($m(t)$) se observa en la Figura 3.6. Control Proporcional – Integral [8].

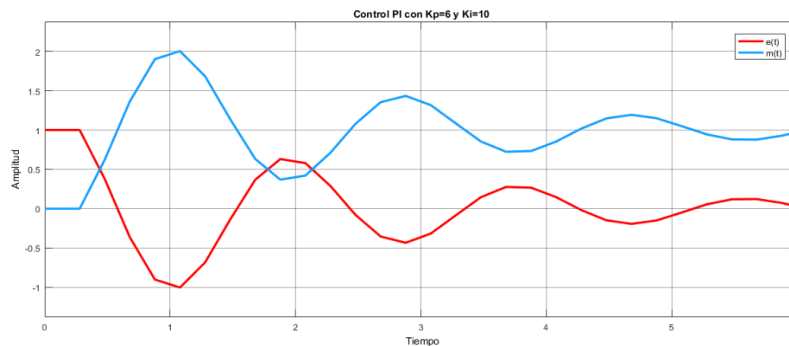


Figura 3.6. Control Proporcional – Integral [8]

3.5.2. Control Proporcional Derivativo (PD)

Este control tiene la capacidad de tener en cuenta la velocidad de distinción de la variable del sistema. Esto disminuye el sobre impulso y el tiempo de estabilización, consiguiendo una conexión lineal entre la velocidad de cambio de la variable controlada y la señal de control, la cual es proporcional a la pendiente de la variable.

. En la Figura 3.7. Estructura del control PID. [8] se observa su estructura. [4]

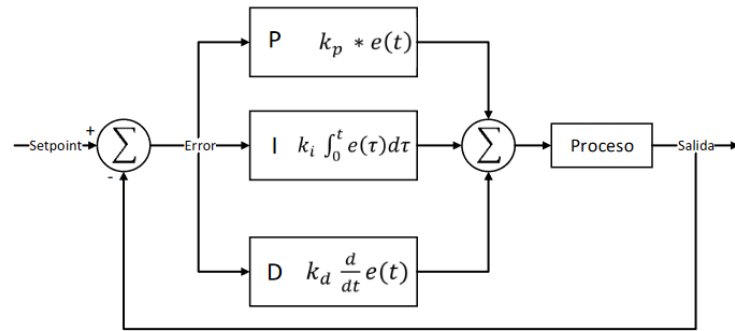


Figura 3.7. Estructura del control PID. [8]

Finalmente, se encuentra la composición de las tres acciones de control, que integra las propiedades de cada una de ellas. Una sintonización adecuada de las constantes de este controlador resultará en un control eficiente y robusto, siempre teniendo en cuenta que su rendimiento óptimo se da en sistemas lineales.[10]

3.6. CONTROLADOR FUZZY

El control basado en lógica difusa o FUZZY, está relacionada con la manera en la que la gente percibe su entorno. Como una ejemplificación, una persona puede considerar una estatura como baja, media o alta, y la temperatura puede ser percibida como poca, aceptable o alta. Estas descripciones son equivocadas ya que en términos como "poca" o "alta" son relativos al espectador y logran diferir entre diferentes personas.[3]

La lógica difusa figura de tres partes fundamentales, la primera es la fuzzificación, que incluye un rango de valores desde booleano o binario 0 y 1 hasta 0 y 1, con el que se intenta determinar el grado del valor. La segunda fase es la de razonamiento, donde se propone un compuesto de reglas de lenguaje. Un compuesto de reglas de inferencia determina el resultado de la representación. El tercer paso se llama defuzzificación, donde se determina el valor de salida óptimo y los grados de membresía de los resultados de la regla de membresía se convierten en valores reales. [10]

3.6.1. Conjuntos Fuzzy

Las expansiones de los conjuntos clásicos son los conjuntos difusos, mediante la adición de funciones de pertenencia definidas como números reales entre 0 y 1. Para cada conjunto, defina una función de pertenencia llamada $\mu_A(x)$ que represente el valor en que la variable x está inmersa en la concepción representada por la notación A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$). Si la función tiene un valor de 0, representa esto x El valor no está incluido en A . Un valor de 1 significa que está

incluida de manera absoluta en A.[5] En la Figura 3.8. Conjuntos Difusos [5] se observa la gráfica de los conjuntos difusos.

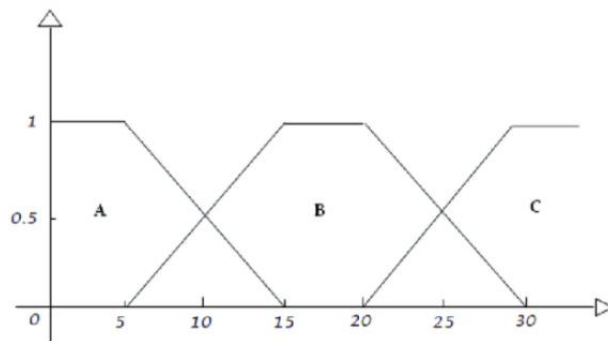


Figura 3.8. Conjuntos Difusos [5]

3.6.2. Función de membresía

Esta función de membresía se emplea para declarar el nivel de membresía o pertenencia de un componente a un determinado subgrupo identificado por una marca. [3]

Las funciones de pertenencia se caracterizan por las siguientes partes principales:

Núcleo: Es la región del universo de discurso donde la membresía del conjunto difuso \tilde{A} es completamente 1. Es decir, el núcleo incluye todos los elementos x del universo tales que $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$.

Soporte: Representa la región del universo de discurso donde la membresía es diferente de cero. Es decir, el soporte abarca todos los elementos x del universo para los cuales $\mu_{\tilde{A}}(x) > 0$.

Límites: Son la región del universo de discurso que contiene elementos con una membresía distinta de cero, pero que no tienen una membresía completa. Es decir, los límites comprenden los elementos x del universo donde $0 < \mu_{\tilde{A}}(x) < 1$, representando grados parciales de pertenencia o borrosidad en el conjunto A. [8] En la Figura 3.9. Partes de una función de membresía. [8] se muestra las partes de esta función.

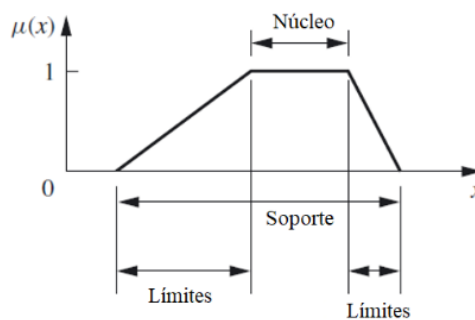


Figura 3.9. Partes de una función de membresía. [8]

3.6.3. Operaciones FUZZY

Los subconjuntos difusos pueden someterse a operaciones específicas, lo que da lugar a la obtención de nuevos conjuntos. A continuación, se describen tres acciones fundamentales, en donde, pueden realizar sobre estos conjuntos: complemento, unión e intersección. Consideremos que tenemos dos conjuntos difusos, etiquetados como A y B, los cuales están asociados a una variable x. Esto significa que ambos conjuntos describen diferentes grados de pertenencia de los elementos del universo de discurso a los conjuntos A y B, basándose en la variable x. La membresía de cada conjunto, es decir, los valores de $\mu\tilde{A}(x)$ y $\mu\tilde{B}(x)$, asigna a cada elemento x un valor entre 0 y 1.

Las operaciones se definen de la siguiente manera:

1. Complemento $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
2. Unión $\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$
3. Intersección $\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$

Estas acciones permiten ser equiparadas con las operaciones lógicas NOT, OR y AND, en ese orden. [3] En la Figura 3.10. Operaciones Fuzzy. [3] se visualiza estas operaciones.

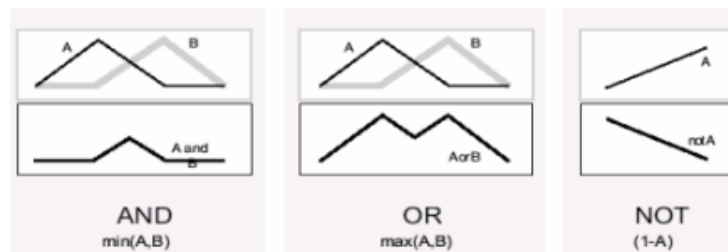


Figura 3.10. Operaciones Fuzzy. [3]

El control difuso opera de manera similar a un controlador convencional, pero utilizando un algoritmo que, a partir de la entrada, genera una salida. Este proceso se denomina inferencia difusa, donde se aplica un conjunto de reglas difusas para evaluar el grado de pertenencia de las variables de entrada y, en función de estas, se determina la salida del sistema.[6]

3.6.4. Fuzzificación

El controlador Fuzzy generalmente involucra el proceso de fuzzificación o borrosidad, que se lleva a cabo de manera continua y en tiempo real. Este proceso es fundamental, ya que actúa como la puerta de entrada a los sistemas de inferencia difusa, transformando las variables de entrada precisas en valores difusos que pueden ser procesados por el sistema. Es un proceso matemático en el que los elementos de un dominio del universo (las variables medidas en este

proceso) se transforman en valores en cada función de membresía a la que pertenecen.[5] En la Figura 3.11. Fuzzificación [5] se visualiza la fuzzificación en un ejemplo de velocidad.

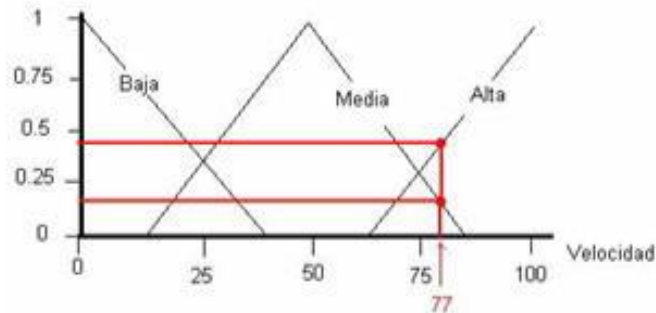


Figura 3.11. Fuzzificación [5]

Para conectar un conjunto Fuzzy consecuente (salida), los controladores Fuzzy emplean reglas que combinan uno o más conjuntos difusos de entrada (antecedentes), con el fin de evaluar el grado de pertenencia de las variables y determinar las acciones a tomar en función de dichas combinaciones. Estas reglas son fundamentales en la inferencia difusa, ya que permiten que el sistema tome decisiones basadas en información borrosa y no precisa. [3]

3.6.5. Reglas Fuzzy

Las proposiciones que expresan el conocimiento disponible entre los antecedentes y el consecuente se denominan reglas difusas. Para comunicar este conocimiento de manera completa, es necesario una agrupación de reglas que constituyen el banco de las reglas. El comportamiento del controlador difuso se determina mediante la edición de esta base de reglas, estas reglas permiten que el controlador difuso emule las decisiones y acciones de un operador humano, manejando incertidumbre y ambigüedad de manera similar a como lo haría un ser humano en situaciones complejas.[3]

Existen varios tipos de reglas en los sistemas de control difuso, pero en general se emplean dos principales: Mamdani y Takagi-Sugeno. A continuación, se detalla la estructura de cada una:

Reglas de Mamdani: Estas reglas tienen la forma clásica de "Si-Entonces", donde tanto los antecedentes (entradas) como las consecuencias (salidas) están definidas por conjuntos difusos. La estructura es generalmente de la forma:

Si X es A, entonces Y es B, donde A y B son conjuntos difusos. Este tipo de reglas se utiliza comúnmente en sistemas donde se busca modelar el comportamiento del sistema de manera más interpretativa y cercana a la lógica humana.

Reglas de Takagi-Sugeno: En este caso, las reglas también siguen la forma "Si-Entonces", pero la salida del sistema es generalmente una función matemática (como una expresión lineal o polinómica) en lugar de un conjunto difuso. La estructura típica sería:

Si X es A , entonces $Y = f(X)$, donde $f(X)$ es una función matemática (por ejemplo, una función lineal). Estas reglas se utilizan en sistemas donde se requiere mayor precisión matemática y son más eficientes para el proceso de inferencia.

Las principales diferencias entre estas estructuras son:

Mamdani: [21]

- Cuenta con una función de membresía que se utiliza para generar la salida.
- El resultado se obtiene mediante reglas de defusificación.
- La superficie de salida no es continua.
- Es aplicable tanto a sistemas MISO como MIMO.
- Su interpretación es sencilla y directa.
- Presenta una flexibilidad limitada en el proceso de diseño.

Takagi-Sugeno:

- No cuenta con una función de membresía para la salida.
- El resultado se obtiene mediante un promedio ponderado del consecuente.
- La superficie de salida es continua.
- Es aplicable exclusivamente a sistemas MISO.
- Su interpretación resulta compleja.
- Ofrece una gran flexibilidad en el diseño.

3.6.6. Defusificación

Para transformar un conjunto de lógica difusa en un valor numérico real, se emplea el método matemático de defusificación (defuzzyfication). A partir de los datos de entrada, el sistema de inferencia Fuzzy llega a una conclusión, pero es en términos difusos. El ciclo de inferencia borrosa produce esta conclusión o salida difusa; produce un conjunto confuso; sin embargo, el dato de salida del sistema debe ser un número real y representar todo el conjunto que se obtuvo en la etapa de agregado; por esta razón, el centroide es el procedimiento de defusificación más conocido y utilizado. Con el procedimiento de defusificación del control se cambia la salida

Fuzzy en un número real en el cual es la posición (x) del punto de trascendencia de tal conjunto Fuzzy de salida. [22].

3.6.7. Sistema de inferencia Fuzzy

La deducción difusa es el procedimiento para formular la correspondencia entre una entrada establecida y una salida utilizando lógica difusa. Se puede discernir el comportamiento o las tendencias ocultas en los datos, facilitando así la interpretación y la acción en sistemas complejos. El proceso de deducción es un mapeo. [23]

3.6.8. Indicadores de rendimiento

Para mejorar el rendimiento general de la organización, los indicadores deben poseer atributos que los hagan fáciles de entender y útiles. Los indicadores son parámetros numéricos que ofrecen información sobre aspectos importantes que se encuentran en una empresa, proceso, como los costos, la producción, los plazos y la calidad. Son esenciales para la gestión empresarial porque brindan una perspectiva del estado y el desempeño de los procesos.[5]

3.6.9. Matlab

Es una plataforma diseñada para la programación y el cálculo numérico, enfocada en el análisis de datos, el desarrollo de algoritmos y la construcción de modelos. Esta herramienta integra un entorno de trabajo optimizado para facilitar procesos iterativos de análisis y diseño, con un lenguaje de programación que permite expresar de manera directa las matemáticas relacionadas con matrices y arreglos (arrays), lo que facilita la implementación y manipulación de operaciones numéricas complejas. [24]

3.6.10. Comunicación OPC (Ole for Process Control)

Es una tecnología de correspondencia basada en la estructura del modelo cliente-servidor. Un programa actúa como servidor, entregando datos, mientras que el otro programa actúa como cliente, leyendo o manipulando esos datos. Un servidor OPC pueden mantener una comunicación continua en tiempo real con PLC de campo, RTU, estaciones HMI y otras aplicaciones, incluso si son de diferentes marcas. [3]

Para extender las funciones de MATLAB y Simulink, existe una caja de herramientas OPC que facilita la interacción con servidores OPC, en la Figura 3.12. Estructura de comunicación OPC server.[3]. Se muestra la comunicación del software Matlab el OPC y el PLC esta comunicación es en ambas direcciones [3]



Figura 3.12. Estructura de comunicación OPC server.[3]

4.MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Este capítulo definirá métodos para implementar el control PID y Fuzzy. Primero montará el prototipo didáctico o la parte experimental. Luego se manipularán las variables de control y proceso utilizando instrumentos y técnicas de recolección de datos. Procese los datos obtenidos, observe su curva de tendencia y estime su función de transferencia y modelo de espacio de estados utilizando el algoritmo del software Matlab. Una vez evaluado el modelo, se dibujan diagramas en la herramienta Matlab-Simulink y se realiza la comunicación OPC con el PLC TIA Portal S7-1200 para observar los controles e implementar sus acciones.

La presente propuesta tecnológica implementa los sistemas de control PID y Fuzzy en el proceso de regulación de velocidad de un motor de ¼ Hp trifásico, con la respectiva sustentación de aspectos teóricos y técnicos utilizando la investigación bibliográfica en la que se recopila antecedentes y trabajos relacionados necesarios para la comprensión de los principios esenciales de los controladores.

Para el estudio de los controladores se utilizaron métodos experimentales y deductivos, en primer lugar, se montará la parte experimental del sistema de control de velocidad de un motor de manera didáctica. A diferencia, el método deductivo mediante la aplicación permite la obtención de datos del control de velocidad del prototipo experimental implementado ya que permiten la correcta sintonización de cada uno de los controladores y su diseño en su Software de control.

Para comprobar el desempeño se utilizan métodos cuantitativos para evaluar el rendimiento de los controladores individualmente, recopilando datos mediante el software KepServer EX 6. En la Tabla 4.1 Metodología del desarrollo. Se indican los procedimientos, métodos y materiales que se utiliza en el presente trabajo.

Tabla 4.1 Metodología del desarrollo.

Procedimiento	Método	Materiales - Instrumentos
Manipulación de variables de proceso (PV), conseguir las condiciones y obtención de la modelación matemática.	Experimental	<ul style="list-style-type: none"> - Variador de frecuencia Micromaster 440 - PLC Siemens S7-1200 - Encoder incremental - Software Matlab 2021a
Modelación y simulación de los controladores para la adquisición de datos que ayuden a obtener los parámetros de sintonía de operación del prototipo.	Deductivo	Software Matlab (SystemIdentification)
Validación y evaluación del desempeño de los controladores.	Cualitativo	<ul style="list-style-type: none"> - KepServer EX 6 - Software Tia Portal V16 - Software Matlab (Simulink)

4.1. REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE

4.1.1. Motor de corriente alterna TECHTOP

En el estudio de los sistemas de control PID y Fuzzy, se posee un motor de corriente alterna trifásico TECHTOP, el cual es un motor trifásico con una potencia de ¼ Hp. En la Tabla 4.2 Especificaciones generales del motor TECHTOP. se puede visualizar sus características.

Tabla 4.2 Especificaciones generales del motor TECHTOP.

Descripción	Características
Voltaje [V]	220/380/440
Corriente [A]	1.14/0.66/0.57
Potencia [Hp]	0.25
Rpm	1705

En la Figura 4.1. Motor TECHTOP. [25] se puede observar el motor trifásico TECHTOP el cual será empleado para el estudio de los controladores en este proyecto.



Figura 4.1. Motor TECHTOP. [25]

4.1.2. Controlador lógico programable (PLC)

Se utilizará un PLC S7-1200 para la interacción entre el motor trifásico y la computadora, lo que proporciona la adecuada funcionalidad necesaria para el control de variedades de máquinas logrando así satisfacer diferentes requerimientos automáticos. Con el software Tia Portal V16, después de cargar el programa, la CPU puede realizar la programación necesaria, incluida la lógica requerida para monitorear y controlar el dispositivo. [26] En la Figura 4.2 PLC Siemens S7-1200.[26] se visualiza el PLC utilizado en el proyecto.



Figura 4.2 PLC Siemens S7-1200.[26]

4.1.3. Encoder incremental E6B2-CWZ6C

Este encoder será el encargado de enviar los valores de la velocidad del motor al PLC este encoder dispone una resolución de 1000 pulsos por revolución en el eje del motor, que corresponde a 1705 rpm. En la Figura 4.3 Encoder E6B2-CWZ6C. [27] se observa el encoder.



Figura 4.3 Encoder E6B2-CWZ6C. [27]

4.1.4. Softwares y computadora

Para el desarrollo, programación, control, análisis y obtención de resultados de los sistemas de control, se emplean computadoras junto con software especializado que se detallan a continuación en la Tabla 4.3 Softwares utilizados y características de PC.

Tabla 4.3 Softwares utilizados y características de PC.

Descripción	Características
Computador	Dell Inspiron 15
Software Tia Portal	Tia Portal V16
Software Matlab	Matlab R2021a
Software OPC	KeptserverEX

4.2. ADQUISICIÓN DE DATOS Y OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para la adquisición de datos de las diferentes magnitudes y tipos de variables sobre las que se realiza el control, se visualiza las etapas en Figura 4.4 Etapas de diseño para el modelo del controlador.

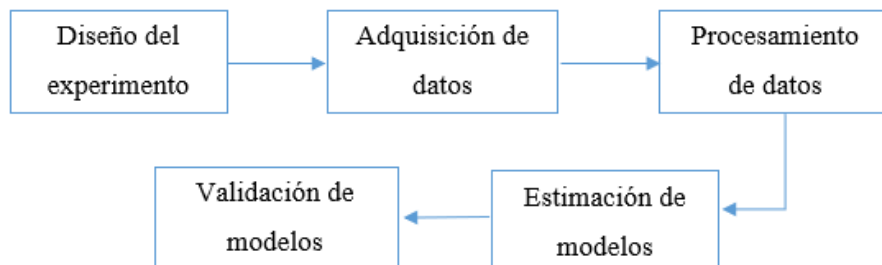


Figura 4.4 Etapas de diseño para el modelo del controlador

4.2.1. Diseño del modelo de obtención de datos.

Para obtener el modelo más cercano al real del motor trifásico, la primera técnica es controlar de manera manual para poder tener una variabilidad en la velocidad y llegar a los límites máximos y mínimos de ejecución a través del encoder, y así, tabular y analizar los datos obtenidos. Estos datos de velocidad se obtienen sin filtro y con un filtro exponencial llamado EMA (Exponential Moving Average). En la Figura 4.5 Modelado del sistema en Simulink para adquisición de datos. Se observa el diagrama de programación por bloques para la adquisición de valores.

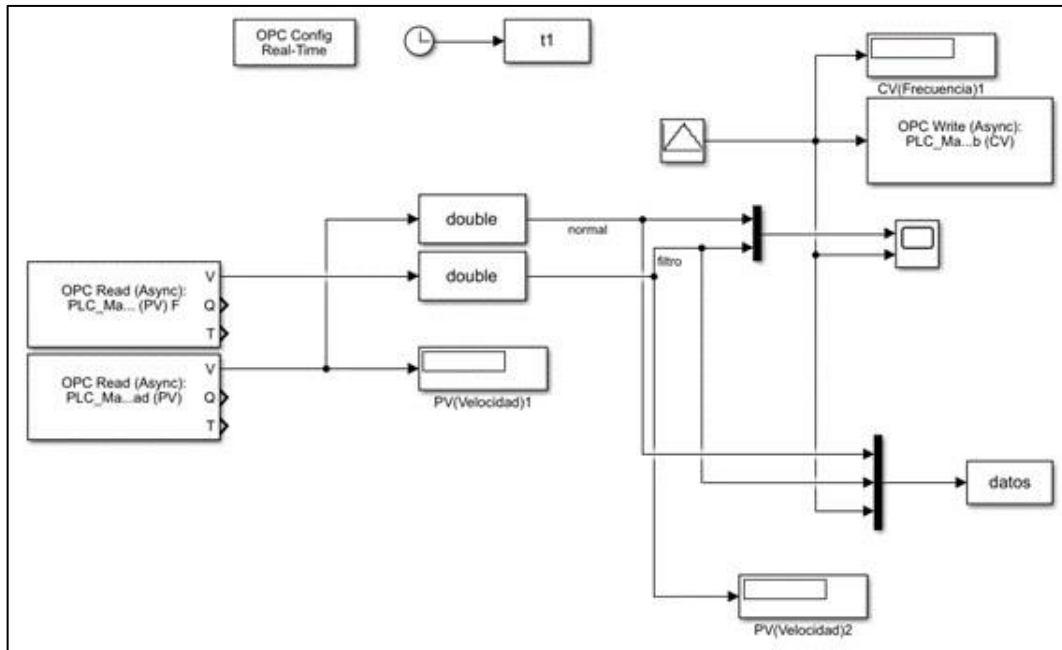


Figura 4.5 Modelado del sistema en Simulink para adquisición de datos.

4.2.1.1. Diagrama de conexión

En la Figura 4.6 Diagrama de conexión del prototipo experimental. Se visualiza como deberán estar conectados los equipos para la adquisición de datos.

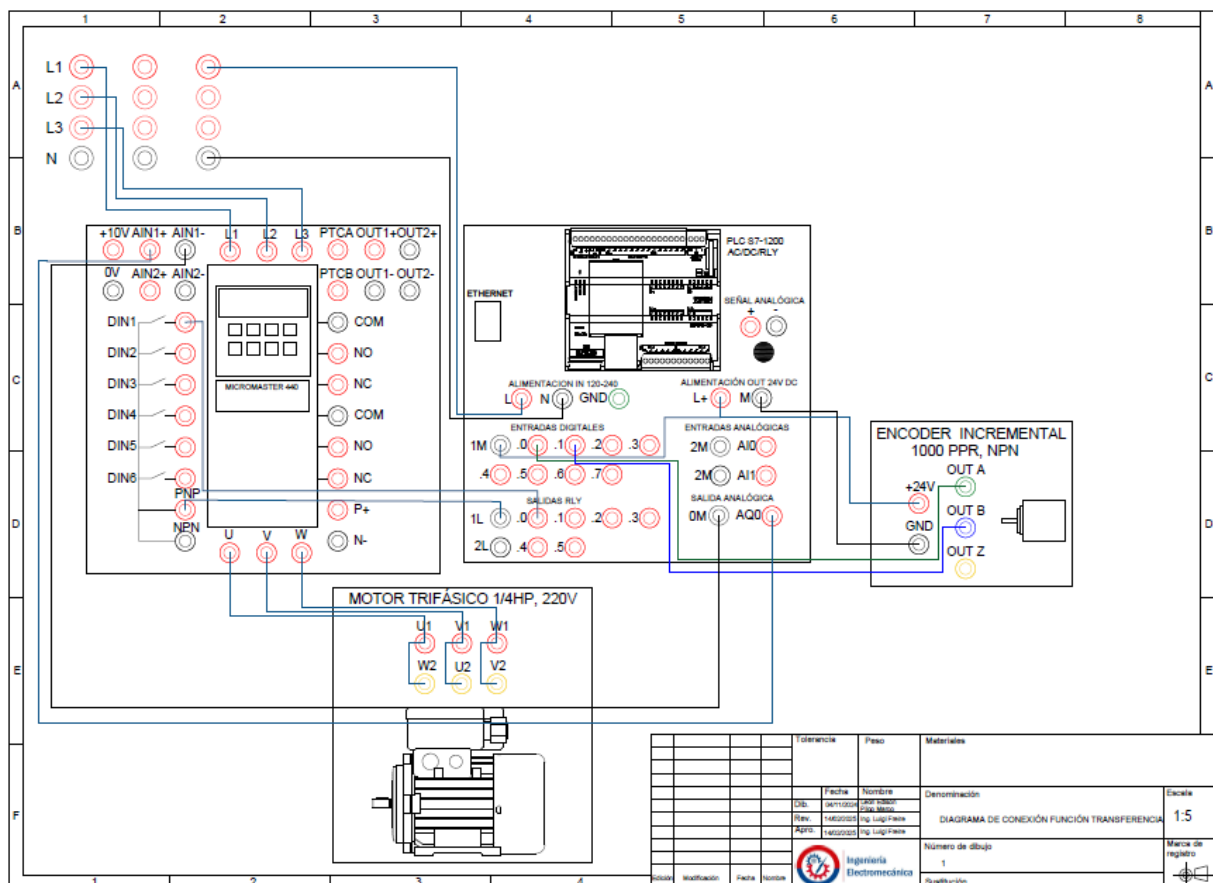


Figura 4.6 Diagrama de conexión del prototipo experimental.

4.2.2. Obtención de datos

La obtención de datos se da mediante el modelado del sistema la cual se visualiza en la Figura 4.5 Modelado del sistema en Simulink para adquisición de datos. Y su debida conexión de los instrumentos como se visualiza en la Figura 4.6 Diagrama de conexión del prototipo experimental. A continuación, se realiza la comunicación de los softwares TIA Portal, KepServer EX 6 y Simulink desde el cual se envía valores de 0 a 100 %, en el cual 0 representa 0Hz y 100 representa 60 Hz que enviará el variador de frecuencia al motor.

Para visualizar de manera detallada revisar el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

4.2.3. Procesamiento de datos

Para procesar todos los datos es necesario el software Matlab en este caso su herramienta Simulink en donde mediante sus bloques se va a realizar la comunicación en tiempo real del OPC y el PLC, mediante el encoder se recolecta los valores de velocidad del motor y estos datos se almacenarán en el software Simulink.

Hay que tener en cuenta el rendimiento de los equipos para el proceso de datos ya que dependiendo de las características de los mismos mejor será el tiempo de respuesta para la lectura de los datos.

4.2.4. Estimación de modelos

Posterior a la simulación, los datos se envían automáticamente al Workspace de Matlab. Luego, se procede a simular el código previamente creado para visualizar el comportamiento del sistema mediante gráficas y obtener la información en el Workspace para emplearlos dentro del software Matlab en el toolbox de IDENT y realizar el modelado del motor trifásico. En la Figura 4.7 Programación en el Workspace. se observa la programación.

```

1  % clc;clear all;
2  %% Proceso de Simulacion
3
4  pvn = datos(:,1);
5  pvf = datos(:,2);
6  cv = datos(:,3);
7
8
9  figure
10 subplot(2,1,1);
11 plot(t1,pvn(1:length(pvn)),'r','LineWidth',2),hold on
12 plot(t1,pvf,'b','LineWidth',2),grid on
13 title('VELOCIDAD MOTOR');
14 ylabel('[RPM]');
15 xlabel('Tiempo [s]');
16 legend('NORMAL','FILTRO');
17
18 subplot(2,1,2);
19 plot(t1,cv,'g','LineWidth',2),hold on,grid on
20 title('ENTRADA');
21 ylabel('%');
22 xlabel('Tiempo [s]');
23 legend('CV');
24

```

Figura 4.7 Programación en el Workspace.

En la gráfica se visualiza el comportamiento de la rapidez del motor mediante entradas escalón, con los datos numéricos: [0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10], se determina la visualización de los datos sin el filtro. En la Figura 4.8 Gráfica del comportamiento de velocidad sin filtro y con el filtro EMA. se muestra el comportamiento de la velocidad con entradas escalón sin filtro (normal) y con el filtro EMA.

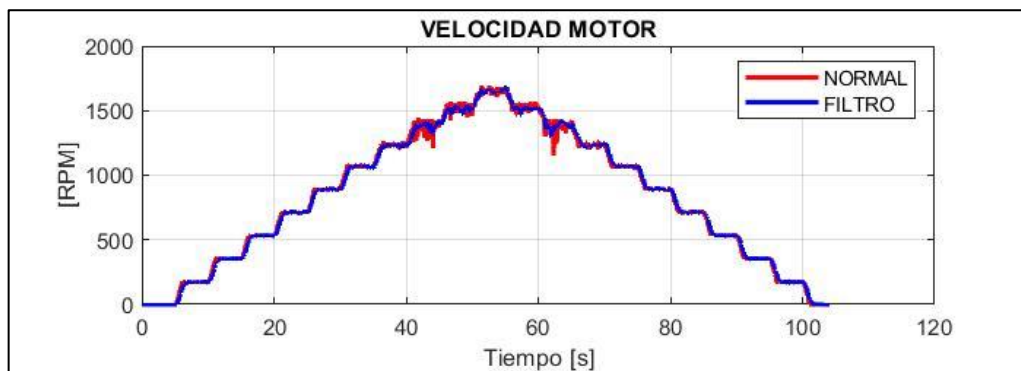


Figura 4.8 Gráfica del comportamiento de velocidad sin filtro y con el filtro EMA.

En la figura antes mostrada se observa la gráfica de color rojo sin filtro la cual grafica los datos de manera normal la cual está sin filtro y la gráfica azul muestra los datos con filtro EMA.

Los datos de las variables se describen como:

- cv: variable de control
- pvf: datos de velocidad obtenidos con filtro
- pvn: datos de velocidad obtenidos sin filtro

Después de obtener las variables del proceso, es necesario escribir la palabra "IDENT" en la ventana de comandos de MATLAB (Command Window) para activar la herramienta de identificación del sistema en MATLAB, como se muestra en la Figura 4.9 Herramienta IDENT en Matlab.

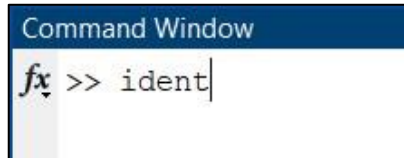


Figura 4.9 Herramienta IDENT en Matlab.

Una vez ejecutada la herramienta IDENT, para importar y disponer de los datos almacenados en las variables previamente creadas, se deben seguir los siguientes pasos:

Seleccionar la opción "Time domain data" (Datos en el dominio del tiempo) la cual contiene la herramienta IDENT dentro de su estructura, para importar los datos de entrada y salida. En la Figura 4.10 Selección de la opción Time domain data, se muestra la selección.

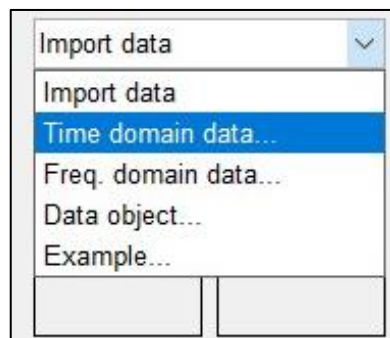


Figura 4.10 Selección de la opción Time domain data

En la Figura 4.11 Configuración de la pestaña de importación de valores. se muestra la pestaña donde se ingresa las variables creadas con anterioridad en nuestro sistema: entrada (cv) y salida (pvf). En la opción (Data Name) se coloca el nombre específico para el sistema en este caso se puso (Motor). En el tiempo de inicio (Start time) se coloca un valor de 0 ya sé que obtuvo los datos desde que el motor estaba en reposo, es importante se coloca el tiempo de toma de muestras (Sample time) para este caso se coloca un valor de 100 mili segundos, este valor corresponde al tiempo con el que se tomó los datos en Simulink.

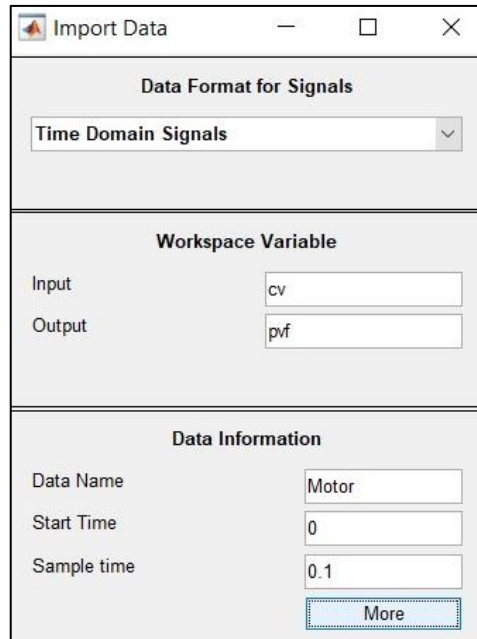


Figura 4.11 Configuración de la pestaña de importación de valores.

Después de ingresar los valores de entrada y salida obtenidos anteriormente se procesa el modelamiento matemático y obtenemos la siguiente función de transferencia que se visualiza en la Figura 4.12 Función de transferencia obtenida mediante IDENT.

```

Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      1+Tp1*s

      Kp = 17.265
      Tp1 = 2.8839
  
```

Figura 4.12 Función de transferencia obtenida mediante IDENT.

4.2.5. Validación de modelos

Una forma de validar el modelo estimado es mediante la opción (Model output) después de validar de la función de transferencia se procede a la visualización con las variables de salida, como se muestra en la Figura 4.13 Validación de la modelación de la función de transferencia.

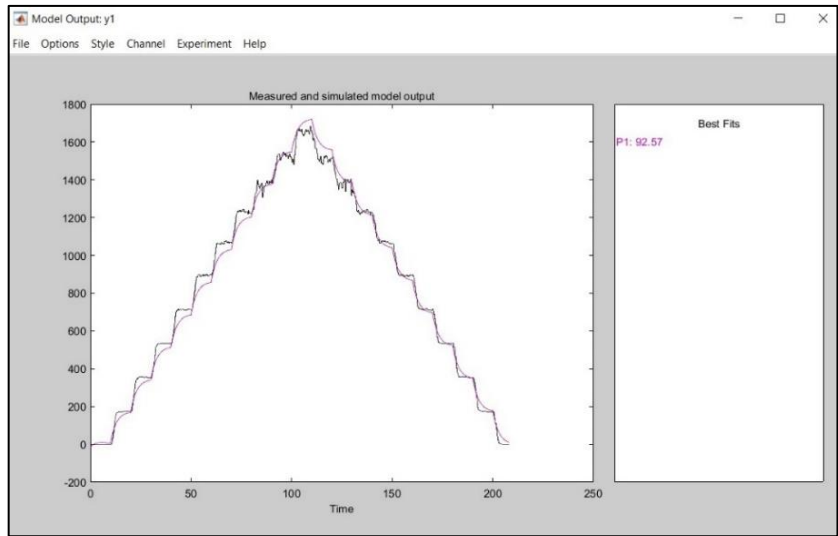


Figura 4.13 Validación de la modelación de la función de transferencia.

En la estimación de proceso se obtuvo un resultado del 92.57% por lo cual este es un porcentaje aceptable para poder trabajar con esta función de transferencia final. Para ver su configuración detallada revisar el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

4.3. DESARROLLO DE CONTROLADORES

En la Figura 4.14 Diagrama de conexión control PID y Fuzzy. Se observa la conexión de todos los instrumentos para la implementación de los controladores.

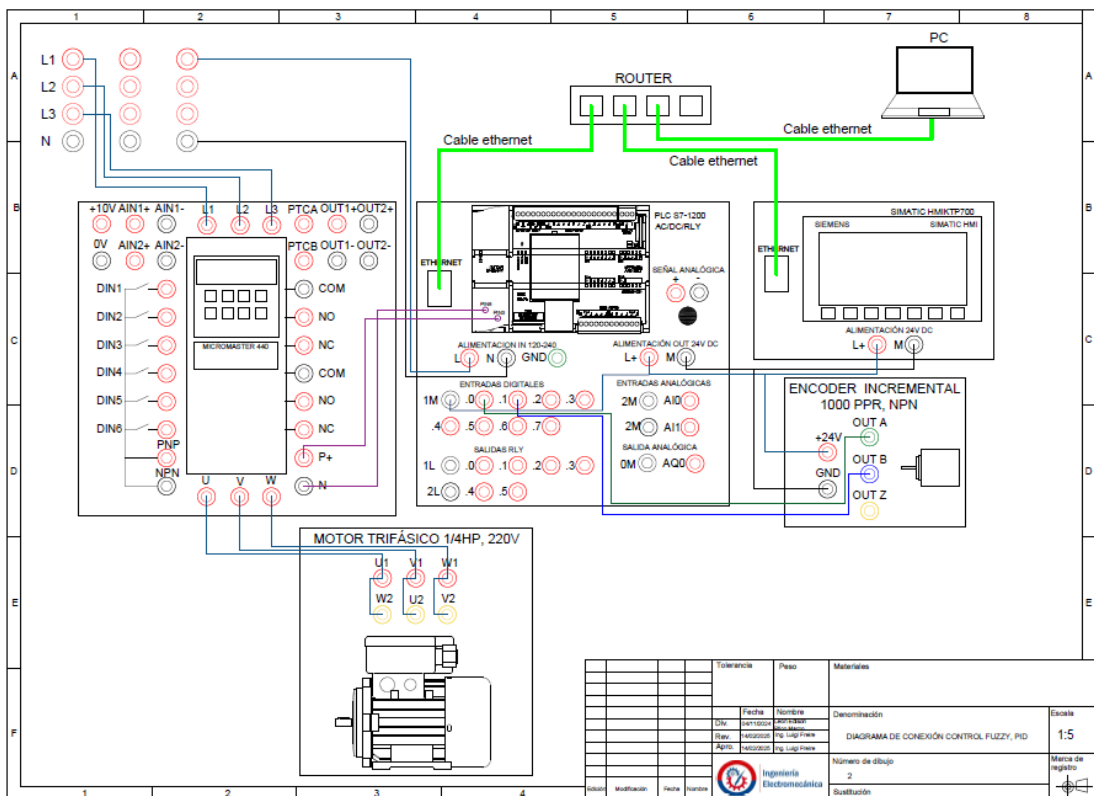


Figura 4.14 Diagrama de conexión control PID y Fuzzy.

4.3.2.1. Diseño de la pantalla HMI

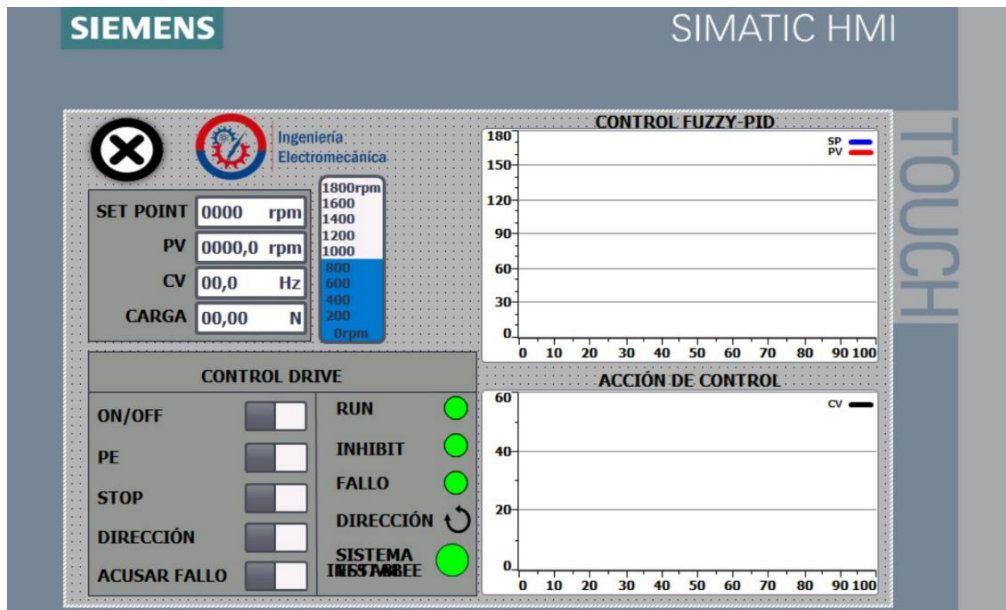


Figura 4.17 Diseño de pantalla HMI

En la Figura 4.17 Diseño de pantalla HMI se puede visualizar los botones permiten controlar el variador de frecuencia mediante comunicación USS-485, en la pantalla los botones que se visualizan se detallan a continuación:

- El botón ON/OFF está configurado para el encendido o apagado del variador.
- “PE” y “STOP” deben estar activos para que el variador funcione correctamente.
- El botón “DIRECCION” está configurado para el cambio de giro del motor.
- “ACUSAR FALLO” está configurado para desactivar un posible fallo que exista en el variador de frecuencia. Para más información de los tipos de fallo que entrega el variador revisar el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Los diferentes indicadores que se muestran en la pantalla se activan según el funcionamiento del sistema.

Los gráficos de tendencia que se visualizan se encuentran escalados debido a la limitante de la pantalla HMI, en la cual 180 se encuentra escalado a 1800 rpm.

Para visualizar de manera detallada la configuración de la pantalla HMI revisar el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

4.3.3. Configuración de OPC

La comunicación se realiza por medio de un servidor OPC (KepServer EX) cuya configuración se detalla en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la Figura 4.18 Variables

de comunicación podemos visualizar las variables creadas para el intercambio de valores entre el PLC y Simulink.

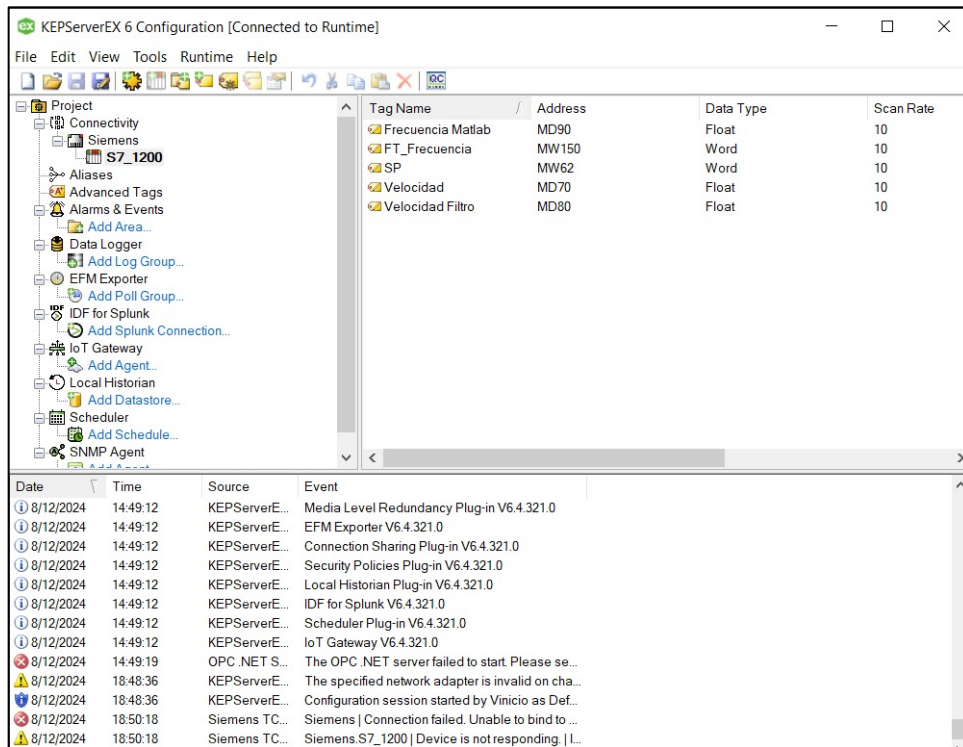


Figura 4.18 Variables de comunicación

4.3.4. Programación de perturbación del sistema

Para la obtención del valor de la fuerza aplicada al motor (perturbación) se realiza la programación en TIA Portal como se observa en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el valor del torque se obtiene del variador de frecuencia a través de comunicación USS mediante conexión RS485 con el módulo CM 1241. Esta programación nos sirve para los dos controladores de esta propuesta tecnológica.

Una vez obtenido el valor del torque en la programación se emplea la siguiente fórmula para realizar el cálculo de la perturbación.

$$F = \frac{T}{r} [N] \quad (4.1)$$

Donde:

- F: fuerza (N)
- T: torque (Nm)
- r: radio (m)

El valor de torque que entrega el variador de frecuencia tiene como unidad Nm, el radio es la distancia que tiene el eje del motor hacia sistema de perturbación, en este caso el freno hidráulico acoplado.

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se visualiza como se encuentra acoplado el sistema de perturbación dentro del prototipo experimental.

4.3.5. Desarrollo del control PID

Para diseñar el controlador PID, es necesario determinar las constantes del controlador. Para ello, se construye el modelo de control utilizando Simulink mostrado en la Figura 4.19 Algoritmo de control PID en lazo cerrado, utilizando la modelación de la sistemática de la planta que fue obtenido mediante IDENT como se mostró en la Figura 4.13 Validación de la modelación de la función de transferencia.

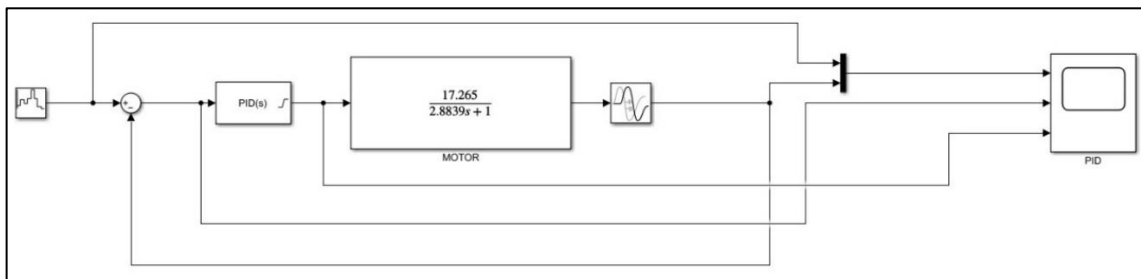


Figura 4.19 Algoritmo de control PID en lazo cerrado

Una vez que se ha creado el diagrama en Simulink e incorporado el modelo de la planta, se utiliza la opción Tune (del Toolbox PID Tuner) para calcular las constantes de control K_p , K_i y K_d , según los requisitos específicos del sistema, es decir, dependiendo de cómo se desee que funcione el sistema, la cual se observa en la Figura 4.20 Obtención de parámetros del control PID mediante el uso de la opción Tuner.

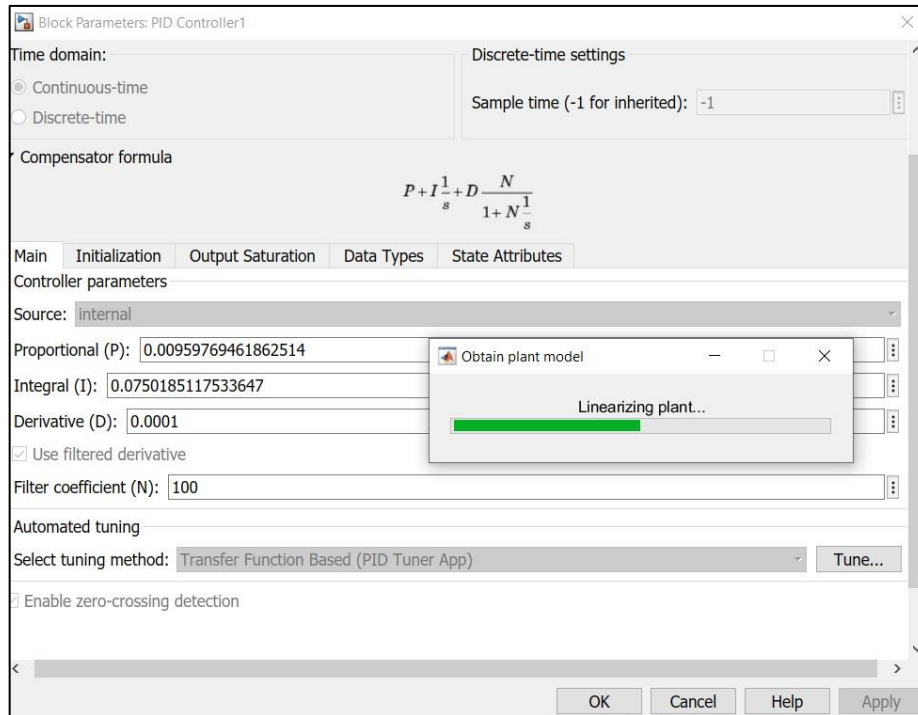


Figura 4.20 Obtención de parámetros del control PID mediante el uso de la opción Tuner.

Se puede observar que en la Figura 4.21 Sintonización de parámetros del controlador PID. Se realiza la sintonización del control PID para encontrar los parámetros de control proporcional (P), integral (I), derivativo (D) y coeficiente de filtro (N).

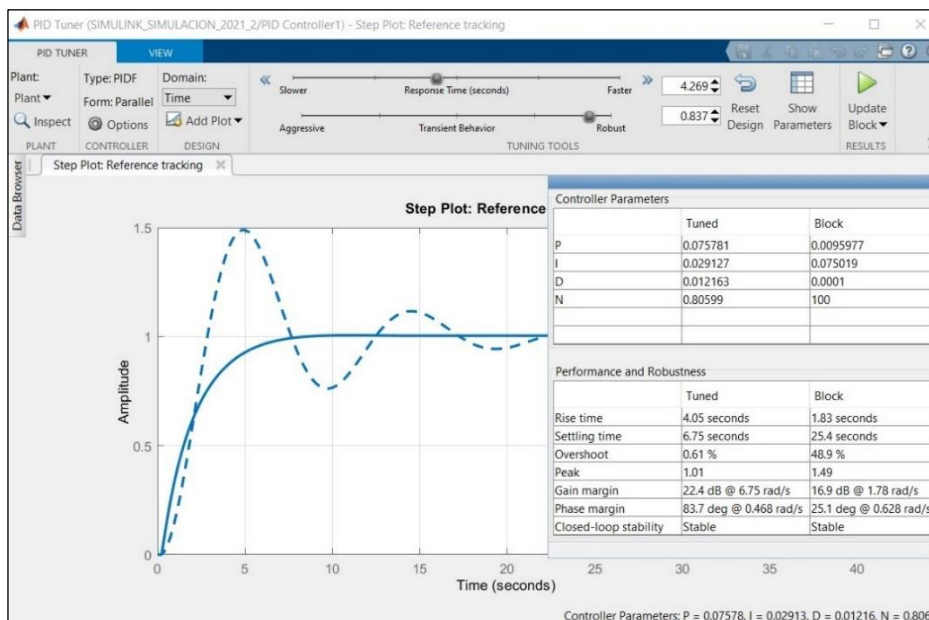


Figura 4.21 Sintonización de parámetros del controlador PID.

4.3.6. Implementación del controlador PID

Para el establecimiento del control PID se desarrolló el diagrama de bloques correspondiente en Simulink. La comunicación entre Matlab y Tia Portal se realiza mediante el bloque OPC

Read para la lectura de datos de velocidad y Set Point (SP) que envía Tia Portal, estos datos se ingresan al bloque del controlador PID de Simulink. Para enviar los datos de la variable de control de Matlab a Tia Portal se utiliza el bloque OPC Write de Simulink. Para la configuración de los clientes OPC se utiliza el bloque OPC Config y se selecciona el OPC Kevserver, como se visualiza en la Figura 4.22 Diagrama del controlador PID implementado. Para visualizar de manera detallada revisar el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 4.22 Diagrama del controlador PID implementado.

4.3.7. Desarrollo del control Fuzzy

Para el diseño del algoritmo del controlador Fuzzy es necesario, entender la operación de la planta, con ello tener una base para el establecimiento de las reglas de membresía y de correspondencia.

4.3.7.1. Diseño del controlador Fuzzy

El diseño del control Fuzzy se realiza con mediante el comando Fuzzy Logic Toolbox de Matlab, para ello se escribe la palabra fuzzy en el Command Windows de Matlab. Para el presente proyecto se utilizó 2 entradas y 1 salida, como se puede observar en la Figura 4.23 Definición de entradas y salidas para el controlador Fuzzy. Se define los grados de las entradas y salidas, también se asigna funciones de pertinencia y variables lingüísticas.

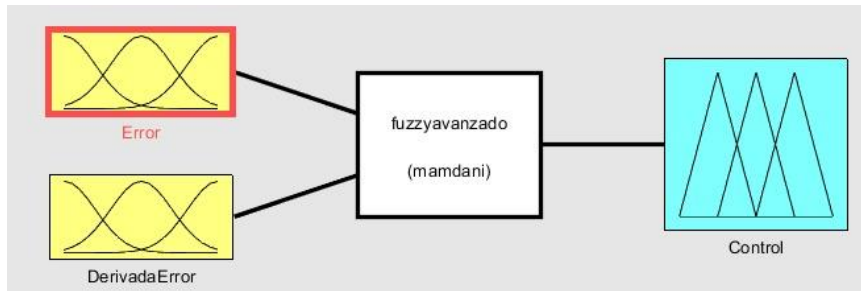


Figura 4.23 Definición de entradas y salidas para el controlador Fuzzy.

Se muestra en la Figura 4.24 Determinación de rangos y funciones de pertenencia de la entrada 1. La entrada 1 denominada Error que es la velocidad y está determinada en el rango de $[-1,1]$ rpm y contiene 7 funciones de pertenencia.

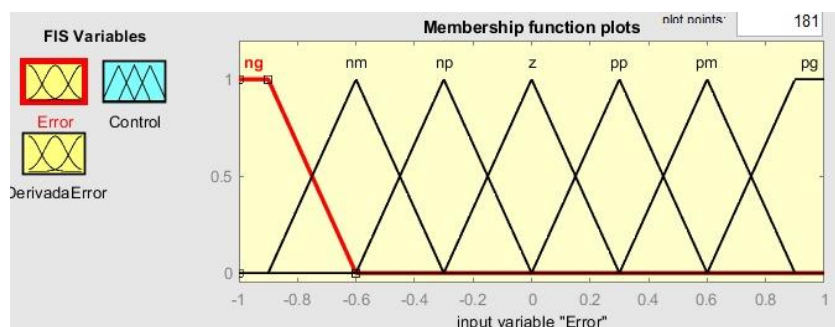


Figura 4.24 Determinación de rangos y funciones de pertenencia de la entrada 1.

En la Figura 4.25 Determinación de rangos y funciones de pertenencia de la entrada 2. se muestra la entrada Derivada del Error y consta de 7 funciones de pertenencia.

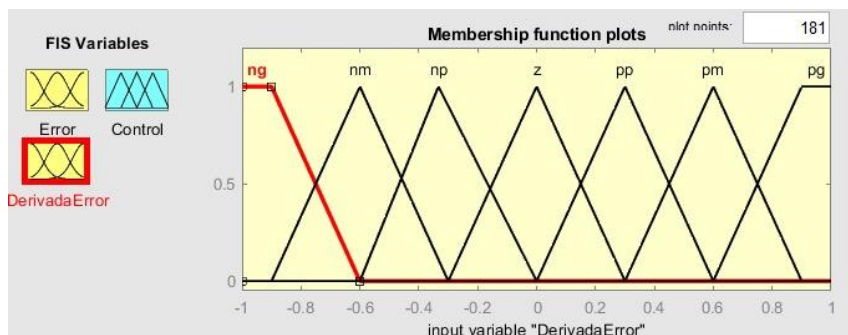


Figura 4.25 Determinación de rangos y funciones de pertenencia de la entrada 2.

En la Figura 4.26 Determinación de rangos y funciones de pertenencia en la salida. se muestra la obtención de rangos y funciones de pertenencia del control en cual es la salida, está determinada en el rango $[-1, 1]$ y contiene 9 funciones de pertenencia.

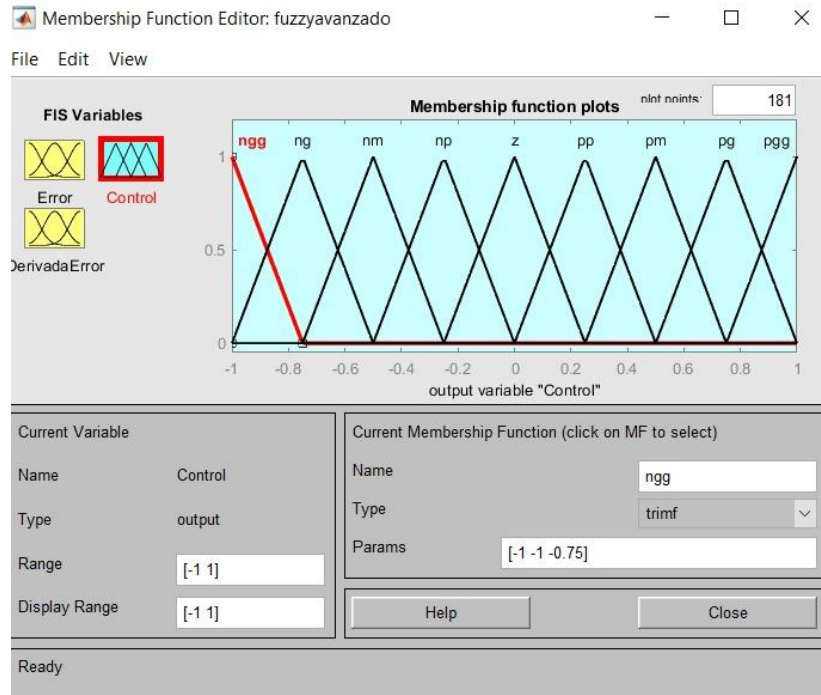


Figura 4.26 Determinación de rangos y funciones de pertinencia en la salida.

El controlador Fuzzy se lo diseña considerando las 49 reglas que fueron definidas como se muestra en la Tabla 4.4 Matriz para determinar las reglas de pertinencia. [28]

Tabla 4.4 Matriz para determinar las reglas de pertinencia. [28]

e/de	ng	nm	np	z	pp	pm	pg
ng	ngg	ngg	ngg	ng	nm	np	z
nm	ngg	ngg	ng	nm	np	z	pp
np	ngg	ng	nm	np	z	pp	pm
z	ng	nm	np	z	pp	pm	pg
pp	nm	np	z	pp	pm	pg	pgg
pm	np	z	pp	pm	pg	pgg	pgg
pg	z	pp	pm	pg	pgg	pgg	pgg

Para realizar la matriz y estipular las reglas de pertinencia se agrega en el (Rule Editor) como se muestra en la Figura 4.27 Reglas de pertinencia agregadas al Rule Editor.

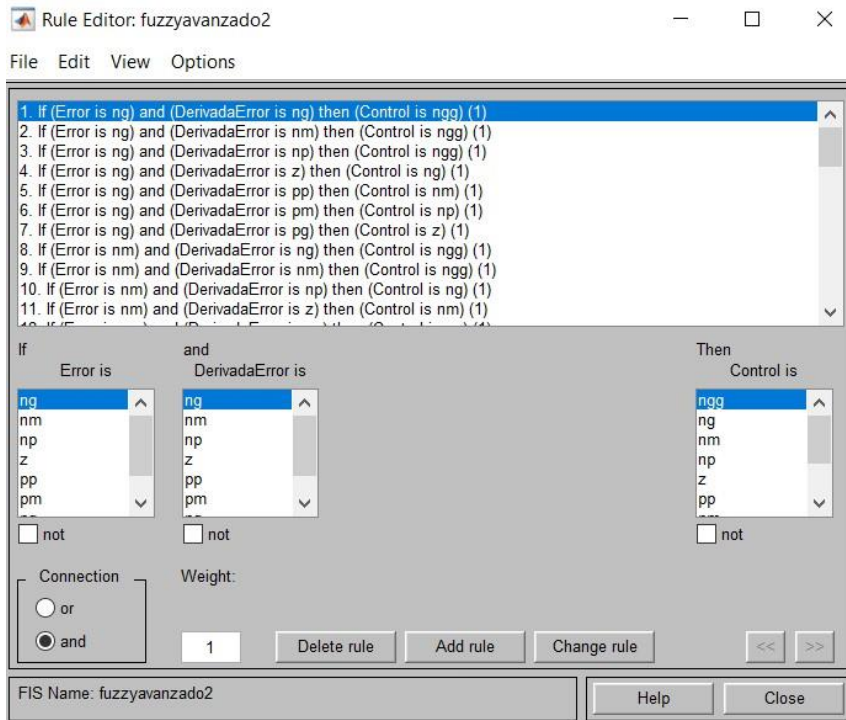


Figura 4.27 Reglas de pertinencia agregadas al Rule Editor.

Mediante la Figura 4.28 Surface del controlador Fuzzy. Se observa el desarrollo de defusificación con el método llamado centroide.

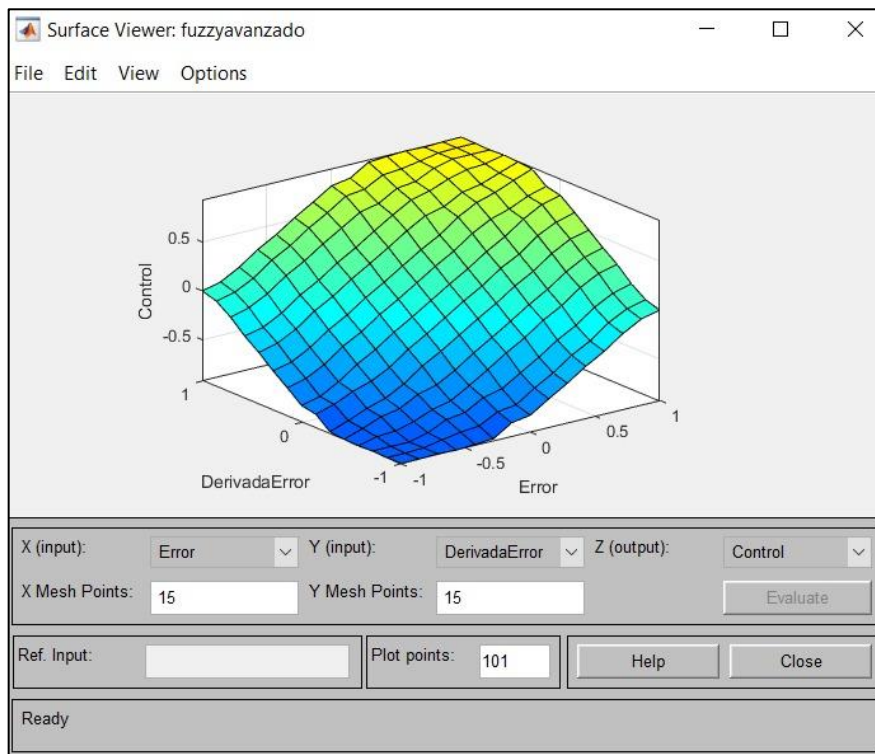


Figura 4.28 Surface del controlador Fuzzy.

Para visualizar de manera detalla la configuración revisar el **¡Error! No se encuentra el origen d e la referencia.**

4.3.7.2. Implementación del control Fuzzy

El controlador Fuzzy se establece realizando el diagrama de bloques correspondiente en Simulink. En la Figura 4.29 Esquema de simulación del controlador Fuzzy en Simulink se observa la estructura del controlador en Simulink con sus diferentes bloques conectados.

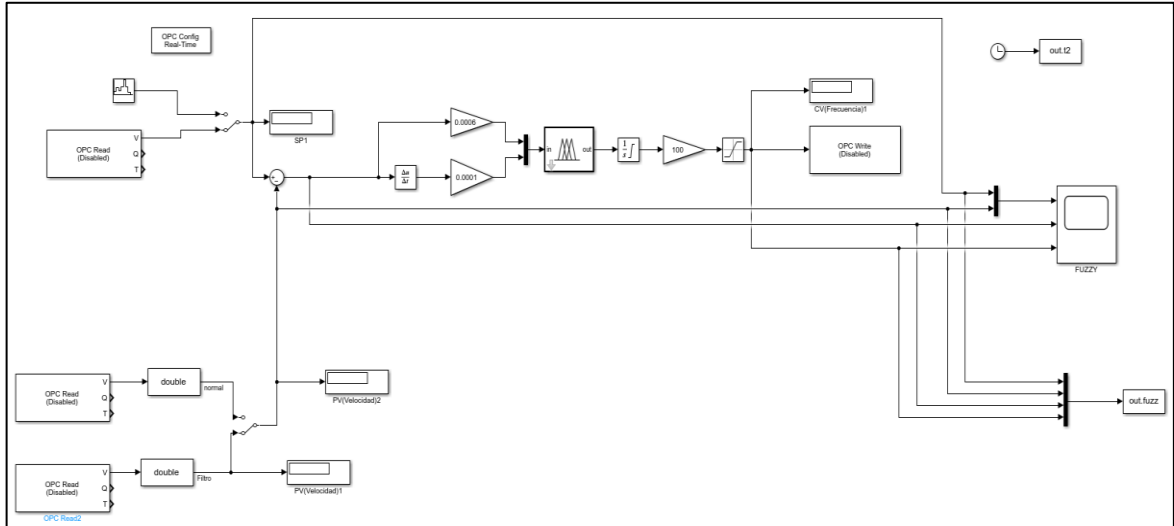


Figura 4.29 Esquema de simulación del controlador Fuzzy en Simulink

4.4. VALIDACIÓN DE VELOCIDAD



Figura 4.30 Validación de velocidad con el tacómetro

En la Figura 4.30 Validación de velocidad con el tacómetro se observa que la velocidad del motor en el HMI es de 500 rpm mientras que en el tacómetro es de 491,5 rpm esto quiere decir que existe un error, el cual no afecta al sistema.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para la presente sección se presentan y comparan los resultados alcanzados en la implementación de los sistemas de control PID y Fuzzy para la regulación de velocidad en un motor. Se analizan los datos obtenidos en aplicación real simulando una carga la cual se da mediante un freno de bicicleta accionado manualmente, evaluando los parámetros de cada sistema de control en diferentes características de estabilidad, tiempo de respuesta, error estacionario y suficiencia de oposición a perturbaciones. A través de este análisis, se busca determinar cuál de los dos enfoques ofrece un mejor rendimiento en el proceso de control de velocidad, considerando las ventajas y limitaciones de cada uno.

5.1. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONTROL PID Y FUZZY

5.1.1. Tiempo de asentamiento de señal

Para esta comparativa de ambos controladores se les da un valor de señal del SP de 500 el desempeño se observa en la Figura 5.1 Tiempo de asentamiento de señal en el control PID sin carga. y en la Figura 5.2 Tiempo de asentamiento se señal en el control Fuzzy sin carga.

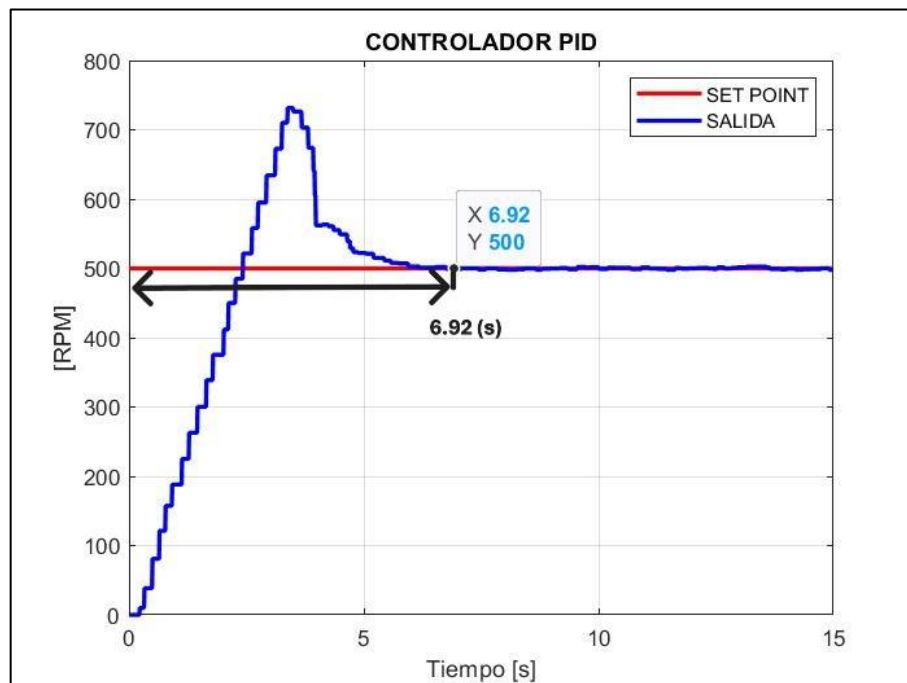


Figura 5.1 Tiempo de asentamiento de señal en el control PID sin carga.

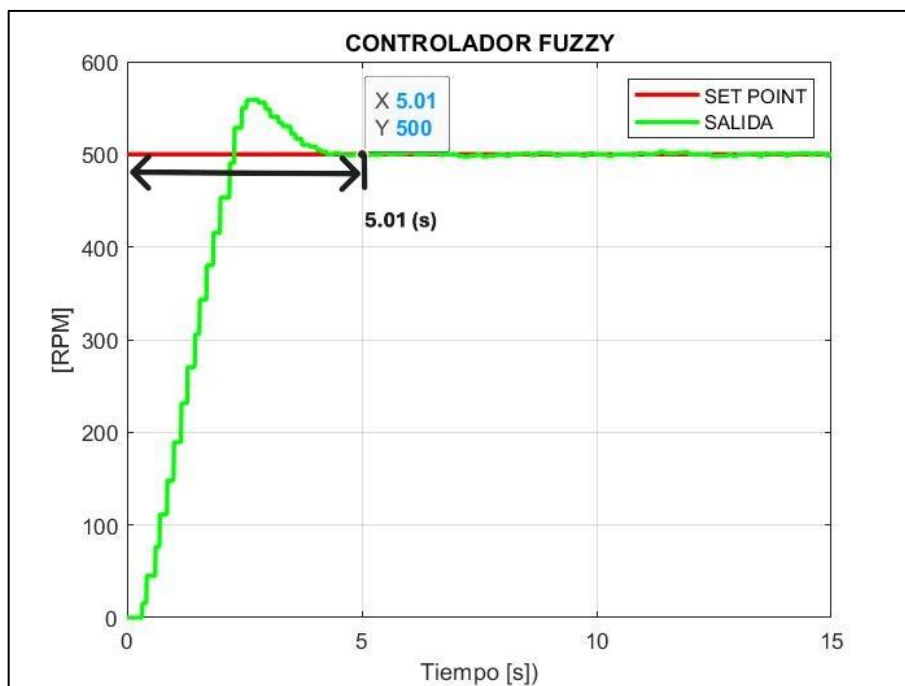


Figura 5.2 Tiempo de asentamiento se señal en el control Fuzzy sin carga.

En las figuras del comportamiento de ambos controladores se observa que el tiempo de asentamiento de señal es diferente para cada uno, en primera instancia el control PID tiene un tiempo de estabilización de 6,92 (s), mientras que en el control Fuzzy tiene un tiempo de 5,01 (s) por lo cual se determinó que el control Fuzzy tiene una mejor respuesta, mejorando el desempeño en un 27,60% con respecto al control PID.

A continuación, se realizó una comparativa de ambos controladores en los cuales se les da un valor de SP de 500 y una carga simulada de 6,5 N de fuerza mediante el freno de bicicleta en la Figura 5.3 Tiempo de asentamiento de señal PID con carga de 6,50 N y la Figura 5.4 Tiempo de asentamiento de señal Fuzzy con carga de 6,50 N se observa el comportamiento.

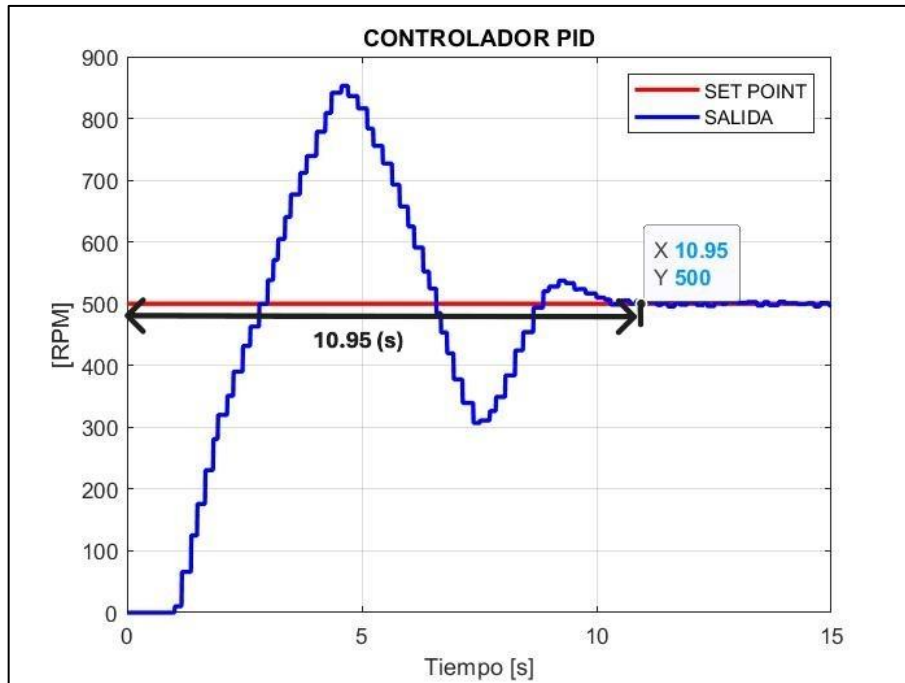


Figura 5.3 Tiempo de asentamiento de señal PID con carga de 6,50 N

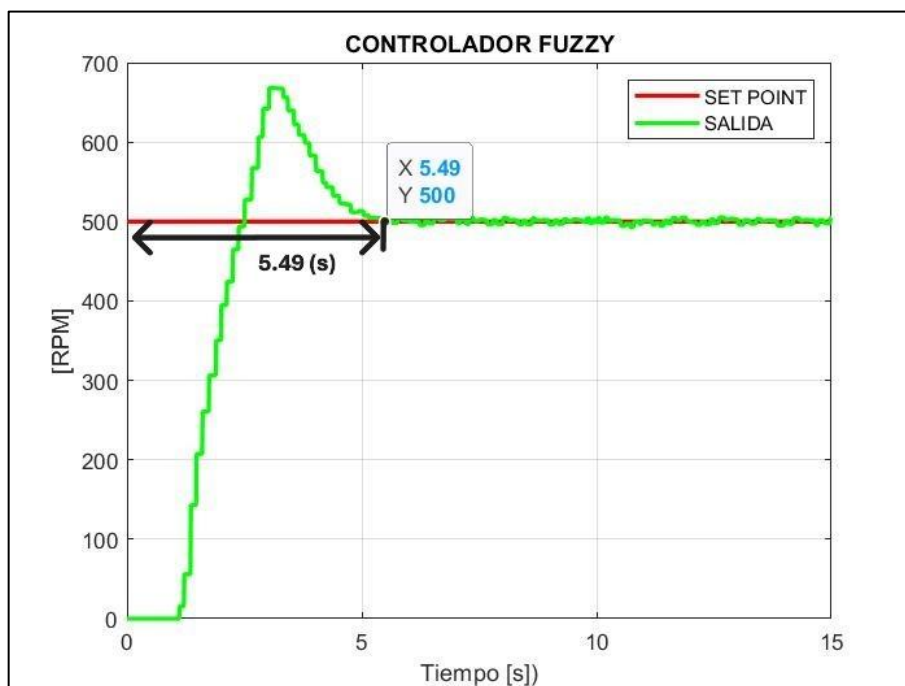


Figura 5.4 Tiempo de asentamiento de señal Fuzzy con carga de 6,50 N

En las figuras del comportamiento de ambos controladores con una carga simulada mediante el freno de bicicleta se observa que el tiempo de asentamiento de señal del control PID tiene un tiempo de 10,95 (s), mientras que en el control Fuzzy tiene un tiempo de 5,49 (s) por lo cual se determinó que el control Fuzzy tiene una mejor respuesta cuando se aplica una carga, logrando una optimización del 49,86% con relación al controlador PID.

5.1.2. Sobre impulso

Para esta comparativa de ambos controladores se les da un valor de señal del SP de 500 donde el desempeño de estos se observa en la Figura 5.5 Sobre impulso en el control PID. y Figura 5.6 Sobre impulso en el control Fuzzy.

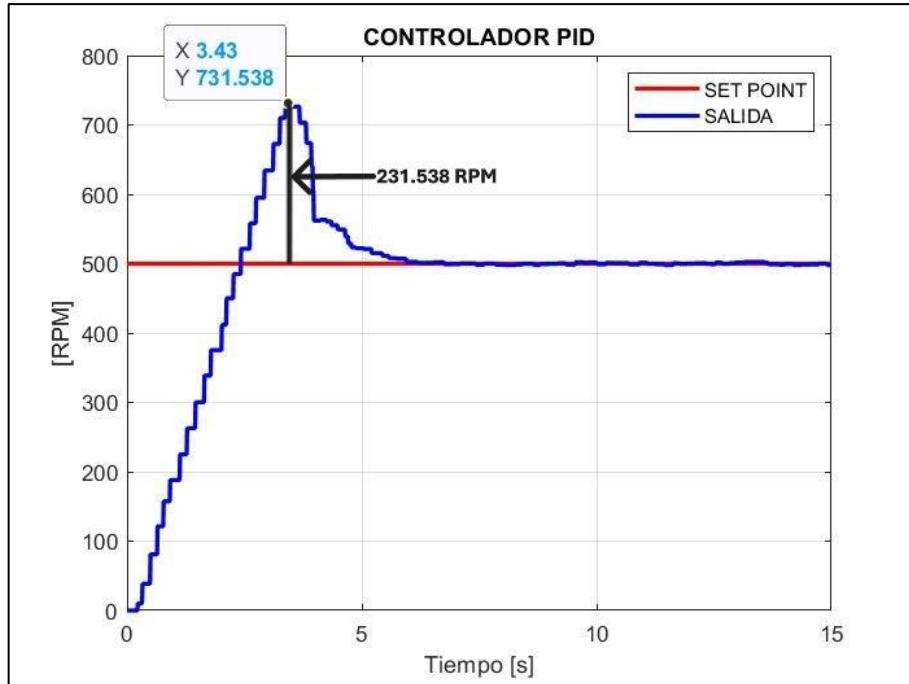


Figura 5.5 Sobre impulso en el control PID.

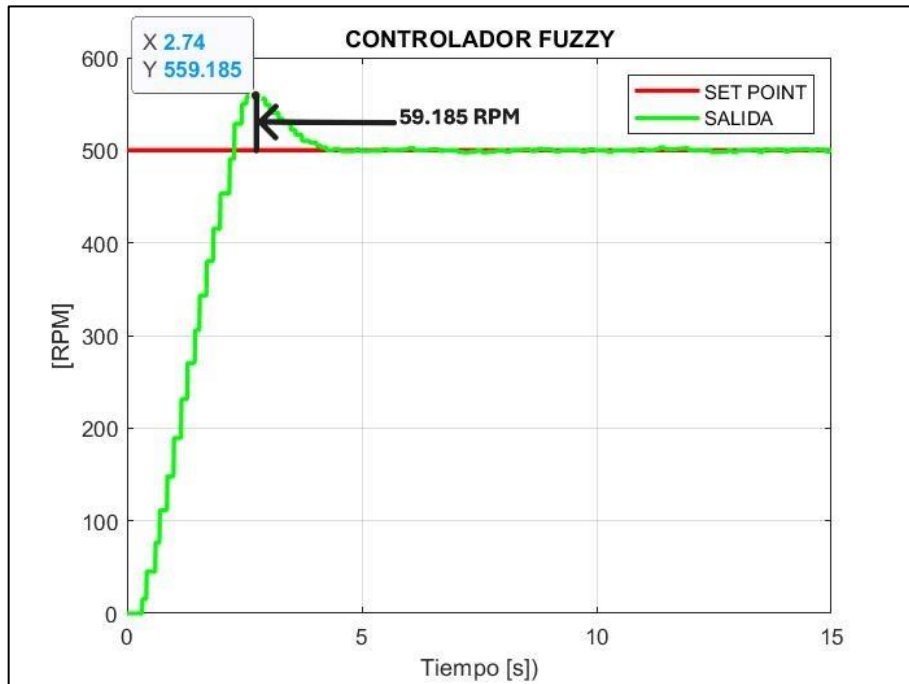


Figura 5.6 Sobre impulso en el control Fuzzy.

Se puede visualizar que al enviar un valor de SP 500 rpm con carga nula se produce un sobre impulso de 231,538 rpm hasta su estabilización en el control PID a comparación del controlador Fuzzy se visualiza que el sobre impulso es menor con un valor de 59,185 rpm hasta su estabilización, con esto se determinó que el controlador Fuzzy tiene una mejor respuesta ante el sobre impulso con un mejor desempeño del 74,44 % ante el controlador PID.

Se realizó las pruebas con el mismo SP y con una simulación de carga de 6,50 N a cada controlador, en la Figura 5.7 Sobre impulso PID con carga de 6,5 N y en la Figura 5.8 Sobre impulso Fuzzy con carga de 6,5 N se observa el comportamiento.

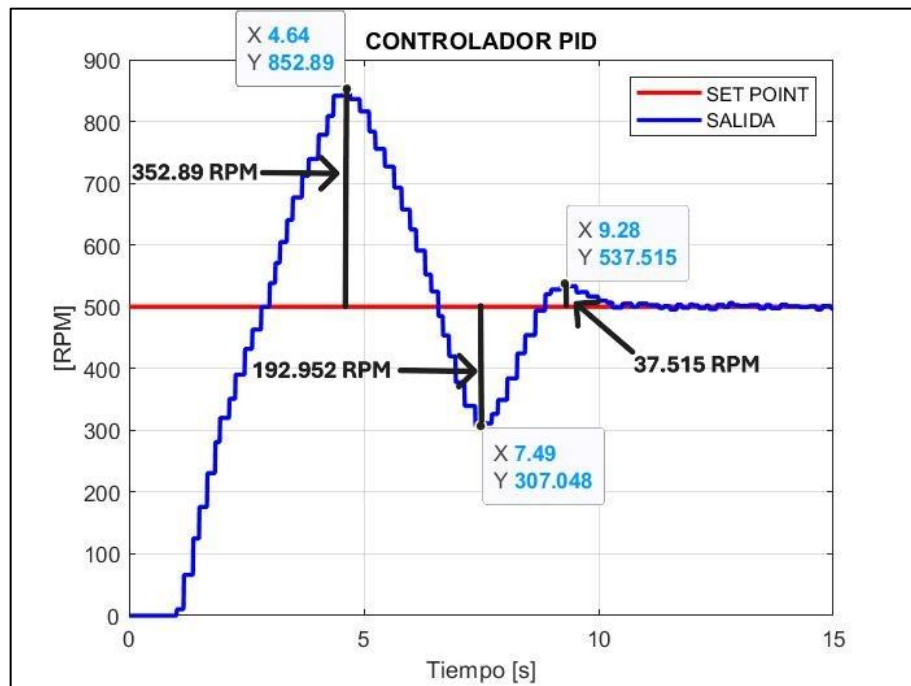


Figura 5.7 Sobre impulso PID con carga de 6,5 N

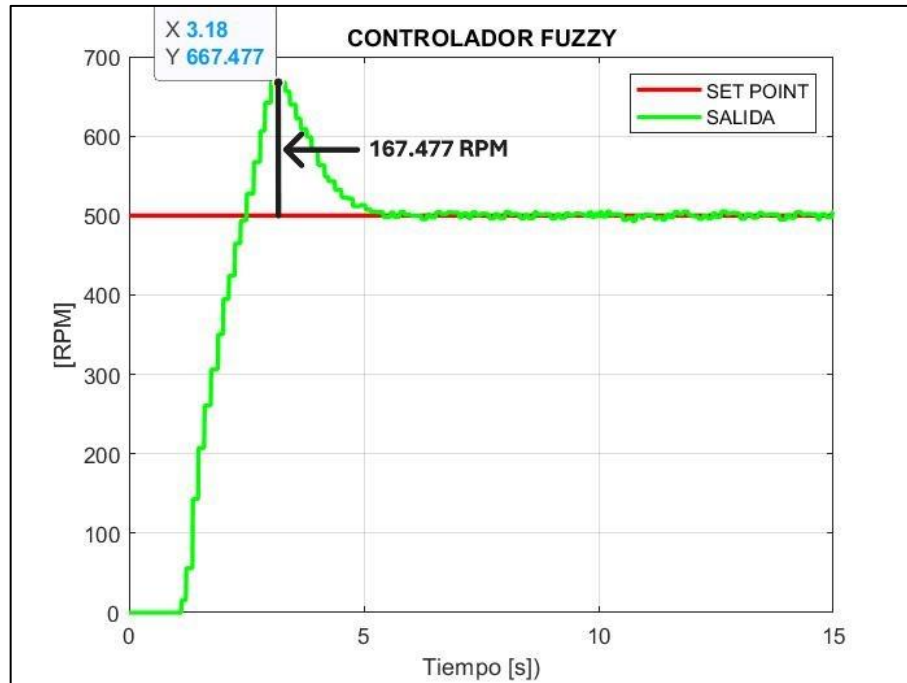


Figura 5.8 Sobre impulso Fuzzy con carga de 6,5 N

En las figuras que representan el comportamiento dinámico de ambos controladores ante la aplicación de una carga simulada mediante un freno de bicicleta, se observa que el controlador PID presenta tres sobre impulsos significativos: un sobre impulso máximo de 352,89 rpm, un sobre impulso de 192,952 rpm por debajo del SP y un último de 37,512 rpm. Por otro lado, el controlador Fuzzy exhibe un único sobre impulso de 167,477 rpm. Estos resultados indican que el control Fuzzy presenta una mejor capacidad de compensación ante perturbaciones, logrando una respuesta más estable y con menor oscilación en comparación con el controlador PID.

5.1.3. Tiempo de estabilización en descenso

En la Figura 5.9 Tiempo de estabilización en descenso del control PID sin carga. y la Figura 5.10 Tiempo de estabilización en descenso del control Fuzzy sin carga se realizó la comparativa de descenso con valores de SP de 1000 a 500 rpm y se observó cual fue el tiempo para que la señal se estabilice el sistema.

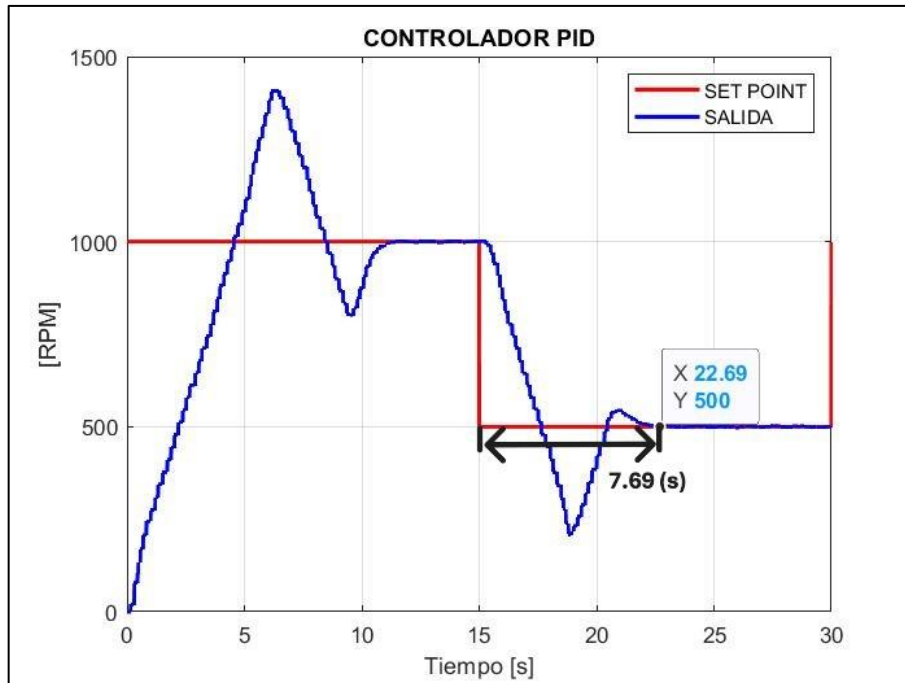


Figura 5.9 Tiempo de estabilización en descenso del control PID sin carga.

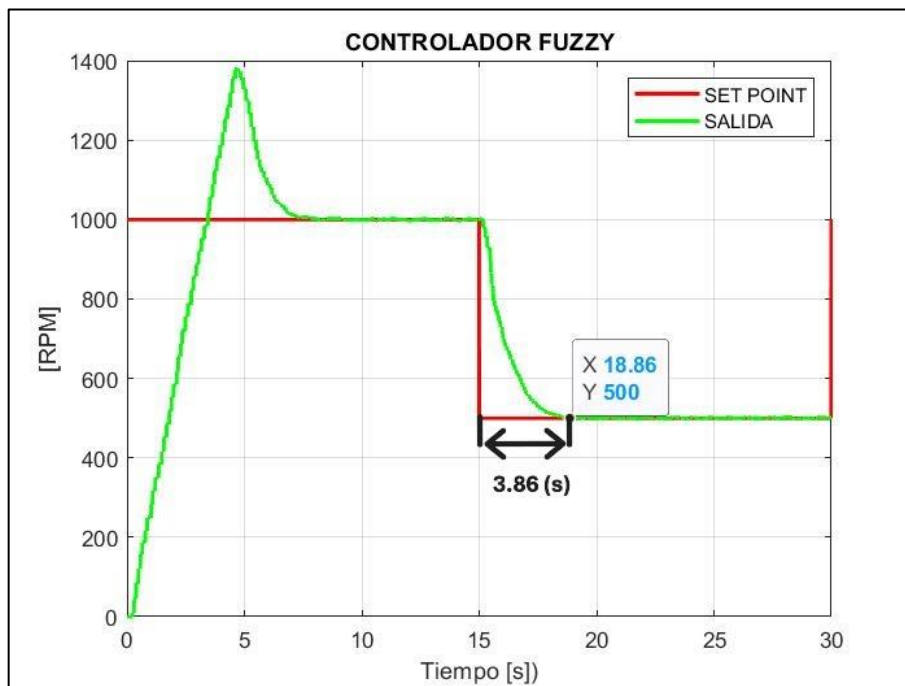


Figura 5.10 Tiempo de estabilización en descenso del control Fuzzy sin carga

En las figuras del comportamiento de ambos controladores, se observa el tiempo que demora hasta estabilizarse en descenso, el control PID tiene un tiempo de estabilización de 7,69 (s), mientras que en el control Fuzzy tiene un tiempo de 3,86 (s) por lo cual se determina que el control Fuzzy tiene una mejor respuesta, mejorando el desempeño en un 49,80 % con respecto al control PID.

Seguidamente, se realizó una comparativa de ambos controladores en los cuales se les da un valor de SP de 1000 a 500 rpm y una carga simulada de 6,5 N mediante el freno de bicicleta en la Figura 5.11 Tiempo de estabilización en descenso del control PID con carga de 6,5 N y la Figura 5.12 Tiempo de estabilización en descenso del control Fuzzy con carga de 6,5 N se observa el comportamiento de ambos controladores.

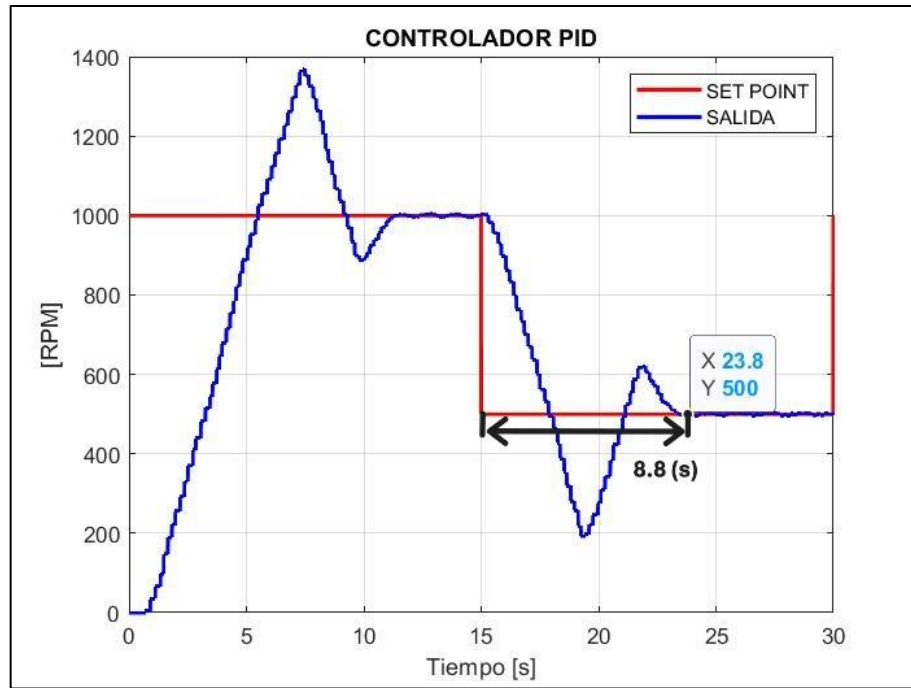


Figura 5.11 Tiempo de estabilización en descenso del control PID con carga de 6,5 N

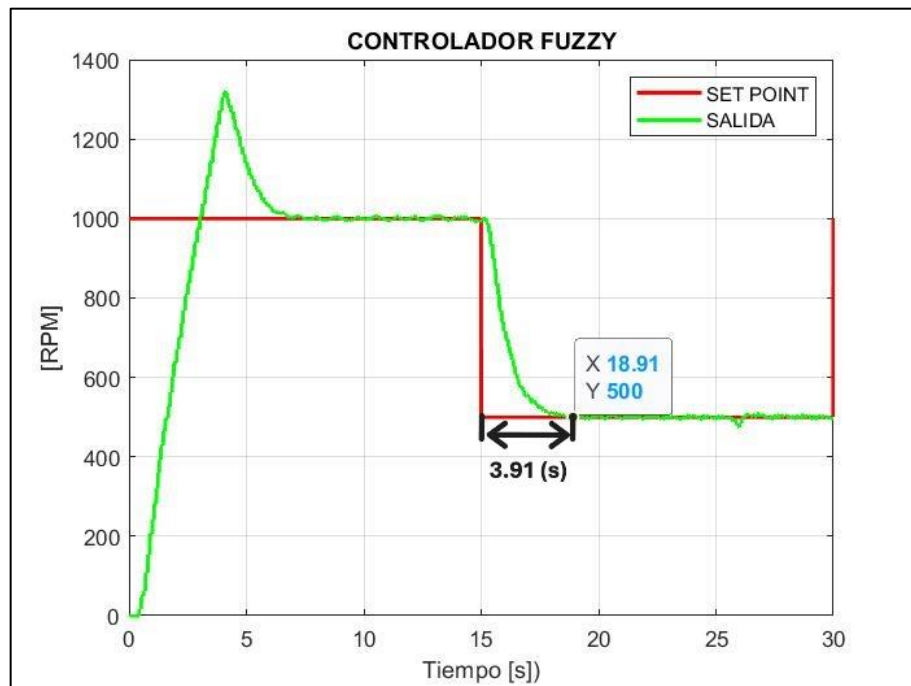


Figura 5.12 Tiempo de estabilización en descenso del control Fuzzy con carga de 6,5 N

En las figuras se observa el tiempo de estabilización de descenso, el control PID tiene un tiempo de estabilización de 8,8 (s), mientras que en el control Fuzzy tiene un tiempo de 3,91 (s) por lo cual se determinó que el control Fuzzy tiene una mejor respuesta, mejorando el desempeño en un 55,56 % con respecto al control PID.

5.1.4. Tiempo de respuesta

En la Figura 5.13 Tiempo de respuesta del control PID ante una carga de 6,50 N y en la Figura 5.14 Tiempo de respuesta del control Fuzzy ante una carga de 6,50 N se observa el comportamiento de los controladores.

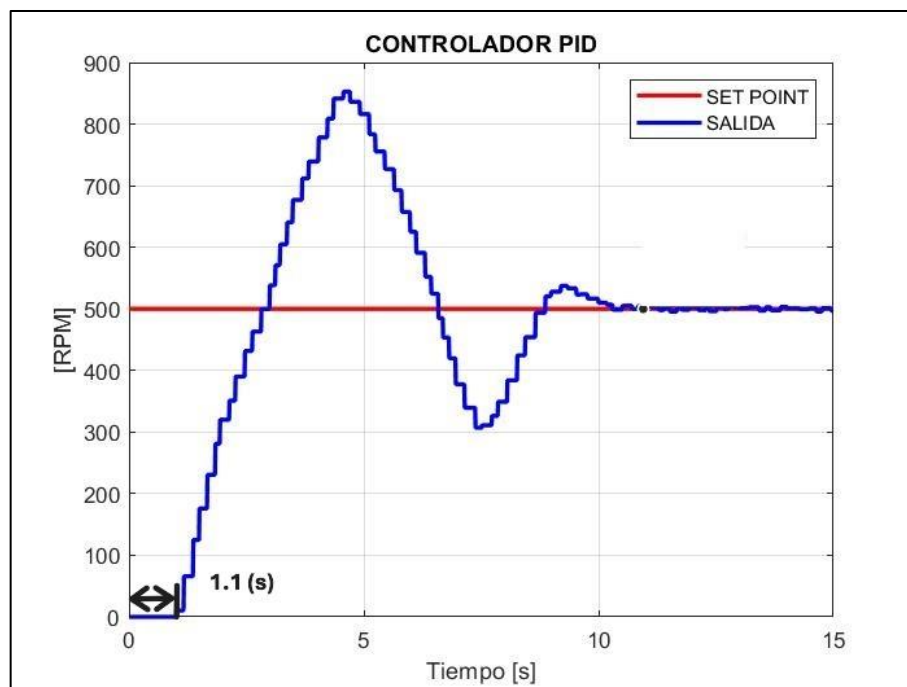


Figura 5.13 Tiempo de respuesta del control PID ante una carga de 6,50 N

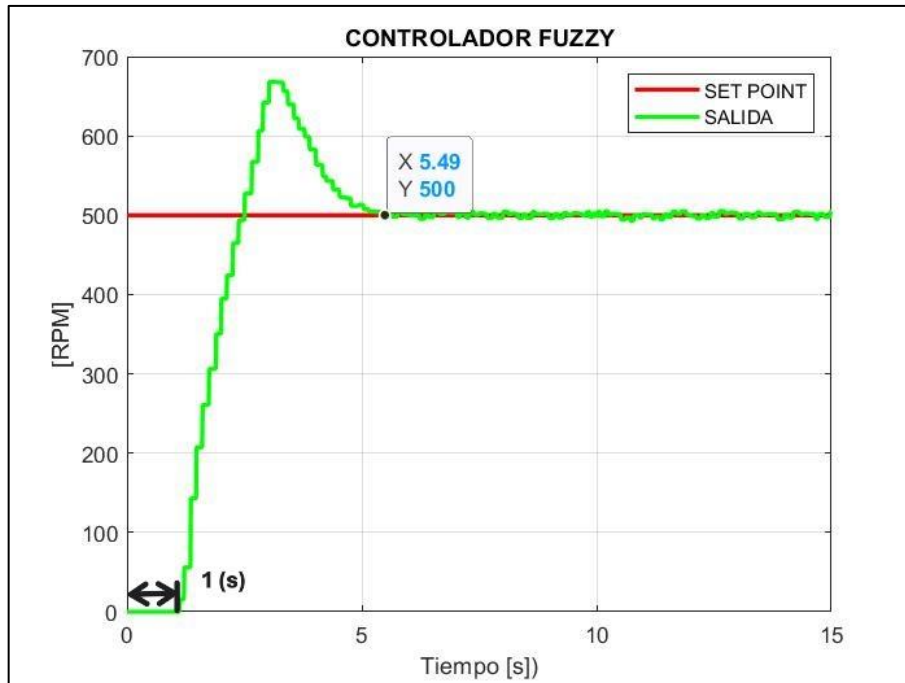


Figura 5.14 Tiempo de respuesta del control Fuzzy ante una carga de 6,50 N

Se observa que el controlador Fuzzy responde en un tiempo significativamente menor en comparación con el controlador PID. Aunque la diferencia en el tiempo de respuesta es mínima, esta reducción, esto conlleva una mejora del sistema del 9,09 % lo que indica una mayor eficiencia y capacidad de adaptación del control Fuzzy frente a variaciones en el sistema.

5.1.5. Comportamiento a diferentes SP

En la Figura 5.15 Comportamiento con SP escalón del control PID sin carga y en la Figura 5.16 Comportamiento con SP escalón del control Fuzzy sin carga se refleja el desempeño de cada uno de los controladores a diferente SP de ascenso y descenso.

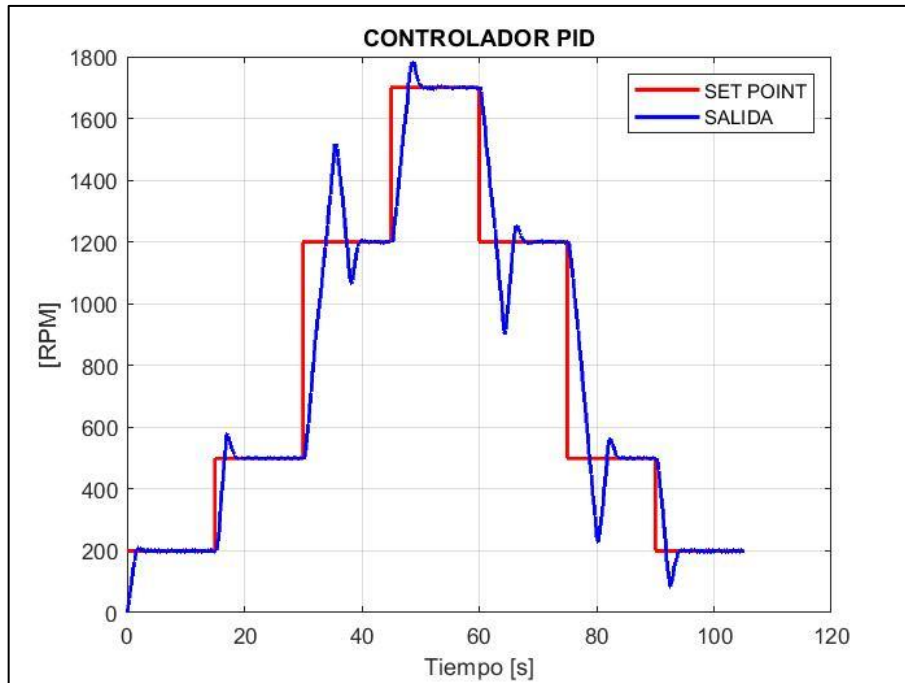


Figura 5.15 Comportamiento con SP escalón del control PID sin carga

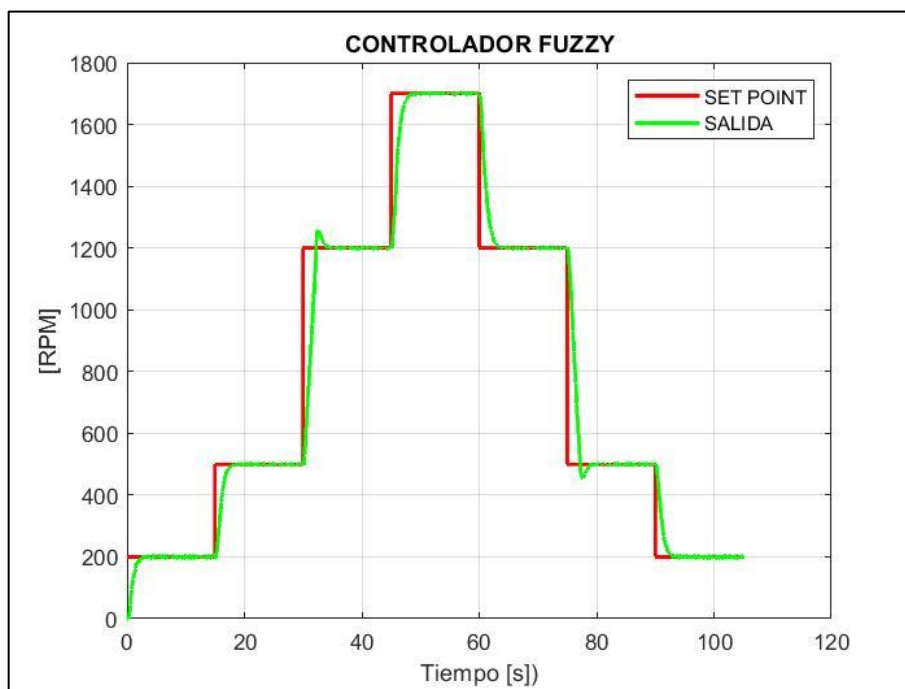


Figura 5.16 Comportamiento con SP escalón del control Fuzzy sin carga

El controlador Fuzzy ofrece un rendimiento superior en cuanto a estabilidad y tiempo de respuesta en comparación con el controlador PID, ya que exhibe un tiempo de estabilización más corto, sobre impulso casi nulo y una reacción más rápida a los cambios en el Setpoint. Estas características permiten una transición más eficiente y precisa entre valores de referencia, reduciendo el retardo y la oscilación en la gráfica. En contraste, el controlador PID muestra un

sobre impulso evidente y un mayor tiempo de retardo, lo que puede comprometer la estabilidad y eficiencia en aplicaciones donde la rapidez y precisión son críticas.

Seguidamente, se refleja el comportamiento de cada controlador al ser aplicados una carga simulada de 6,50 N mediante el freno de bicicleta a diferentes SP.

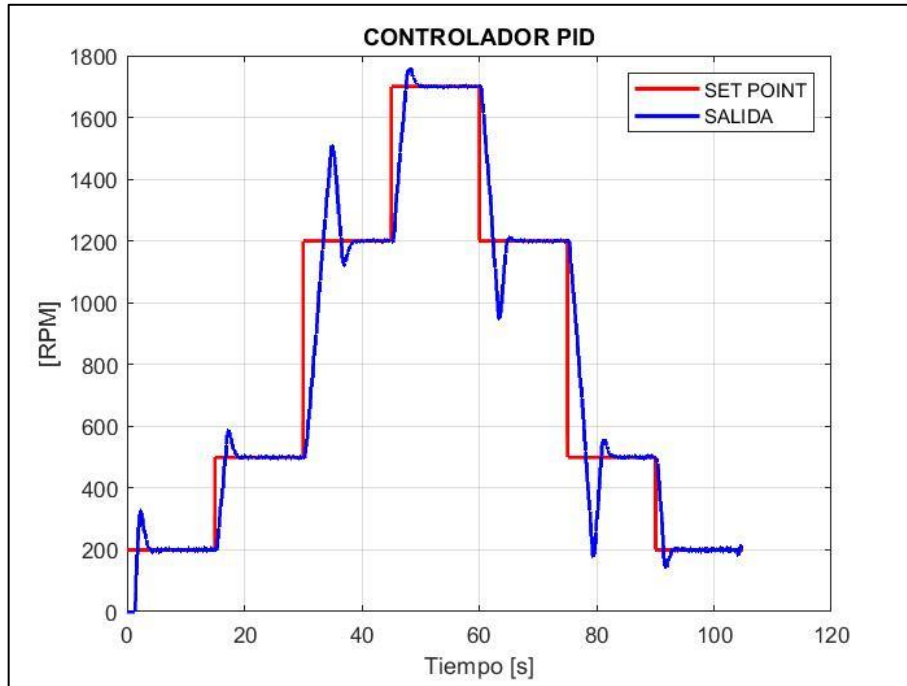


Figura 5.17 Comportamiento con SP escalón del control PID con carga de 6,50 N

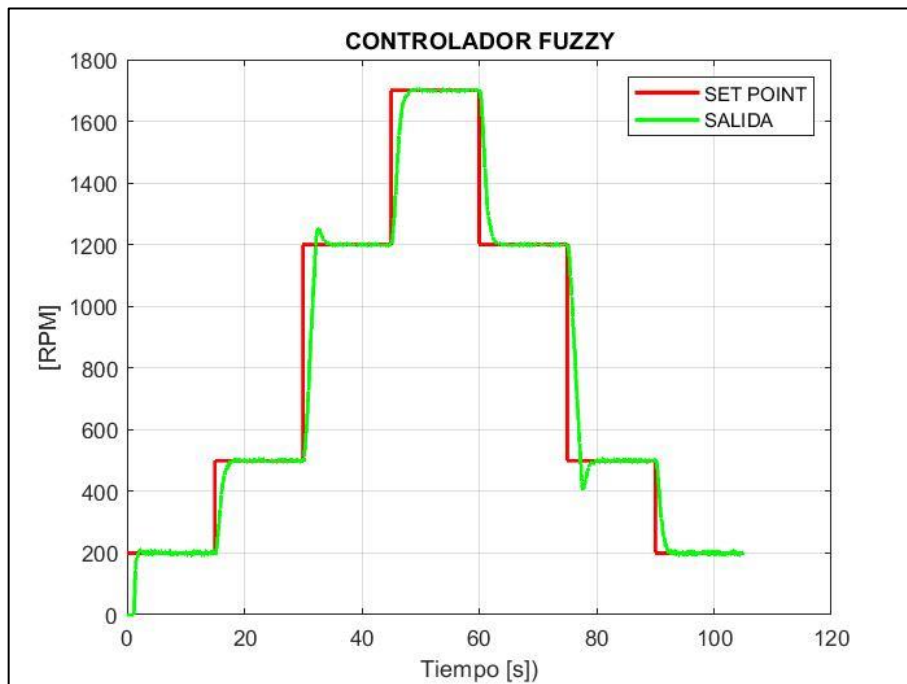


Figura 5.18 Comportamiento con SP escalón del control Fuzzy con carga de 6,50 N

En la Figura 5.17 Comportamiento con SP escalón del control PID con carga de 6,50 N y en la Figura 5.18 Comportamiento con SP escalón del control Fuzzy con carga de 6,50 N se observó que el comportamiento de los controladores, de igual manera al aplicar una carga el controlador Fuzzy se adapta de mejor manera en parámetros de estabilización, sobre impulso, tiempo de retardo y estabilización descendente, ya que al basarse en reglas lingüísticas y lógica difusa, logra un tiempo de estabilización más corto, lo que indica una mayor rapidez en la convergencia hacia el Setpoint sin la necesidad de una modelación matemática exacta del sistema a comparación del controlador PID.

5.1.6. Resumen del análisis comparativo

Tabla 5.1 Resumen del análisis comparativo en el control PID con carga de 3,5 N

Perturbación [N]	SP [RPM]	Tiempo de estabilización [s]	Tiempo de respuesta [s]	S	B	Error [RPM]	S	B
3.5	500	4,38	0,17	X		118,50	X	
3.5	1000	6,39	0,39	X		205,25	X	
3.5	1600	6,15	0,07	X		150,30	X	
3.5	1000	10,15	0,21		X	-362,04 145,58	X	X
3.5	500	5,37	0,19		X	-226,60		X
3.5	0	2,87	0,34		X	-		X

Tabla 5.2 Resumen del análisis comparativo en el control Fuzzy con carga de 3,5 N

Perturbación [N]	SP [RPM]	Tiempo de estabilización [s]	Tiempo de respuesta [s]	S	B	Error [RPM]	S	B
3.5	500	3,30	0,03	X		-	X	
3.5	1000	3,52	0,27	X		-	X	
3.5	1600	4,12	0,21	X		8,03	X	
3.5	1000	3,37	0,10		X	-		X
3.5	500	3,94	0,18		X	-		X
3.5	0	2,87	0,17		X	-		X

El análisis comparativo de las Tablas 5.1 y 5.2 revela que el control Fuzzy exhibe un mejor desempeño en términos de estabilidad y tiempo de respuesta en comparación con el control PID bajo una carga de 3,5 N. En particular, el control Fuzzy muestra tiempos de estabilización más bajos en todos los casos, con valores que oscilan entre 2,87 (s) y 4,12 (s), mientras que el control PID presenta tiempos significativamente mayores, alcanzando hasta 10,15 (s) para ciertos valores de SP. Asimismo, el tiempo de respuesta en el control Fuzzy es más rápido, registrando valores de hasta 0,03 (s), por otro lado, en el control PID los tiempos son relativamente más

elevados. En cuanto al error en estado estacionario, el control PID evidencia fluctuaciones considerables, con valores negativos y positivos de gran magnitud, mientras que el control Fuzzy muestra una reducción sustancial del error, con valores cercanos a cero en la mayor parte de los escenarios. Esto quiere decir que el control Fuzzy ofrece una mayor robustez y estabilidad frente a perturbaciones, minimizando la oscilación y mejorando la respuesta transitoria del sistema.

Tabla 5.3 Resumen del análisis comparativo en el control PID con carga de 6,5 N

Perturbación [N]	SP [RPM]	Tiempo de estabilización [s]	Tiempo de respuesta [s]	S	B	Error [RPM]	S	B
6.5	500	10,95	1,83	X		352,80 -192,90 37,51	X	X
6.5	1000	7,55	0,07	X		265,44 -81,61	X	X
6.5	1600	6,30	0,12	X		135,42	X	
6.5	1000	8,94	0,31		X	-294,10 76,16	X	X
6.5	500	6,96	0,36		X	-373,80 82,55	X	X
6.5	0	5,86	0,16		X	-		X

Tabla 5.4 Resumen del análisis comparativo en el control Fuzzy con carga de 6,5 N

Perturbación [N]	SP [RPM]	Tiempo de estabilización [s]	Tiempo de respuesta [s]	S	B	Error [RPM]	S	B
6.5	500	5,49	0,96	X		167,447	X	
6.5	1000	3,97	0,15	X		-	X	
6.5	1600	4,81	0,10	X		-	X	
6.5	1000	3,34	0,05		X	-		X
6.5	500	3,47	0,11		X	-		X
6.5	0	3,07	0,04		X	-		X

El análisis comparativo entre el control PID y el control Fuzzy con una perturbación de 6,5 N evidencia que el control Fuzzy supera al PID en términos de tiempo de estabilización, tiempo de respuesta y error en estado estacionario. El controlador Fuzzy logra estabilizar el sistema en menor tiempo, con reducciones de hasta un 50 % en comparación con el PID, además de mantener tiempos de respuesta rápidos y consistentes en todas las condiciones evaluadas. En cuanto al error, el control PID presenta valores significativamente mayores y variables, mientras que el Fuzzy mantiene un error reducido y, en algunos casos, prácticamente nulo, lo que indica

una mayor precisión en la regulación de la velocidad. Además, el control Fuzzy muestra una mayor estabilidad y robustez ante perturbaciones, asegurando una respuesta más eficiente.

Estos resultados sugieren que el control Fuzzy es más adecuado para aplicaciones en las que la rapidez y estabilidad del sistema son críticas, especialmente en escenarios donde la carga o las condiciones operativas pueden variar.

Los hallazgos adquiridos al realizar las necesarias pruebas experimentales han demostrado que el controlador Fuzzy es la opción más adecuada para el control de velocidad del motor, evidenciando un desempeño superior al control PID en las condiciones evaluadas y validando su efectividad en la regulación del sistema.

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** revisar las gráficas de toma de pruebas del funcionamiento.

5.2. PRESUPUESTO

El presupuesto de la propuesta tecnológica en la que se trabajó debe considerar diversos elementos de forma individual, incluyendo tanto costos directos como indirectos. A continuación, se presentan en detalle estos costos en las siguientes tablas.

Tabla 5.5 Materiales y suministros

Materiales y suministros	Cantidad (unidad)	Precio Unitario	Precio Total
Cables de conexión de 1m	30	0,50	15,00
Plugs banana	60	0,15	9,00
Disco de freno	1	5,00	5,00
Freno hidráulico de bicicleta	1	45,00	45,00
Riel Din de 30 cm	1	1,00	1,00
Lámina de acero de 60x30	1	15,00	15,00
Bornes de seguridad	11	0,50	5,50
Barra de teflón de 30 cm	1	13,00	13,00
TOTAL			\$ 108,50

Tabla 5.6 Equipos para el uso directo del proyecto.

Equipos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
PLC S7-1200	1	550,00	550,00
Variador de frecuencia	1	650,00	650,00
HMI KTP700	1	1200,00	1200,00
Motor Trifásico 1/4 hp	1	120,00	120,00
Computador	1	1200,00	1200,00
Encoder	1	60,00	60,00

TOTAL	\$ 3780,00
--------------	------------

En la tabla anterior se visualiza los precios de diferentes equipos como el PLC S7-1200, variador de frecuencia y el HMI KTP700 los cuales han sido investigados de acorde al mercado ya que estos equipos pertenecen al laboratorio de automatización y control de la Universidad Técnica de Cotopaxi. El resto de equipos han sido obtenidos para la realización de la propuesta tecnológica.

Tabla 5.7 Gastos indirectos y profesionales

Gastos indirectos y profesionales	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Ingeniería (mano de obra)	-	-	200,00
Transporte	-	-	15,00
Otros gastos	-	-	40,00
TOTAL			\$ 255,00

Una vez obtenidos los valores de cada uno de los gastos necesarios para la realización de esta propuesta tecnológica tenemos un valor de gastos totales de \$ 3888,50 dólares americanos.

Para una recuperación de los fondos invertidos en la elaboración del prototipo experimental del control de velocidad de un motor trifásico, se realizó un análisis de costos por el alquiler del mismo.

Inversión inicial = \$ 3888,50

Ingresos esperados por año = \$ 1000,00

Costos operativos por año = \$ 20,00

Horizonte de evaluación = 4 años

$$\text{Flujo de caja neto anual} = \text{Ingresos esperados} - \text{Costos de operación}$$

Flujo de caja anual = \$ 980,00

Valor presente neto:

$$VPN = \sum \frac{F_t}{(1+r)^t} - C_0$$

Donde:

F_t = Flujo de caja

r = Tasa de descuento

C_0 = Inversión inicial

Tabla 5.8 Valor presente neto

t (años)	Flujo de caja	Flujo Acumulado
0	-3888,50	-3888,50
1	980,00	-2908,50
2	980,00	-1928,50
3	980,00	-948,50
4	980,00	31,50

PAY BACK:

$$PAY\ BACK = (\text{Periodo Último con Flujo Acumulado}) + \frac{|\text{Flujo Acumulado}|}{\text{Flujo de Caja}}$$

$$PAY\ BACK = (3) + \frac{|-948,5|}{980}$$

$$PAY\ BACK = (3) + \frac{|-948,5|}{980}$$

$$PAY\ BACK = 3,96$$

La inversión se recupera en 3 años con 11 meses y 18 días.

5.3. ANÁLISIS DE IMPACTOS

5.3.1. Impacto práctico

El análisis comparativo entre los sistemas de control Fuzzy y PID en la modulación de velocidad de motores no solo permite evaluar su desempeño, sino que también fortalece el desarrollo de competencias técnicas en el uso de herramientas avanzadas de simulación y programación. Este estudio profundiza en la integración y configuración de la comunicación RS-485 entre el PLC y el variador de frecuencia, la implementación de contadores rápidos para la lectura de encoders y el intercambio de datos en tiempo real mediante protocolos OPC. Asimismo, la obtención, el procedimiento y analizar los diferentes datos en distintas etapas del control proporciona una evaluación detallada de la eficiencia, estabilidad y capacidad de respuesta de cada sistema, optimizando su aplicación en entornos industriales y académicos.

Esto facilita una toma de decisiones más informada al seleccionar y ajustar estrategias de control, con el objetivo de optimizar el rendimiento de los motores eléctricos en diferentes aplicaciones.

5.3.2. Impacto tecnológico

La implementación de sistemas de control avanzados mediante conectividad OPC representa un avance significativo en la automatización industrial, superando las limitaciones de los enfoques habituales. En el estudio comparativo entre los sistemas de control Fuzzy y PID en la regulación de velocidad de motores, la integración del PLC S7-1200 como elemento de control principal permite una mayor versatilidad en la gestión de parámetros y optimiza el desempeño del sistema. Este análisis no solo facilita la evaluación del rendimiento de ambas estrategias de control, sino que también proporciona una base técnica para la selección del método más eficiente según los requerimientos del proceso. El control moderno no se concibe como una solución aislada, sino como parte de un ecosistema tecnológico interconectado que mejora la precisión, estabilidad y adaptabilidad en la gestión de velocidad de motores. Así, este desarrollo no solo incrementa la eficiencia operativa actual, sino que también impulsa la innovación de procesos industriales mediante la automatización.

5.3.3. Impacto epistemológico

La ejecución de este estudio contribuye significativamente al conocimiento en sistemas de control, enfocándose en la regulación de velocidad de motores. Este avance impacta tanto en el ámbito teórico como práctico, al analizar y comparar dos estrategias de control ampliamente utilizadas en la industria y la academia. La evaluación comparativa y la implementación de estos controladores no solo fortalecen la comprensión de sus principios y aplicaciones, sino que también proporcionan nuevas perspectivas sobre su desempeño en diferentes condiciones operativas. Además, este estudio permite optimizar modelos existentes, mejorar estrategias de control y sentar un fundamento firme para futuras investigaciones en la creación de sistemas de control más eficientes y adaptativos en el ámbito de la automatización industrial.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Por medio del análisis bibliográfico, se comprendió que el control PID opera mediante una formulación matemática basada en la realimentación del error, ajustando los

parámetros proporcionales, integrales y derivativos. Por otro lado, el controlador Fuzzy utiliza reglas lingüísticas y lógica difusa. Esta investigación permitió identificar las ventajas, limitaciones y aplicaciones de cada controlador.

- Se obtuvo la función de transferencia a través de la obtención de datos del motor trifásico de ¼ Hp y la función IDENT de Matlab en la cual alcanzó un 92.57% de similitud con respecto a la planta real. Esta caracterización permitió definir los parámetros claves del motor, facilitando el diseño y la optimización de los controladores PID y Fuzzy para su implementación en el prototipo experimental.
- Se logró diseñar e implementar los algoritmos de control PID y Fuzzy en el software Matlab, considerando las características dinámicas del sistema de control de velocidad del motor trifásico, permitiendo identificar el desempeño de ambas estrategias en un entorno real.
- La validación de los resultados, basada en la implementación de ambos sistemas de control, reveló diferencias significativas en términos de desempeño. El control Fuzzy demuestra un mejor desempeño en términos de tiempo de estabilización y respuesta, logrando reducir en promedio el tiempo de estabilización en un 34,2% y el tiempo de respuesta en un 56,5% en comparación con el PID. Además, presenta menores errores estacionarios, siendo hasta 94,7% menor en el peor caso. Esto sugiere que el controlador Fuzzy es más adecuado para mantener la estabilidad y precisión del sistema bajo perturbaciones. Estos hallazgos confirman que, si bien ambos métodos son efectivos, la elección del controlador más adecuada debe considerar las características específicas del sistema, para esta propuesta tecnológica ha determinado que el controlador Fuzzy logra un mejor desempeño.

6.2. RECOMENDACIONES

- Es esencial entender y dominar herramientas de simulación como MATLAB para diseñar y verificar modelos matemáticos antes de la implementación práctica de los sistemas de control. El uso de simulaciones no solo facilita el análisis de la dinámica del sistema, sino que también optimiza el diseño y la sintonización de los controladores, permitiendo identificar y corregir posibles errores antes de la práctica de implementación. Esto reduce el riesgo de fallos, mejora la eficiencia del proceso y garantiza un desempeño más preciso y confiable del sistema de control.

- Es fundamental implementar y probar los sistemas de control PID y Fuzzy en entornos reales para evaluar su desempeño bajo condiciones operativas auténticas. Para ello, se deben realizar pruebas exhaustivas que incluyan variaciones en la carga y la presencia de perturbaciones externas, permitiendo analizar la respuesta de los controladores en escenarios prácticos. Esta evaluación garantizará una mejor comprensión de su comportamiento y facilitará la identificación del controlador más adecuado para aplicaciones reales.
- Se debe conservar un registro exhaustivo de todo el proceso de diseño, implementación y validación de los controladores. Este registro será una referencia valiosa para futuros trabajos y simplificará el análisis de los resultados alcanzados. Además, se recomienda ejecutar un control continuo del desempeño de los controladores implementados para identificar oportunidades de mejora y realizar ajustes según los cambios en las condiciones operativas, asegurando así la optimización constante del sistema.

7.REFERENCIAS

- [1] «codigos_unesco.pdf».
- [2] L. E. Mayorga Miranda, «Diseño e implementación de una plataforma para el estudio comparativo de un controlador predictivo (MPC) con controladores PID y Fuzzy, aplicado al control de velocidad de un motor DC.», masterThesis, 2019. Accedido: 5 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19941>
- [3] E. B. Aquieta Tibán, «Estudio comparativo de control PID, predictivo y difuso en un proceso de flujo.», masterThesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi; UTC., 2023. Accedido: 16 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/11527>
- [4] J. L. Morocho Ona, «Diseño e implementación de un sistema de control Pid de velocidad de un motor trifásico de inducción controlado y monitoreado mediante un sistema Scada», bachelorThesis, 2017. Accedido: 16 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7101>
- [5] Á. S. R. Garcés y Á. W. P. Calderón, «1 Información básica».
- [6] «Controladores_PID_y_Controladores_Difuso.pdf».
- [7] L. E. M. Miranda, «Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magíster en mecatrónica y robótica».
- [8] C. Calle y D. Eduardo, «Diseño e implementación de un control difuso de velocidad para el motor hidráulico HRE hidraulic», 2018.
- [9] J. C. Oliden Semino, «Desarrollo de un controlador predictivo basado en modelo para plataforma industrial».
- [10] A. Cascante Yépez y J. Orellana Apolinario, «Modelado y control de posición de un cilindro de doble efecto utilizando Pid y Pid-difuso con matlab y labview.», bachelorThesis, 2017. Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14554>
- [11] C. R. V. Miranda, «Ingeniero en electrónica y automatización».
- [12] «sistemas-de-control-automatico-benjamin-c-kuo.pdf».
- [13] «UCLM_Tema5.pdf».
- [14] A. Roca Cusido, *Control Automático de Procesos Industriales*. Madrid: Ediciones Diaz de Santos S.A., 2014.
- [15] I. A. L. Farina, «Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento», 2018.
- [16] «Problemas en motores trifásicos: Tipos, Razones y Soluciones». Accedido: 28 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tecnologiaparalaindustria.com/problemas-y-fallos-en-motores-trifasicos-tipos-razones-y-soluciones/>
- [17] «Qué es un variador de frecuencia», Drives. Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- [18] S. Blog, «¿Qué es un encoder y qué tipos existen?» Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/que-es-encoder-tipos>
- [19] A. Cruz Contreras, E. A. Portilla Flores, y R. Silva Ortigoza, «Multiplicador Electrónico para Encoder Incremental», *Polibits*, vol. 38, pp. 63-67, dic. 2008, doi: 10.17562/PB-38-7.
- [20] J. R. Velasco, «Universidad de Alcalá».
- [21] «What is the difference between mamdani and sugeno in fuzzy logic? - Mathematics Stack Exchange». Accedido: 28 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://math.stackexchange.com/questions/148216/what-is-the-difference-between-mamdani-and-sugeno-in-fuzzy-logic>
- [22] R. S. Vazquez, «Capítulo I Lógica difusa y sistemas de control», Accedido: 28 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en:

- https://www.academia.edu/12346586/Cap%C3%ADtulo_I_L%C3%93GICA_difusa_y_sistemas_de_control
- [23] «Proceso de inferencia difusa - Matlab y Simulink - MathWorks América Latina». Accedido: 28 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html>
- [24] «Matlab - El lenguaje del cálculo técnico». Accedido: 10 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [25] «Técnico.pdf».
- [26] «Controlador programable S7-1200».
- [27] «omron-e6b2-c-series-rotary-encoder-datasheet.pdf».
- [28] J. D. Feijoo, D. J. Chanchay, J. Llanos, y D. Ortiz-Villalba, «Advanced Controllers for Level and Temperature Process Applied to Virtual Festo MPS® PA Workstation», en *2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, Valparaíso, Chile: IEEE, mar. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICAACCA51523.2021.9465269.