



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CONTROL PID
Y DIFUSO EN UNA ESTACIÓN VIRTUAL DE NIVEL”**

Propuesta Tecnológica presentada previo a la obtención del Título de Ingeniero
Eléctrico

AUTORES:
Jhonatan Xavier Chicaiza Mallitasig
Wilinton Ismael Palma Travez

TUTOR:
ING. Jessica Nataly Castillo Fiallos

LATACUNGA – ECUADOR

FEBRERO - 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros: Chicaiza Mallitasig Jhonatan Xavier, con cédula de ciudadanía No. 0504021312 y Palma Travez Wilinton Ismael, con cédula de ciudadanía No. 0504440199 declaramos ser autores de la presente **PROPUESTA TECNOLÓGICA: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CONTROL PID Y DIFUSO EN UNA ESTACIÓN VIRTUAL DE NIVEL”**, siendo la Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos, Tutora del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, febrero del 2025



Jhonatan Xavier Chicaiza Mallitasig
CC: 0504021312



Wilinton Ismael Palma Travez
CC: 0504440199

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutora de la siguiente propuesta tecnológica sobre el título “**ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CONTROL PID Y DIFUSO EN UNA ESTACIÓN VIRTUAL DE NIVEL**”, de los ponentes: **Chicaiza Mallitasig Jhonatan Xavier** y **Palma Travez Wilinton Ismael**, de la Carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho informe cumple con los requerimientos metodológicos y aporte científico técnico suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencia de Ingeniería y Aplicada de la Universidad Técnica de Cotopaxi digne. Para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero 2025



Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos

CC: 0604590216

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Proyecto Tecnológico 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: **Chicaiza Mallitasig Jhonatan Xavier**, con cedula de ciudadanía C.C: **0504021312** y **Palma Travez Wilinton Ismael**, con cedula de ciudadanía C.C: **0504440199**, con el título del Proyecto tecnológico “ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CONTROL PID Y DIFUSO EN UNA ESTACIÓN VIRTUAL DE NIVEL”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Latacunga, febrero 2025

Para constancia firman:



Lector 1 (presidente)

Ing. Salazar Achig Edgar Roberto
CI: 0502847619



Lector 2

Ing. León Segovia Marco Anibal
CI: 0502305402



Lector 3

Ing. León Segovia Manuel Ángel
CI: 0502041353

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres que han sido la mayor motivación, gracias por su apoyo incondicional, amor y confianza en mí. A Dios por darme la sabiduría necesaria para culminar esta etapa de mi vida. Finalmente, un agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

Jhonatan

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con amor y gratitud a mi madre Rosa Mallitasig y a mi padre de corazón Segundo Quimbita, quienes siempre han creído en mí, con su esfuerzo y sacrificio me han ayudado a cumplir este sueño, juntos han sido mi motivación para seguir estudiando y estar cumpliendo esa meta tan anhelada de ser ingeniero eléctrico.

Jhonatan

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme cumplir este objetivo en mi vida, agradezco infinitamente a mis padres quienes han sido el pilar fundamental en mi vida, por su paciencia, esfuerzo y sacrificio, apoyándome siempre en cada decisión y etapa de mi vida, a mi hermano, que siempre me apoyo y creyó en mí, también agradezco a cada uno de mis maestros, compañeros y familiares que en el transcurso de mi vida universitaria me han brindado amistad, consejos y conocimientos, ayudándome a crecer tanto personalmente como académicamente.

Ismael

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mis padres, Luis y Fabiola, a mi hermano, Alan, quienes siempre confiaron en mí y han estado a mi lado dándome ánimos y apoyo incondicional, su paciencia, sacrificio y enseñanzas han sido fundamentales en mi formación, impulsándome a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Gracias a su confianza y motivación, pude superar cada desafío y alcanzar esta meta, llevándolos siempre en mi corazón como mi mayor inspiración.

Ismael

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
<i>AGRADECIMIENTO</i>	v
<i>DEDICATORIA</i>	vi
<i>AGRADECIMIENTO</i>	vii
<i>DEDICATORIA</i>	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	16
1. INFORMACIÓN GENERAL	17
2. INTRODUCCIÓN	18
2.1. Situación problemática.....	18
2.2. Formulación del problema	19
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	19
2.3.1. Objeto de investigación	19
2.3.2. Campo de acción	19
2.4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	19
2.4.1. Beneficiarios directos	19
2.4.2. Beneficiarios indirectos	19
2.5. JUSTIFICACIÓN	19
2.6. OBJETIVOS	20
2.6.1. General.....	20
2.6.2. Específicos.....	20
2.6.3. SISTEMA DE TAREAS	21

3.	MARCO TEÓRICO	22
3.1.	Fundamento histórico.....	22
3.2.	Procesos industriales	22
3.3.	Sistemas de control	23
3.3.1.	Representación de los sistemas de control	24
3.4.	Estrategias de control.....	24
3.4.1.	Control en lazo abierto	24
3.4.2.	Control en lazo cerrado.....	25
3.5.	Controladores.....	26
3.5.1.	Control PID.....	26
3.5.2.	Control Difuso	29
3.6.	Software	33
3.6.1.	TIA Portal	33
3.6.2.	LabVIEW.....	33
3.6.3.	Matlab - Simulink.....	34
3.7.	Modulo HIL	34
3.7.1.	Variables y comportamiento.....	35
3.7.2.	Componentes	35
3.7.3.	Esquema general.....	36
3.8.	Estación virtual de nivel.....	39
3.8.1.	Proceso.....	39
3.9.	Comunicación (OPC SERVERS)	39
4.	METODOS Y PROCEDIMIENTO	40
4.1.	Declaración de las variables.....	41
4.2.	Operaciones de las variables	41
4.3.	Métodos, técnicas e instrumentos	41
4.4.	Recolección de datos y construcción del modelo matemático.....	41

4.4.1.	Prueba en el entorno	42
4.4.2.	Recopilación de datos.....	42
4.4.3.	Gestión de datos.....	43
4.4.4.	Determinación del modelo.....	44
4.4.5.	Validación del modelo.....	46
4.4.6.	Parámetros de sintonización	46
4.5.	Estructura de comunicación.....	49
4.5.1.	Comunicación entre la planta y el software.....	49
4.5.2.	Programación de las señales analógicas de entrada y salida en el PLC	49
4.5.3.	Configuración NI OPC Servers	51
4.5.4.	Configuración OPC en KEEPServerEX.....	51
4.5.5.	Configuración OPC en Simulink.....	52
4.5.6.	Desarrollo del control PID.....	54
4.5.7.	Desarrollo del control Difuso	55
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	58
5.1.	Simulación de los controladores	58
5.1.1.	Simulación del control PID	59
5.1.2.	Simulación del control difuso.....	60
5.2.	Comparación de los controladores.....	60
5.2.1.	Controlador PID vs controlador Difuso.....	60
5.2.2.	Parámetros de los controladores	61
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
6.1.	Conclusiones	63
6.2.	Recomendaciones	63
7.	REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Puerta de Herón.....	22
Figura 3.2. Componentes básicos de un sistema de control.	24
Figura 3.3. Sistema de control de lazo abierto.	25
Figura 3.4. Sistema de control de lazo cerrado.....	25
Figura 3.5. Lazo de control difuso.....	29
Figura 3.6. Funciones características comunes.	31
Figura 3.7. Módulo HIL para la planta de nivel.	35
Figura 3.8. Diagrama general del módulo HIL de la planta de nivel	37
Figura 3.9. Entorno gráfico.....	39
Figura 4.1. Lógica para la obtención del modelo matemático.....	42
Figura 4.2. Entorno virtual con las condiciones para las pruebas.	42
Figura 4.3. Variables de proceso del módulo HIL de la planta de nivel.	43
Figura 4.4. Modelado de la función de transferencia del sistema usando la función “systemIdentification” de Matlab.....	45
Figura 4.5. Estimación de la función de transferencia.	45
Figura 4.6. Estimación y porcentaje de aceptación de la función de transferencia.	46
Figura 4.7. Estructura de comunicación entre el software diseñado y la planta.....	49
Figura 4.8. Bloques de normalización y escalado.	50
Figura 4.9. Canal de comunicación con LabVIEW.....	51
Figura 4.10. Ventana de la interfaz de KEPServerEX.	52
Figura 4.11. OPC Toolbox.	52
Figura 4.12. Configuración del bloque OPC Configuration.....	53
Figura 4.13. Configuración del bloque OPC Read.....	53
Figura 4.14. Canal y tags del OPC.	54
Figura 4.15. Bloque del controlador PID y bloque de ganancia.....	54
Figura 4.16. Panel frontal del controlador PID realizado en LabVIEW.	55
Figura 4.17. Estructura para la implementación de un controlador difuso con comunicación OPC.	55
Figura 4.18. Entradas y salidas del controlador difuso.....	56
Figura 4.19. Funciones de membresía del controlador difuso.....	57
Figura 4.20. Configuración de las reglas del controlador difuso.....	58
Figura 5.1. Comportamiento del controlador PID ante la variación del set point.	59

Figura 5.2. Comportamiento del controlador difuso ante la variación del set point.	60
Figura 5.3. Comparación del controlador PID vs el controlador Difuso.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de tareas en base a los objetivos específicos.....	21
Tabla 2. Función de transferencia con cada modo de acción del controlador PID.	29
Tabla 3. Variables independientes y dependientes.....	41
Tabla 4. Métodos, técnicas e instrumentos.....	41
Tabla 5. Métodos de sintonización para un control PID de un proceso integrante[25].	47
Tabla 6. Sintonización del Controlador PID.	49
Tabla 7. Normalización y escalado de las entradas y salida analógica.	50
Tabla 8. Parámetros de sintonización del controlador PID.	59
Tabla 9. Resumen del comportamiento del control PID y Difuso.....	62

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CONTROL PID Y DIFUSO EN UNA ESTACIÓN VIRTUAL DE NIVEL”

Autores:

Chicaiza Mallitasig Jhonatan Xavier

Palma Travez Wilinton Ismael

RESUMEN

El control de procesos es fundamental en la mayoría de las industrias, donde la prioridad es garantizar un funcionamiento adecuado y seguro, es por ello que el controlador PID es ampliamente utilizado por su facilidad de implementación. Como alternativa, el controlador difuso puede adaptarse a variaciones sin requerir un modelo matemático exacto, aunque su diseño demanda un análisis detallado de las funciones de membresía y reglas. Se implementaron los controladores en un entorno virtual mediante MATLAB/Simulink con un enfoque en el control de nivel. Este estudio permitió comparar el comportamiento de los mismos, ante cambios en el set point considerando criterios cuantitativos que incluyen el tiempo de estabilización y el sobreimpulso. Los resultados muestran que, mediante pruebas simuladas en la estación virtual de nivel, el controlador difuso presenta tiempos de estabilización menores en la mayoría de los casos, excepto cuando el set point es de 30 cm, donde alcanza la estabilidad en 51.532 s, mientras que el PID lo hace en 49.774 s. Por otro lado, con un set point de 50 cm el tiempo de retardo es de 1.535 s para el controlador PID y 2.270 s para el controlador difuso. Estos resultados indican que el método clásico destaca por su menor retardo, simplicidad y fácil implementación en cualquier sistema, y el enfoque basado en lógica difusa proporciona una mejor respuesta de estabilización.

Palabras clave: DIFUSO, CONTROLADOR, PID, MATLAB, NIVEL

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TITLE: “COMPARATIVE ANALYSIS OF PID AND FUZZY CONTROL IN A
VIRTUAL LEVEL STATION”**

Authors:

Chicaiza Mallitasig Jhonatan Xavier

Palma Travez Wilinton Ismael

ABSTRACT

Process control is fundamental in most industries, where the priority is to ensure proper and safe operation, which is why the PID controller is widely used for its ease of implementation. Alternatively, the fuzzy controller can be adapted to variations without requiring an exact mathematical model, although its design demands a detailed analysis of the membership functions and rules. The controllers were implemented in a virtual environment using MATLAB/Simulink with a focus on level control. This study allowed to compare the controllers behavior at the set point changes presence considering quantitative criteria including settling time and overshoot. The results show that, by means of simulated tests in the virtual level station, the fuzzy controller presents shorter stabilization times in most cases, except when the set point is 30 cm, where it reaches stability in 51.532 s, while the PID does it in 49.774 s. On the other hand, with a set point of 50 cm the delay time is 1.535 s for the PID controller and 2.270 s for the fuzzy controller. These results show the classical method stands out for its lower delay, simplicity and easy implementation in any system and the fuzzy logic based approach provides a better stabilization response

Keywords: FUZZY, CONTROLLER, PID, MATLAB, LEVEL

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés de la propuesta tecnológica cuyo título versa: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CONTROL PID Y DIFUSO EN UNA ESTACIÓN VIRTUAL DE NIVEL”** presentado por **Chicaiza Mallitasig Jhonatan Xavier** y **Palma Travez Wilinton Ismael**, egresados de la carrera de **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 13 de febrero del 2025

Atentamente,



Mg. Lidia Rebeca Yugla Lema.
DOCENTE DEL CENTRO DE IDIOMAS-UTC
0502652340



1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CONTROL PID Y DIFUSO EN UNA ESTACIÓN VIRTUAL DE NIVEL.

Fecha de inicio:

Octubre 2024

Fecha de finalización:

Febrero 2025

Lugar de ejecución:

Laboratorios de automatización - Universidad Técnica de Cotopaxi - Provincia de Cotopaxi.

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia:

Carrera de Ingeniería en Electricidad

Tutor de titulación:

Ing. Jessica Castillo Fiallos MSc.

Estudiante/s:

Chicaiza Mallitasig Jhonatan Xavier

Palma Travez Wilinton Ismael

Área de Conocimiento:

07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación:

Tecnología de la información y las comunicaciones, robótica, automatización y optimización de sistemas.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Sublínea 1:

Control y optimización en el uso de la energía del sector industrial, comercial y residencial.

2. INTRODUCCIÓN

El control de procesos es un componente esencial en la mayoría de las industrias, donde la prioridad es mejorar la parte operativa, además de asegurar la estabilidad y fiabilidad de los sistemas. Los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y los sistemas de control difuso son dos de las estrategias más empleadas[1]. Esta investigación se enfoca en comparar estos dos tipos de controladores aplicados a un proceso simulado de control de nivel, con el propósito de analizar su nivel de respuesta bajo diferentes perturbaciones.

El control PID es el controlador más usado debido a su fácil implementación y buenos resultados, pero presenta ciertas limitaciones cuando se enfrenta a sistemas no lineales o dinámicas complejas dentro del proceso[2]. Por su parte, el control difuso ha cobrado relevancia debido a su habilidad para gestionar incertidumbres y abordar sistemas con lógica no lineal, lo que le permite ofrecer respuestas más flexibles y adaptativas frente a condiciones variables[3].

En la investigación se analizarán las ventajas y desventajas de cada tipo de controlador mediante un análisis cuantitativo, para determinar cuál es más adecuado en un sistema de control de nivel. Para ello, se llevaron a cabo simulaciones en un entorno virtual, enfocándose en parámetros como el tiempo de estabilización, el sobreimpulso y la estabilidad general del sistema.

Con ello se busca aportar conocimientos sobre el comportamiento de cada tipo de controlador, para que su elección, ya sea en prácticas, simulaciones o procesos industriales, sea la más adecuada.

2.1.Situación problemática

El control de nivel es utilizado en múltiples aplicaciones industriales, ya sea en tanques de almacenamiento, procesos químicos o sistemas de tratamiento de agua. Garantizar que el nivel de líquido se mantenga dentro del rango adecuado según sea el caso es indispensable para evitar insuficiencias o desbordamientos que podrían comprometer tanto la operación como la seguridad. Es importante mencionar que estos sistemas suelen enfrentar desafíos debido a la influencia de diferentes tipos de perturbaciones, haciendo que el diseño del controlador sea determinante.

Si bien el control PID es una de las estrategias más usadas por su fácil implementación y buenos resultados, presenta ciertas limitaciones cuando se enfrenta a dinámicas no lineales. Como otra alternativa está el control difuso. Este ofrece mayor adaptabilidad y robustez, pero su

implementación puede resultar más compleja y menos accesible, es por ello que es necesario realizar un análisis comparativo de los dos enfoques para determinar cuál presenta una mayor eficacia en términos de precisión y capacidad de adaptación a las variaciones del proceso.

2.2. Formulación del problema

La necesidad de mejorar la respuesta en sistemas de control para procesos de nivel, exige la selección de la estrategia más adecuada entre el controlador PID y el controlador difuso, lo que requiere una evaluación y comparación detallada de su desempeño.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de investigación

Sistema de control PID y difuso.

2.3.2. Campo de acción

Control de procesos en laboratorios de automatización de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

2.4.1. Beneficiarios directos

Usuarios de los laboratorios de automatización

2.4.2. Beneficiarios indirectos

Universidad Técnica de Cotopaxi

2.5. JUSTIFICACIÓN

En ingeniería, el control de procesos es un área fundamental, ya que hay industrias donde el manejo de variables debe ser exacto, como por ejemplo el control de nivel, por lo tanto, es importante elegir el método de control más adecuado para asegurar la estabilidad y precisión de los procesos.

El control PID es ampliamente empleado debido a su sencilla implementación y buenos resultados, presenta ciertas limitaciones cuando se enfrenta a dinámicas no lineales, pero como otra alternativa está el control difuso, promete una mayor adaptabilidad y robustez, pero existe la limitante de que estos dos controladores han sido comparados de manera limitada.

Esta investigación reside en la necesidad de identificar el método de control más apropiado para mejorar la respuesta de los procesos. Mediante un análisis comparativo del controlador PID y Difuso, se busca ofrecer orientación práctica tanto a ingenieros como a estudiantes que se enfrentan a sistemas dinámicos complejos y no lineales.

Los resultados obtenidos servirán como punto de partida para futuras investigaciones y aplicaciones de sistemas de control más eficaces y adaptables, lo cual repercute positivamente en diversos sectores industriales y académicos.

2.6.OBJETIVOS

2.6.1. General

Desarrollar un estudio comparativo entre un control PID y un control difuso aplicado a una estación virtual de nivel para el estudio de los parámetros de comportamiento de cada uno.

2.6.2. Específicos

- Investigar fundamentos, principios básicos, y estrategias utilizadas en el control PID y difuso en fuentes bibliográficas.
- Analizar el comportamiento entre el controlador PID vs Difuso frente a diferentes puntos de ajuste.
- Comparar los resultados conseguidos en el control de la variable de nivel para la selección del controlador.

2.6.3. SISTEMA DE TAREAS

Tabla 1. Sistema de tareas en base a los objetivos específicos.

Objetivos Específicos	Actividades/Tareas	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar fundamentos, principios básicos, y estrategias utilizadas en el control PID y control difuso en fuentes bibliográficas.	Investigación bibliográfica en libros, artículos académicos y recursos en línea sobre el control PID y el control difuso.	Recopilación de información verídica como base para la fundamentación teórica.	Revisión bibliográfica y documental.
	Búsqueda de información detallada sobre los controladores en fuentes confiables.	Funcionamiento, características, comportamiento y formulación matemática.	Acceso a bibliotecas digitales.
Analizar el comportamiento del control PID y el control difuso frente a diferentes puntos de ajuste.	Configuración y ajustes de los parámetros del PID.	El controlador deberá funcionar sin inconveniente alguno para poder analizarlo.	Software de simulación.
	Diseño y configuración de las reglas y funciones de membresía para el controlador difuso.	Pruebas del control, asegurando que esté implementado y configurado correctamente.	Pruebas con diferentes variantes para su análisis.
Comparar los resultados obtenidos en el control de la variable de nivel para la selección del mejor controlador.	Verificar que todos los equipos necesarios estén disponibles y en condiciones de operación para el control.	Comunicación exitosa del sistema para cada controlador, para su respectivo análisis.	Programación de los controladores PID y difuso.
	Generar gráficas y tablas comparativas para visualizar los resultados.	Interpretación y comparación de los resultados para cada controlador.	Análisis estadístico, representación gráfica, tablas en Excel, herramientas de software para comparación de datos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Fundamento histórico

En la antigüedad ya existían sistemas de control, un ejemplo de uno de ellos fue el dispositivo creado por Herón para abrir y cerrar las puertas en el siglo primero como se puede observar en la figura 3.1. Su funcionamiento se basaba en que una señal de comando, la de encender fuego, hacía que este calor cause la expansión del aire, lo que a su vez desplazaba el agua desde un tanque hacia una cuba, el aumento de peso en esta provocaba su descenso, en donde mediante una cuerda se abría la puerta del altar al levantar un contrapeso, y para cerrar la puerta bastaba con apagar o solo reducir la intensidad del fuego, el aire se enfriaba y bajaba su presión haciendo que el agua regrese por un sifón, haciendo que la cuba se aligere y el contrapeso como era mayor cerrara la puerta, este mecanismo funcionaba únicamente si la cuba estaba a una altura superior a la del depósito de agua[4].

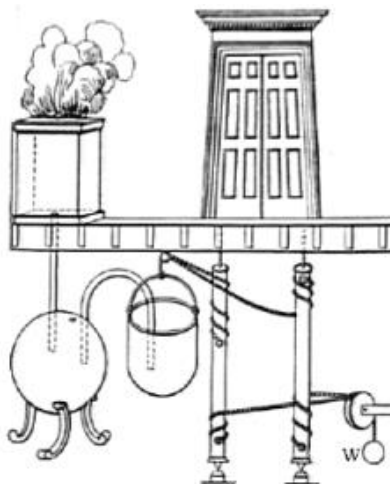


Figura 3.1. Puerta de Herón.

3.2. Procesos industriales

Los sistemas simples de control para procesos industriales han existido desde hace tiempo atrás, un ejemplo son las poleas además de otros mecanismos destinados a aumentar la eficiencia y la producción, aunque en su mayoría eran procesos manuales o que requerían la intervención de una persona, pero una vez aparecieron los sistemas de control distribuido (DCS) se lograron automatizar procesos más complejos, es decir ya no requerían acción humana constante.

El control distribuido trajo desarrollos importantes en la parte de automatización industrial, como la interconexión con otros dispositivos informáticos, la conexión en red de batidores de control, la implementación de interbloques y bucles en cascada, entre otros, además, permitió

la introducción del registro automático de eventos e incidencias, eliminando así la necesidad de registros físicos.

En las últimas décadas, un avance tecnológico e informático significativo ha transformado por completo los sistemas de control industrial, entre algunos de los más destacados están, la primera máquina gestionada por un ordenador a través de un sistema de cableado, los sistemas modulares de control utilizados para automatizar procesos en ensamblajes, y la primera computadora con un disco duro incorporado en su diseño, además, cabe mencionar que el controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), un sistema de control muy antiguo, se utiliza de manera extendida en la industria para regular variables en sistemas automatizados, estos reguladores ofrecen una solución eficaz para la gestión de procesos [5].

3.3.Sistemas de control

Los sistemas de control están presentes en una amplia variedad de sectores industriales, incluyendo el control de calidad en productos fabricados, las líneas de ensamblaje automatizadas, la operación de máquinas-herramienta, la tecnología espacial, el control computarizado, los sistemas de transporte, robótica, entre muchos otros, además, la teoría del control automático permite analizar el manejo de inventarios y algunos aspectos de los sistemas económicos y sociales[6].

El estudio de los sistemas de control incluye técnicas para modelar sistemas físicos y el dominio de herramientas matemáticas e informáticas necesarias para su análisis y elaboración de técnicas de diseño de control, su aplicación asegura el correcto funcionamiento del sistema a manipular, existen tres componentes básicos que pueden describir un sistema de control:

- Objetivos
- Elementos del sistema de control
- Resultados

Los objetivos de control se determinan a partir de las señales de entrada, mientras que los efectos se manifiestan como salidas o variables gestionadas. La finalidad de un sistema de control es regular las salidas de acuerdo con un patrón predefinido mediante las entradas, utilizando los elementos del sistema de control.

Los objetivos de control se pueden nombrar como entradas, señales de acción u objetivos, en cambio los resultados serán las salidas o las variables controladas, en la figura 3.2 se representa el esquema básico de un sistema de control, la finalidad de este es poder regular las salidas de manera determinada a través de las entradas, usando componentes que lo conforman[7].



Figura 3.2. Componentes básicos de un sistema de control.

3.3.1. Representación de los sistemas de control

Con el fin de hacer más fácil el análisis de los sistemas de control, estos se representan mediante diagramas de bloques, para visualizar las relaciones entre los componentes del sistema y las señales involucradas, incluye como componentes principales:

- Proceso: acción que se busca gestionar o regular.
- Controlador: origina la señal de control, usando la señal de error como entrada de referencia.
- Bloque de retroalimentación: convertidor de escalas y unidades, permitiendo calcular el valor de la magnitud de salida, que luego se envía para su comparación con la de entrada.
- Señal de control: producida por el controlador que dirige el funcionamiento del sistema.
- Señal de salida: variable regulada o salida generada del proceso de control.
- Señal de referencia (set point): señal de referencia.
- Señal de error: representa la diferencia entre la señal de referencia y la de retroalimentación.
- Señal de retroalimentación: captada por el sensor, se compara con la referencia para generar la señal de error.

3.4. Estrategias de control

3.4.1. Control en lazo abierto

Conocidos también como sistemas sin realimentación, se distinguen por una acción de control que no depende de la salida. Sus componentes principales se dividen en dos partes: el controlador y el proceso controlado, tal como se ilustra en la figura 3.3.

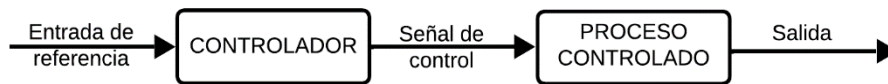


Figura 3.3. Sistema de control de lazo abierto.

En el sistema de control de lazo abierto la señal de salida no se compara con la entrada de referencia, por ello, a cada referencia le pertenece una condición operativa fija, como consecuencia la precisión de respuesta depende de la calibración, también es importante mencionar que este tipo de control es altamente resistente a perturbaciones, lo que quiere decir que este tipo de control solo es útil cuando se asegure que no hay perturbaciones que afecten al sistema [8].

3.4.2. Control en lazo cerrado

Estos sistemas son realimentados y se caracterizan porque cuentan con una o más trayectorias de retroalimentación desde la salida hacia la entrada, como se indica en la figura 3.4, haciendo así que el sistema sea más adaptable y más exacto, ya que la señal controlada se realimenta y se compara con la referencia, se genera una señal de actuación proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida, la cual se envía al sistema para corregir el error [9].

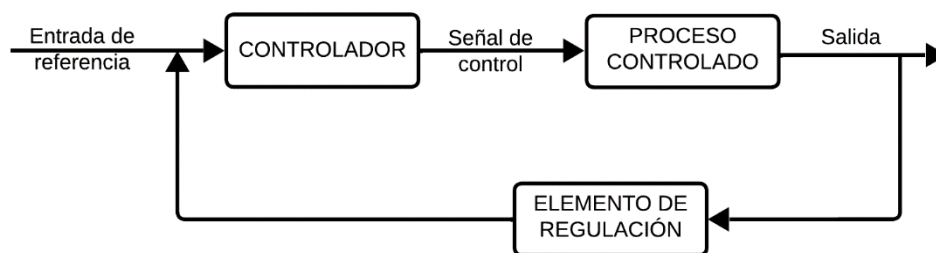


Figura 3.4. Sistema de control de lazo cerrado.

En estos sistemas, uno de los componentes principales es el controlador, el cual procesa tanto la señal de entrada como la señal de retroalimentación para calcular la señal de control necesaria para que la salida permanezca en el valor deseado, el proceso controlado es el sistema físico, ya sea un sistema de calefacción o un motor, ahora el elemento de regulación es el encargado de medir la variable de salida convirtiéndola en una señal eléctrica o digital para que pueda ser procesada por el controlador realimentando el sistema [10].

Básicamente el funcionamiento de este sistema consta primero de establecer la referencia o set point, este puede ser nivel, velocidad o temperatura, luego se mide la variable controlada para compararla con el valor deseado y, a partir de esta comparación se genera la señal de control.

Este ciclo se repite continuamente en tiempo real, actualizando constantemente la configuración para asegurar la precisión del sistema.

3.5. Controladores

3.5.1. Control PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es el controlador más utilizado en toda la industria, debido a que su estructura es sencilla, permitiendo un entendimiento fácil y sencillo comparado con otras opciones de controladores. Su estructura se basa en que, el controlador PID es un controlador proporcional que contiene la acción derivativa y la acción integral simultáneamente superpuestas[11].

Control Proporcional (P)

Este control opera a partir de la ganancia aplicada al sistema, se basa en que la respuesta del controlador debe ser directamente proporcional al tamaño del error, sin embargo, no tiene la capacidad de corregir ni eliminar perturbaciones, aunque puede disminuir o amplificar la señal de error.

Control Integral (I)

Este tipo de controlador se encarga de eliminar errores y ajustar perturbaciones, su funcionamiento se basa en localizar la señal de referencia, aunque requiere un período de tiempo para identificarla y adaptarse a ella.

Control Derivativo (D)

El controlador derivativo no se lo suele utilizar de manera independiente, este requiere combinarse con los controladores proporcionales e integrales, ya que su función principal es proporcionar velocidad o a la acción de control, además, requiere de un intervalo de tiempo para alcanzar la señal de referencia[12].

3.5.1.1. Ecuaciones del control PID

Una vez visto que el control PID combina las tres operaciones fundamentales, proporcional, integral y derivativa, se tienen ecuaciones que van a ayudar al modelamiento del controlador,

la acción proporcional produce una salida que está directamente relacionada con la magnitud del error como se indica en la ecuación 3.1.

$$u(t) = kp \cdot e(t) \quad (3.1)$$

kp = Constante proporcional ajustable.

$e(t)$ = Error en función del tiempo.

$u(t)$ = Señal de control con un tiempo t

La acción integral genera una salida que depende del error acumulado en el transcurso del tiempo, contribuyendo a la estabilización del sistema como se indica en la ecuación 3.2.

$$u(t) = ki \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

ki = Constante integral ajustable.

La acción derivativa es el componente del control PID encargado de anticipar posibles errores, ayudando así a estabilizar la salida del controlador, quedando entonces como se muestra en la ecuación 3.3.

$$u(t) = kd \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

kd = Constante derivativa ajustable.

Al combinar estas acciones, se aprovecha al máximo cada tipo de control individualmente, la ecuación 3.4 indica el resultante del controlador.

$$u(t) = kp \cdot e(t) + ki \int_0^t e(t) dt + kd \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

En resumen, la acción proporcional (kp) disminuye el tiempo de subida, pero perciste cierto error en estado estacionario, la acción integral (ki) corrige el error, aunque puede deteriorar la respuesta transitoria, y finalmente la acción derivativa (kd) aumenta la estabilidad del sistema, minimiza el sobreimpulso y mejora la respuesta[13].

3.5.1.2.Aplicaciones

El control PID encuentra múltiples aplicaciones en sectores industriales debido a su capacidad para regular ciertas variables, esenciales para garantizar el rendimiento y la protección de los procesos. Entre las más relevantes se encuentran:

Control de presión: En calderas, gasoductos y sistemas neumáticos, ajusta la presión en los sistemas para evitar fugas y posibles fallos, y en ciertos casos ayuda a asegurar un suministro constante de gas.

Control de velocidad: En motores y cintas transportadoras, ya que se necesita un funcionamiento continuo y un control de velocidad exacto.

Control de nivel: En tanques, depósitos y obras hidráulicas, es necesario tener un control preciso del nivel para que el proceso no se interrumpa o se desborde.

3.5.1.3.Limitaciones

El ajuste del control PID puede ser complejo y demandar tiempo, ya que determinar la acción proporcional, integral y derivativa (k_p , k_i , k_d) no siempre es sencillo, ya que es necesario encontrar un balance entre respuesta rápida y estabilidad. Además, su rendimiento se ve limitado en sistemas altamente no lineales disminuyendo su nivel de respuesta.

La estabilidad no está garantizada en todos los casos, una de las razones para esta limitación incluye un ajuste incorrecto de los parámetros K_p , K_i y K_d , ya que pueden generar oscilaciones indeseadas, otra de las razones es la presencia de retardos significativos en el sistema, lo que puede resultar en sobreoscilaciones o incluso inestabilidad total, influyen también las condiciones cambiantes en el entorno o en el sistema, ya que requieren ajustes continuos en los parámetros, algo que no siempre es posible realizar en tiempo real[14].

Su sensibilidad al ruido es otra de sus limitaciones, ya que la acción derivativa tiende a amplificar las fluctuaciones de esta señal resultando en respuestas erráticas del sistema. En entornos industriales, donde el ruido es común, este comportamiento oscilatorio puede intensificarse, llevando a una inestabilidad que dificulta la respuesta adecuada a los cambios requeridos en el proceso.

3.5.1.4. Funciones de transferencia

En la parte práctica, el ingeniero tiene la libertad de utilizar los tres elementos funcionales del controlador (PID), pero para ello, es necesario conocer el comportamiento del sistema para obtener el modelo matemático, y para identificarlo es necesario primero considerar la combinación más apropiada a emplear, en la tabla 2 se presentan las diferentes combinaciones con su respectiva función de transferencia.

Tabla 2. Función de transferencia con cada modo de acción del controlador PID.

Modo de Acción	Elemento(s) utilizado(s)	Función de Transferencia
Proporcional (P)	Solo P	$C(s) = K_p$
Integral (I)	Solo I	$C(s) = \frac{K_p}{s}$
Proporcional - Integral (PI)	Elemento P e I	$C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_I s})$
Proporcional - Derivativo (PD)	Elemento P y D	$C(s) = K_p\{1 + T_D D(s)\}$
Proporcional - Integral - Derivativo (PID)	Los tres elementos	$C(s) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D D(s) \right\}$

3.5.2. Control Difuso

El control difuso se describe de manera más efectiva como un método basado en términos lingüísticos en lugar de valores numéricos específicos. No obstante, las variables de los procesos se miden en términos numéricos y no en sentido común. Por ello, es necesario realizar una conversión previa antes de ingresar el estado de la variable al controlador, este proceso se denomina fusificación, la figura 3.5 indica las diferentes fases de transformación de un controlador difuso.

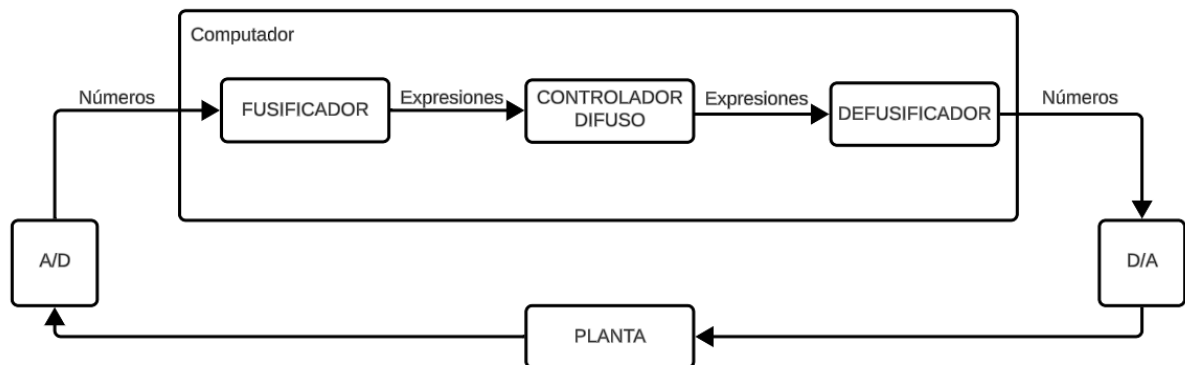


Figura 3.5. Lazo de control difuso.

La fusificación es un proceso mediante el cual se asigna a los datos de entrada un nivel de pertenencia a distintas categorías predefinidas, permitiendo así establecer una conexión entre el

estado de las variables y sus respectivas funciones de membresía. Para un valor determinado, su grado de pertenencia será más alto en una categoría que en las demás. Una vez que las variables han sido representadas en términos lingüísticos, se pueden generar relaciones lógicas entre ellas. Estas relaciones, fundamentadas en principios intuitivos, facilitan la producción de una respuesta adecuada en lenguaje simbólico. Finalmente, dicha respuesta es convertida en un valor numérico a través del proceso de defusificación, lo que permite su transformación en una señal que puede ser interpretada y aplicada por el sistema [15].

3.5.2.1. Conjuntos difusos y funciones características

Los conjuntos difusos representan una extensión de los conjuntos tradicionales, los cuales únicamente determinan si un elemento pertenece o no a un conjunto específico. Los conjuntos difusos permiten una pertenencia parcial, lo que significa que un elemento puede tener un grado de pertenencia que varía en un rango continuo entre 0 y 1, este nivel de pertenencia es definido a través de una función característica asociada al conjunto difuso, la cual establece la relación entre el elemento y el conjunto de manera más flexible y gradual.

Es decir, la función de membresía $U_A(a)$ de un conjunto difuso A es una función de rango $[0,1]$, en la ecuación 3.5 se indica la representación matemática.

$$U_A(a): U \subseteq \mathfrak{R} \rightarrow [0,1] \quad (3.5)$$

Si U representa el conjunto de los valores de edad humana (ejemplo, de 0 a 100 años), y A define el concepto de "juventud", entendido como un estado intermedio entre "infancia" y "adulthood". En este contexto, U pertenece al conjunto de los números reales [16].

La función característica sirve para medir cuan similar es un elemento del conjunto U con respecto a un conjunto difuso. La elección se basa en el enfoque adoptado para resolver el problema. Entre las funciones características más comunes se encuentran, la triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, entre otras, en la figura 3.6 se representan gráficamente algunas de estas funciones.

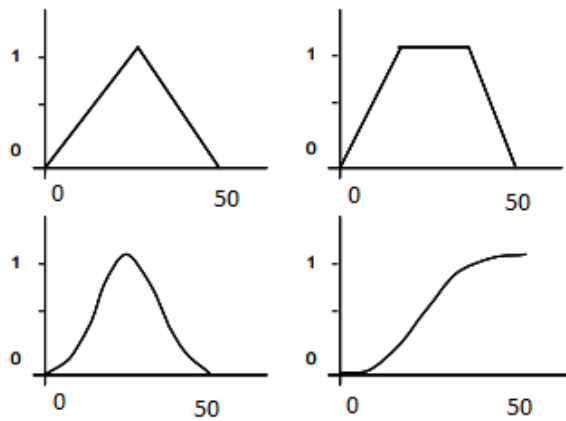


Figura 3.6. Funciones características comunes[17].

Existen dos enfoques principales para definir la función característica asociada a un conjunto, el primero se basa en el conocimiento experto, mientras que el segundo utiliza un conjunto de datos para diseñarla. Cabe destacar que la función característica debe cumplir con una condición fundamental, los valores que adopte deben estar comprendidos entre 0 y 1.

3.5.2.2. Inferencia y reglas difusas

Las reglas encapsulan tanto el conocimiento como la metodología de control, sin embargo, al asignar valores específicos a las variables de entrada, se requiere aplicar un proceso de inferencia difusa para determinar las salidas correspondientes, esto implica que se genere un conjunto difuso como resultado, el cual, al combinarse con los resultados de otras reglas, da lugar a la salida del sistema.

Existen diversos tipos de reglas difusas, destacándose dos tipos de reglas más utilizadas, estas son las reglas de Mamdani y las de TS (Takagi-Sugeno), estas comparten una estructura similar, aplicable ya sea en controladores como en modelos, únicamente varían las variables que se implementan.

Reglas difusas de Mamdani

Este método fue propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975 y se basa en una serie de reglas “SI-ENTONCES”, utiliza valores de entrada y aplicado con los antecedentes de las reglas, el análisis del cómo tiene que responder el sistema es preciso, es un método intuitivo y con amplia aceptación, su formulación es:

$$\text{Si } x_1 \text{ es } A \text{ y } x_2 \text{ es } B \text{ y } x_3 \text{ es } C, \text{ entonces } u_1 \text{ es } D, u_2 \text{ es } E$$

En donde x_1 , x_2 , x_3 representan las variables de entrada como el error, la derivada del error y la segunda derivada del error. Las funciones de membresía de entrada A, B y C corresponden a categorías como alto, medio y bajo, u_1 , y u_2 son las acciones de control como la apertura de válvulas, que en esta etapa siguen siendo variables lingüísticas y aún no se han convertido en valores numéricos, finalmente D y E son las funciones de membresía de la salida, en esta estructura, la sección antes del "entonces" se denomina antecedente, mientras que la parte posterior constituye el consecuente [18].

Reglas difusas de Takagi-Sugeno

Como otra opción al método de Mamdani, Takagi y Sugeno implementan este método parecido al de Mamdani, que en vez de que sea un conjunto difuso esta expresado en forma de una función lineal, es computacionalmente más eficiente, asegura una transición suave en la superficie de control y es adecuado para el análisis matemático, su formulación es:

$$\text{Si } x_1 \text{ es A y } x_2 \text{ es B y } x_3 \text{ es C, entonces } u_1=f(x_1, x_2, x_3), u_2=g(x_1, x_2, x_3)$$

Inicialmente es viable utilizar $f(x)$ y $g(x)$ como funciones no lineales, sin embargo, seleccionar dichas funciones puede resultar bastante complicado, es por ello que generalmente se opta por funciones lineales.

3.5.2.3. Aplicaciones y limitaciones

El control de lógica difusa ha encontrado aplicaciones en una amplia variedad de campos gracias a su capacidad para gestionar sistemas complejos y no lineales, en ingeniería, se utiliza principalmente en el control de procesos industriales, sin embargo, al operar con variables lingüísticas, su aplicación se extiende a otras áreas, como diagnósticos médicos, análisis de riesgos y en el ámbito financiero.

Aunque es una herramienta eficaz, el control de lógica difusa tiene ciertas limitaciones que deben considerarse, una de ellas es que se requiere una gran cantidad de conocimiento y pruebas experimentales, además, los controladores difusos pueden volverse complejos y poco eficientes si el número de reglas es demasiado alto, lo que puede aumentar los tiempos de procesamiento.

Si bien los sistemas difusos son excelentes para manejar la incertidumbre, no siempre ofrecen precisión en comparación con modelos matemáticos bien definidos, esto puede ser un inconveniente en aplicaciones que exigen resultados extremadamente exactos.

3.6. Software

3.6.1. TIA Portal

El entorno TIA Portal (Totally Integrated Automation) es un software que salió al mercado en el 2009, a partir de ahí se han ido mejorando e implementando más funciones, a día de hoy está disponible la versión 19 presentada a finales de 2023, cabe mencionar que el entorno de trabajo sigue siendo el mismo [19].

Es un software de ingeniería desarrollado por SIEMENS, permite realizar la configuración, programación y parametrización de ciertos dispositivos (PLCs, sistemas SCADA, HMI, variadores de frecuencia, entre otros). Diseñado con el fin de sofisticar los procesos en entornos industriales gracias a su interfaz intuitiva y herramientas avanzadas, permite maximizar la eficiencia, a partir de la planificación hasta la operación y mantenimiento.

Gracias a su interfaz intuitiva hay una serie de pasos clave para programar en el software:

1. Iniciar un proyecto nuevo.
2. Definir la configuración del hardware.
3. Establecer la conexión con los dispositivos.
4. Desarrollo de la programación del controlador.
5. Realizar ajustes de visualización.
6. Carga de datos.
7. Uso de herramientas de diagnóstico y funciones en línea.

Es un software donde existe una gestión conjunta de los datos, facilitando el manejo unificado de programas, configuraciones y visualizaciones, la carga de datos se realiza de manera sencilla, y además el diagnóstico es asistido mediante gráficos.

3.6.2. LabVIEW

El entorno LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un software que, si bien es un entorno de programación, a su vez también es un lenguaje de programación, fue desarrollado por la empresa National Instruments fundada en Texas, se lanzó al mercado en 1986 para los ordenadores de esa época, pero el software estaría disponible para Windows en septiembre de 1992 [20].

Es un entorno de programación de datos, este permite el procesamiento de datos analógicos y digitales, su punto fuerte es que su lenguaje de programación es gráfico, cuenta con una extensa biblioteca con funciones matemáticas y estadísticas, por ello es importante mencionar que debido a su capacidad de procesamiento y memoria se necesita un computador en condiciones para ejecutarlo sin problema alguno.

Al ser un software versátil y de enfoque visual, este puede adaptarse a innumerables industrias, buscando mejorar los procesos, además de desarrollar sistemas innovadores en el campo de la ingeniería y la tecnología.

3.6.3. Matlab - Simulink

Matlab es un entorno de programación muy utilizado en ingeniería para el análisis de datos y desarrollo de algoritmos, destaca porque su capacidad de programación es avanzada y por su nivel de procesar problemas complejos, su entorno permite visualizar datos y generar gráficos de alta calidad para el análisis de los mismos.

Simulink es una toolbox (caja de herramientas de Matlab), utilizada para el modelamiento, simulación y análisis de sistemas dinámicos, permite simular tanto sistemas lineales y no lineales, ya sea o no en tiempo continuo. También cuenta con una interfaz gráfico muy sencillo, una librería extensa de datos, operadores, sistemas, entre otros [21].

Cuenta con un entorno gráfico de modelado, el cual hace más fácil el diseño de sistemas y algoritmos, posee la capacidad de realizar simulaciones en tiempo real, lo cual es fundamental para el control y el tratamiento de señales.

Su gran aplicación en la industria en los sistemas de control se debe a su gran capacidad de modelado y simulación, entre sus aplicaciones se encuentran, la creación de modelos avanzados de lógica y control como controladores PID, la simulación de procesos industriales para mejorar su diseño e implementación, y el empleo de herramientas para ajustar parámetros del sistema con el objetivo de mejorar su desempeño.

3.7. Modulo HIL

Las pruebas de hardware en el lazo HIL (hardware in the loop) consisten en vincular algún controlador a un sistema de simulación que recrea el comportamiento de cierto proceso en un entorno similar a la realidad. Esto permite llevar a cabo pruebas de ajuste y diseño con los

dispositivos como si estuviesen funcionando en el campo e interactuando con otros componentes del proceso, haciendo posible analizar diferentes situaciones para probar el controlador y el proceso, sin asumir costos y el tiempo que implican las pruebas [22].

3.7.1. Variables y comportamiento

En un entorno gráfico, los datos utilizados para operar o analizar se denominan variables, las cuales pueden clasificarse en distintas categorías. En este caso, se trabajará con tres tipos principales, un set point o punto de referencia (SP), una señal de proceso (PV) y una señal de control (CV).

El proceso modela el comportamiento de un flujo de nivel en función de un punto de ajuste específico, analizando su respuesta ante variaciones y perturbaciones en las condiciones del entorno.

3.7.2. Componentes

En el módulo que se indica en la figura 3.7 se pueden observar las señales utilizadas para un control de nivel como: SP, PV, CV, las cuales permiten definir los parámetros necesarios en la planta, cuenta con hardware y software libre para llevar a cabo el control de nivel en un entorno virtual, donde las únicas variables que se ingresarán manualmente serán el set point y la perturbación, estas se enviarán a un microcontrolador en donde se realizará la función de la planta de nivel.



Figura 3.7. Módulo HIL para la planta de nivel.

El módulo HIL es el que va a permitir probar las diferentes perturbaciones en tiempo real, sin la necesidad de hardware del sistema, permitiendo así verificar si hay condiciones anormales o defectuosas dentro del proceso que se esté ejecutando. Cabe mencionar que para ejecutar la

simulación en tiempo real la frecuencia analógica debe ser 100 veces más rápida que la velocidad de conmutación del sistema real.

Además, el módulo va a permitir visualizar, almacenar, procesar la información y realizar ciertos cálculos, también se van a poder usar otros softwares en conjunto como son: LabVIEW, MATLAB y TIA Portal, haciendo uso de sus herramientas para el análisis del nivel de respuesta y su comportamiento ante las perturbaciones.

3.7.3. Esquema general

En la figura 3.8 se muestra el diagrama del sistema de control de nivel implementado en una estación virtual utilizando una arquitectura Hardware-in-the-Loop (HIL). El sistema está compuesto principalmente por una Raspberry Pi 4, es una tarjeta versátil y potente, cuenta con puertos USB, HDMI, conectividad Wi-Fi, Bluetooth, además de pines de entradas y salidas digitales para conectar sensores y otros dispositivos, cuenta con una interfaz digital que simula la dinámica del proceso de nivel, basada en la ecuación de Bernoulli. Las variables de entrada incluyen el punto de referencia (SP) y perturbaciones, las cuales son procesadas para generar la variable de control (CV). Esta señal es enviada al microcontrolador, que la convierte en un comando para el proceso simulado. La retroalimentación del nivel del tanque (PV) es transmitida al microcontrolador y convertida a un formato digital. La interfaz gráfica permite la visualización y ajuste de los parámetros del sistema, facilitando el análisis del comportamiento del controlador en distintas condiciones operativas.

$$\frac{V_1^2}{2} + gh_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + hA - hL - hE = \frac{V_2^2}{2} + gh_2 + \frac{P_2}{\rho_2} \quad (3.9)$$

En donde:

V = Velocidad de la tubería

h_1 y h_2 = Altura

P_1 y P_2 = Presión

ρ_1 y ρ_2 = Densidad

g = Aceleración de la gravedad

hA = Aporte de energía

hL = Perdida de energía por fricción

hE = Perdida de energía por almacenamiento

Tiempo de vaciado del tanque

Una vez obtenida la ecuación 3.8, considerando el contacto con el aire P_1 , P_2 y, por ende, V_1 toman valores de cero.

$$\frac{0}{2} + gh_1 + \frac{0}{\rho_1} = \frac{V_2^2}{2} + gh_2 + \frac{0}{\rho_2} \quad (3.10)$$

Quedando la ecuación de la siguiente forma.

$$\frac{0}{2} + gh_1 + \frac{0}{\rho_1} = \frac{V_2^2}{2} + gh_2 + \frac{0}{\rho_2} \quad (3.11)$$

Despejando V_2 , la ecuación para el vaciado del tanque quedaría de la siguiente forma.

$$V_2 = \sqrt{2gh} \quad (3.12)$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad

h : Altura

3.8. Estación virtual de nivel

3.8.1. Proceso

La realidad virtual es una simulación digital a la que se la puede visualizar, manipular e incluso interactuar con ella, cada vez son más numerosos los equipos y aplicaciones con la realidad virtual, ya que en ciertos casos pueden significar un ahorro importante de tiempo y dinero, además de una mejora en la eficacia de ciertas aplicaciones, procesos e investigaciones [24].

La figura 3.9 muestra el entorno virtual que se utilizará, donde es posible visualizar los valores del set point (SP) en porcentaje, la variable de proceso (PV) en centímetros, el nivel del tanque en centímetros, el porcentaje de la perturbación y el porcentaje de la bomba. Además, se podrá ver de forma gráfica el comportamiento de las variables SP, PV y CV.

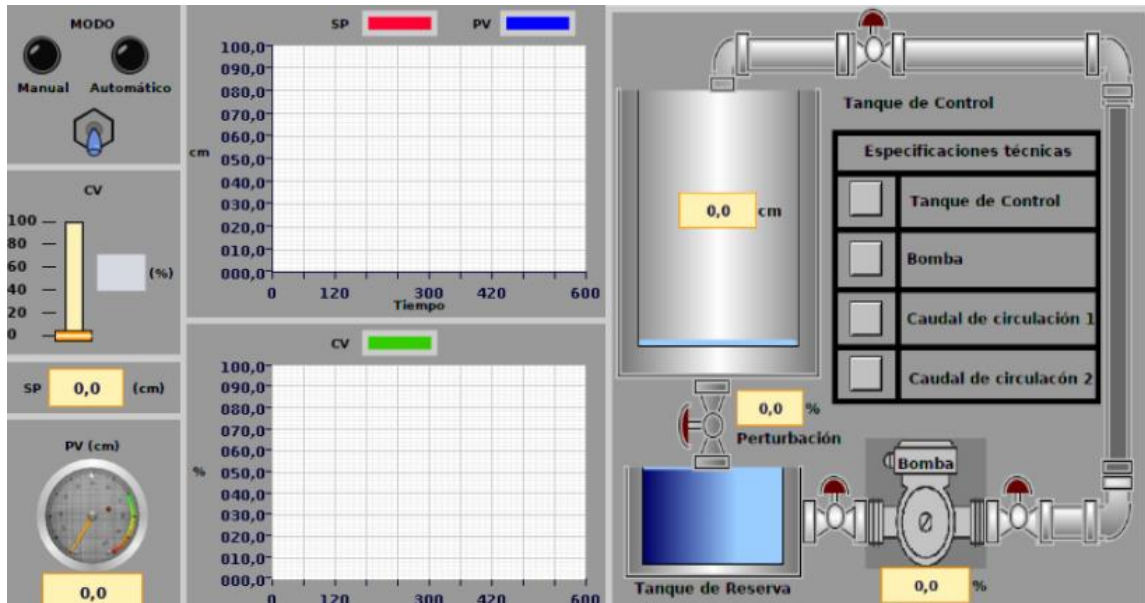


Figura 3.9. Entorno gráfico.

Un aspecto importante del entorno gráfico es que, ofrece la posibilidad de realizar diferentes pruebas al sistema, como aplicar perturbaciones o modificar el set point para analizar la respuesta del controlador, esto permite identificar la respuesta del sistema bajo distintas condiciones y realizar ajustes en los parámetros de control para mejorar su funcionamiento.

3.9. Comunicación (OPC SERVERS)

OPC (Ole for Process Control) es una interfaz que permite la interacción entre múltiples fuentes de datos, incluidos equipos en una planta de producción, instrumentos de laboratorio, dispositivos de prueba y base de datos. Con el fin de evitar crear protocolos específicos para

cada dispositivo se creó este conjunto de interfases universales, los cuales permiten interactuar con cualquier dispositivo siempre y cuando cumpla con el estándar OPC. Además, incluye normas para el acceso a datos históricos, lo que permite acceder a información almacenada por sistemas de registro histórico, como servidores que guardan los datos en bruto.

Permite la comunicación entre aplicaciones cliente y servidor, funcionando como una capa intermedia que abstrae las redes industriales de los controladores PLC propietarios. Este estándar define cómo deben comportarse las interfaces para interactuar con los clientes, quienes acceden a los datos a través de métodos y llamadas de función estándar. Así, cualquier programa de análisis o adquisición de datos que implemente un protocolo cliente OPC puede conectarse con un dispositivo industrial que posea una interfaz OPC correspondiente [25].

Actualmente en su gran mayoría los fabricantes de dispositivos de adquisición y control de datos industriales como PLC y PCA, diseñan sus productos para que sean compatibles y cumplan con este estándar.

4. METODOS Y PROCEDIMIENTO

La aplicación del control PID y difuso en un proceso virtual de nivel implica consideraciones teóricas y técnicas, fundamentadas en una exhaustiva investigación bibliográfica. Esta investigación permite recopilar información relevante sobre cada estrategia de control, incluidas sus aplicaciones específicas, fortalezas, limitaciones y estudios relacionados con el tema.

En cuanto a los métodos a utilizarse para el análisis comparativo serán de tipo deductivo y experimental, inicialmente el método experimental permitirá ajustar la señal de entrada para observar su efecto en la señal de salida, lo que facilitará la obtención del modelo matemático de cada proceso. Por su parte, el método deductivo ayudará a obtener resultados o efectos desconocidos aplicando principios previamente establecidos, además, se utilizará el enfoque cuantitativo para analizar los datos obtenidos a través de la simulación de cada proceso, lo que permitirá analizar el desempeño de cada controlador.

4.1. Declaración de las variables

- Variable Independiente

Estrategia de control seleccionada

- Variable Dependiente

Desempeño de la estrategia de control

4.2. Operaciones de las variables

En la tabla 3 se describe las variables del análisis de un sistema de control, indicando sus unidades de medida y los instrumentos empleados. La variable independiente, es analizada mediante la configuración de los controladores, mientras que la variable dependiente es analizada mediante la evaluación de tendencias.

Tabla 3. Variables independientes y dependientes.

Variables	Unidad de medida	Instrumento de medición
Independiente (Estrategia del controlador)	Sin unidades (adimensional)	Configuración del controlador
Dependiente (Desempeño del controlador)	Tiempo (s) Porcentaje (%)	Evaluación de tendencias

4.3. Métodos, técnicas e instrumentos

Los métodos empleados para analizar el funcionamiento de un sistema de control, junto con las técnicas asociadas y los instrumentos utilizados se presentan en la tabla 4, en esta se destaca un enfoque integral que combina métodos experimentales, deductivos y cuantitativos.

Tabla 4. Métodos, técnicas e instrumentos.

Método	Técnica	Instrumentos
Experimental	Observación y medición	Registro de rangos operativos
Deductivo	Modelado y simulación	Función de transferencia y parámetros de ajuste
Cuantitativo	Validación	Indicadores de desempeño

4.4. Recolección de datos y construcción del modelo matemático

Para este apartado se presenta en la figura 4.1 la lógica que describe las etapas necesarias para obtener el modelo matemático en espacio de estados, empleado datos en el dominio del tiempo, representados en una función de transferencia.

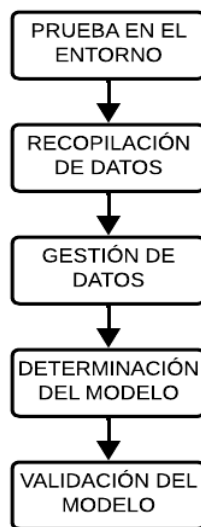


Figura 4.1. Lógica para la obtención del modelo matemático.

4.4.1. Prueba en el entorno

Inicialmente para recopilar los datos necesarios para la estimación del modelo se va a realizar la prueba en el entorno virtual de nivel en las siguientes condiciones, el set point va estar en 100%, ya que, es necesario que el tanque se llene en su totalidad, la apertura de la válvula va estar en 0% de igual manera que la perturbación, en la figura 4.2 se representa el entorno grafico con las condiciones a aplicar.

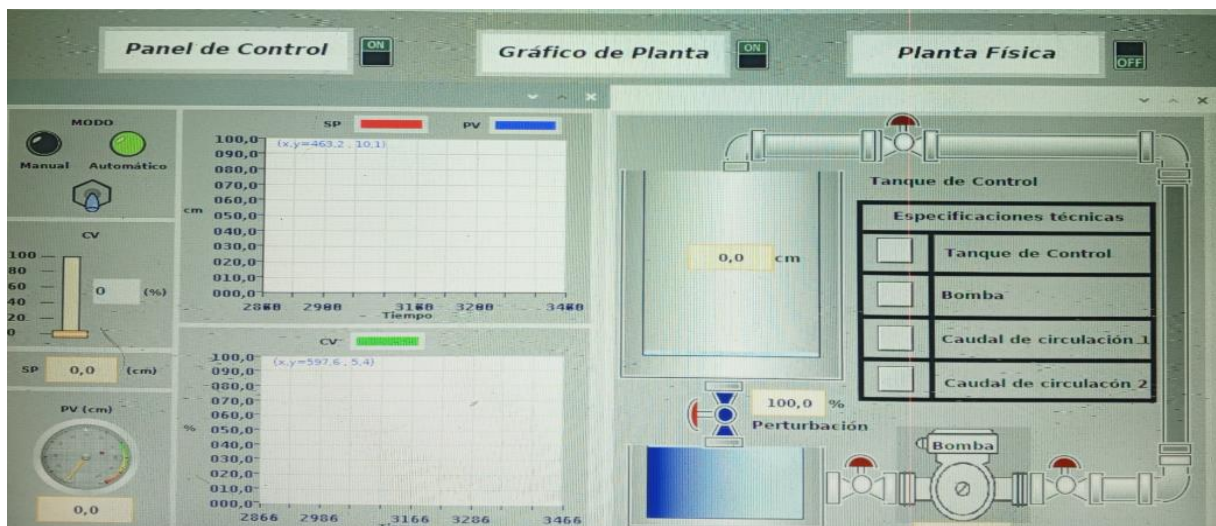


Figura 4.2. Entorno virtual con las condiciones para las pruebas.

4.4.2. Recopilación de datos

En el proceso de control se manejan variables particulares dentro del sistema, como el PV, CV y SP, la figura 4.3 indica las variables correspondientes del módulo HIL utilizado en el control de nivel.



Figura 4.3. Variables de proceso del módulo HIL de la planta de nivel.

En este caso, el valor de PV representará el valor del proceso, refiriéndose al nivel de líquido en el tanque, CV será la variable de control que gestionará la entrada de líquido al tanque, SP será el punto de ajuste definido para el proceso de nivel, y por último la perturbación, que en este caso corresponde a la apertura de la válvula de salida del tanque.

Al modificar la perturbación, se observa el comportamiento de cada controlador, en este caso, se implementa un entorno gráfico 2D, en donde el nivel del líquido se mantendrá cercano al valor predefinido en el punto de ajuste, es importante recordar que la conexión al entorno gráfico se realiza mediante OPC, sin embargo, para implementarlo en un sistema físico, es necesario ajustar las variables y parámetros correspondientes al tipo de control a instalar, configurando los componentes físicos.

La recopilación de los datos se va realizar con el módulo HIL de la planta de nivel, parte esencial para el proceso ya que, es importante la conexión y sincronización de la información de datos en el sistema. En este apartado el diseño de los controladores juega un papel crucial, ya que es necesario que los datos se obtengan con precisión para modelar adecuadamente el sistema y garantizar un funcionamiento óptimo.

4.4.3. Gestión de datos

Para la gestión de los datos se va a utilizar el software Matlab, específicamente Simulink, en donde se crearán los diagramas de bloques y, además, se gestionará la comunicación en tiempo real con el PLC haciendo uso del OPC para el entorno virtual.

Una vez ejecutada la programación y obtenidos los datos del entorno gráfico, se trabajará con los dos tipos de controladores en Simulink, y en este caso el software TIA Portal se utilizará únicamente para cargar la programación, esto debido a que el PLC actuará como una pasarela.

Cabe mencionar que según el equipo (PC) que se esté utilizando para el procesamiento de los datos el tiempo de respuesta va a ser mayor o menor, es por ello que cuanto mejores sean los componentes del PC mejor será el tiempo de respuesta durante las pruebas, aspecto importante para reducir los tiempos de ejecución y asegurar la validez de los resultados.

4.4.4. Determinación del modelo

Una vez ejecutada la simulación virtual de la planta y al examinar los datos obtenidos, se puede confirmar que el sistema en estudio es un proceso integrador debido a su comportamiento. El modelo de la función de transferencia ha sido establecido como se indica en la ecuación 4.1, esta describe un sistema de primer orden y se caracteriza por tener una constante integrante y un tiempo muerto.

$$G(s) = \frac{kp * e^{-std}}{s} \quad (4.1)$$

$G(s)$ = Función de transferencia del sistema en el dominio de la frecuencia.

kp = Ganancia proporcional del sistema.

e^{-std} = Retardo temporal del sistema.

$\frac{1}{s}$ = Integrador del sistema.

Una vez identificada la función de transferencia, utilizamos el comando “systemIdentification” de Matlab para el análisis de esta en base a los datos obtenidos una vez ejecutada la simulación virtual de la planta, es importante mencionar que los tiempos de respuesta a ingresar son de suma importancia, para que no haya problemas en el diseño y simulación del sistema, en este caso para el Starting time será 1, y para el Sample time será 0.2 como se muestra en la figura 4.4.

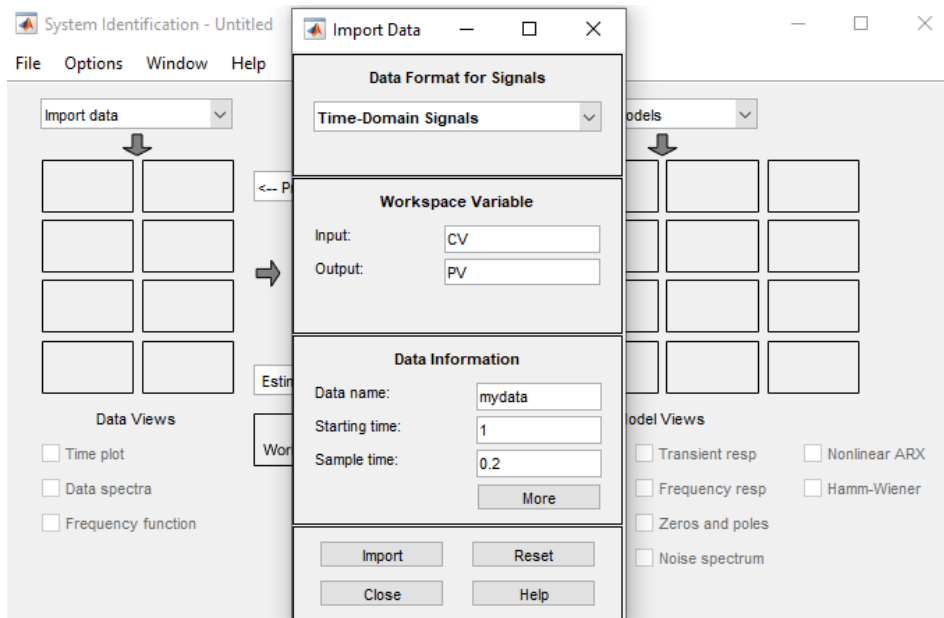


Figura 4.4. Modelado de la función de transferencia del sistema usando la función “systemIdentification” de Matlab.

Después de importar los datos, ajustar los tiempos de respuesta y elegir el modelo de la función de transferencia, es fundamental tener en cuenta que esta solo será válida si los parámetros de la señal se mantienen constantes. De este modo, cualquier variación en la perturbación provocará cambios en la función de transferencia, una vez finalizado el proceso de modelado, el resultado obtenido se presenta en la figura 4.5.

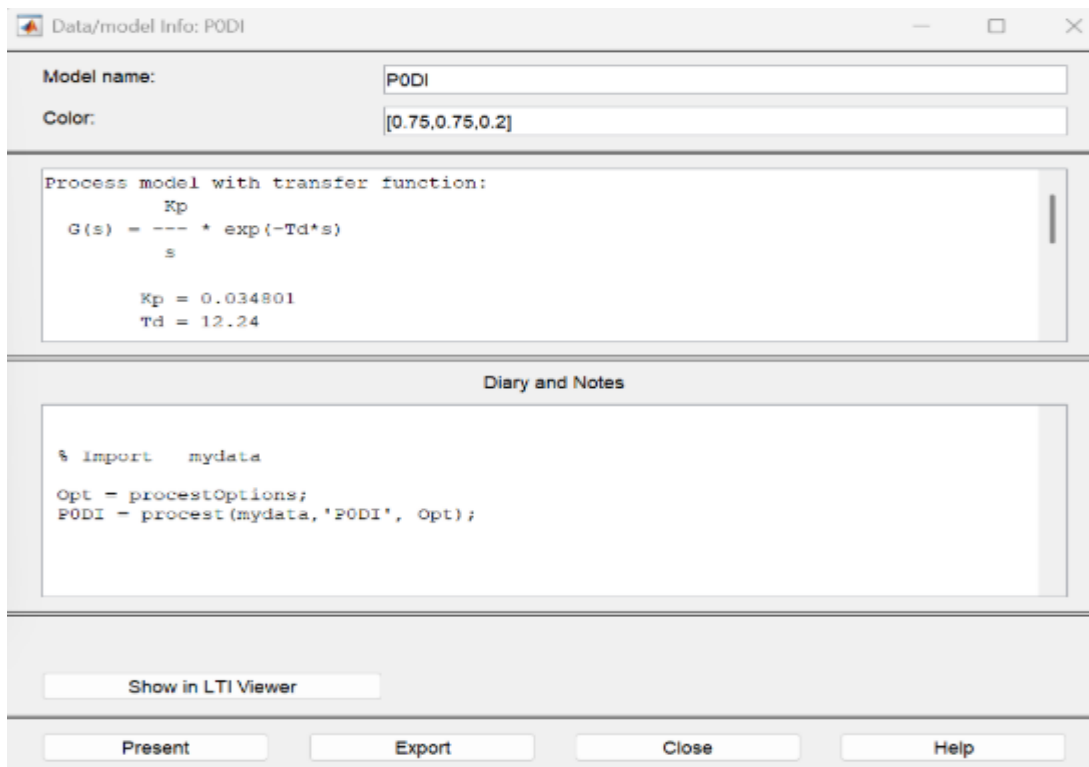


Figura 4.5. Estimación de la función de transferencia.

4.4.5. Validación del modelo

Para la validación del modelo utilizamos una función adicional en la misma ventana del sytemIdentification, esta va a permitir ver el porcentaje de aceptación de la función estimada, cuando el porcentaje sea $>70\%$ va a ser aceptable, pero en este caso se van a realizar diversas pruebas hasta obtener el modelo que más se aproxime a la función.

Tal como se muestra en la figura 4.6, el nivel de aceptación o el grado de coincidencia entre la salida real y la estimada es de $91,32\%$, porcentaje aceptable, entonces, podemos utilizar la función de transferencia obtenida.

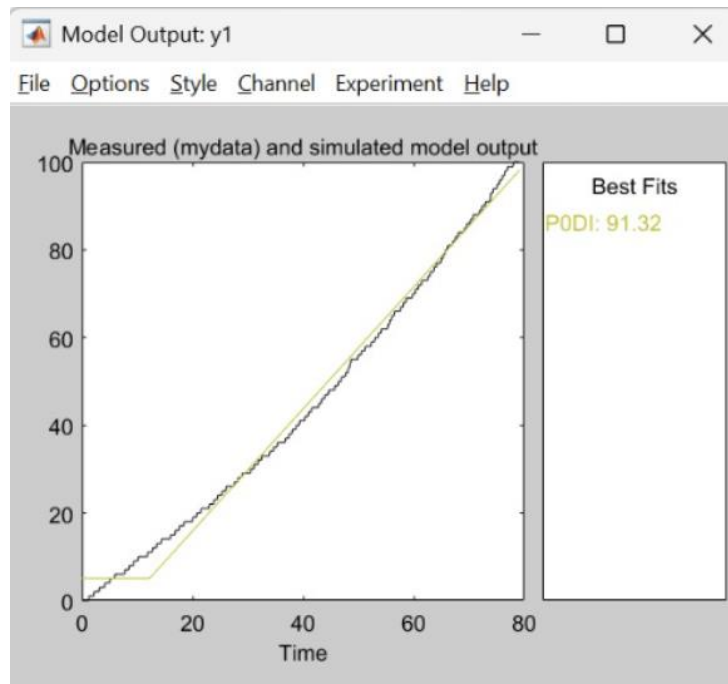


Figura 4.6. Estimación y porcentaje de aceptación de la función de transferencia.

4.4.6. Parámetros de sintonización

Después de identificar el modelo de la función de transferencia del sistema, en la industria se emplean diversos métodos de sintonización, los cuales se presentan en la tabla 5, en ella se especifican las fórmulas correspondientes para calcular cada constante (k_c , T_i y T_d). Es posible seleccionar el criterio de sintonización que mejor se adapte a las necesidades del proceso.

Tabla 5. Métodos de sintonización para un control PID de un proceso integrante[26].

Método de Sintonización	kc	Ti	Td
Ford	$\frac{1,48}{km\ tm}$	2 tm	0,37 tm
Hay	$\frac{0,4}{km\ tm}$	3,2 tm	0,8 tm
Astrom and Hagglund	$\frac{0,94}{km\ tm}$	2 tm	0,5 tm
Leonard	$\frac{0,74}{km\ tm}$	12,2 tm	0,41 tm
Rotach	$\frac{1,21}{km\ tm}$	1,60 tm	0,48 tm
Zou and Brigham	$\frac{2}{km\ (y + 0,5\ tm)}$	2y + tm	$\frac{y + 0,25\ tm}{2y + tm}$

Para obtener los índices de las constantes del modelo, vamos a basarnos en los valores obtenidos de la función de transferencia, esta estimación va a ser el punto de partida para obtener las constantes (kc, Ti y Td) para la sintonización.

Los valores obtenidos de ganancia proporcional (Kp) y tiempo muerto del sistema (Td) que anteriormente fueron mostrados en la figura 4.5, los reemplazamos según el método de sintonización para un controlador PID de un proceso integrante que se vaya a utilizar de la tabla 5, para este caso se van a comparar cuatro métodos, pero, se va a trabajar con el método de Ford.

$$kp = km = 0,034801$$

$$Td = tm = 12,24$$

Método de Ford

$$kc = \frac{1,48}{km\ tm} = \frac{1,48}{0,034801 * 12,24} = 3,47447 \quad (4.2)$$

$$Ti = 2\ tm = 2 * 12,24 = 24,48 \quad (4.3)$$

$$Td = 0,37\ tm = 0,37 * 12,24 = 4,52 \quad (4.4)$$

Método de Hay

$$k_c = \frac{0,4}{\text{km tm}} = \frac{0,4}{0,034801 * 12,24} = 0,93904 \quad (4.5)$$

$$T_i = 3,2 \text{ tm} = 3,2 * 12,24 = 39,168 \quad (4.6)$$

$$T_d = 0,8 \text{ tm} = 0,8 * 12,24 = 9,792 \quad (4.7)$$

Método de Astrom and Hagglund

$$k_c = \frac{0,94}{\text{km tm}} = \frac{0,94}{0,034801 * 12,24} = 2,20675 \quad (4.8)$$

$$T_i = 2 \text{ tm} = 2 * 12,24 = 24,48 \quad (4.9)$$

$$T_d = 0,5 \text{ tm} = 0,5 * 12,24 = 6,12 \quad (4.10)$$

Método de Rotach

$$k_c = \frac{1,21}{\text{km tm}} = \frac{1,21}{0,034801 * 12,24} = 2,84061 \quad (4.11)$$

$$T_i = 1,60 \text{ tm} = 1,60 * 12,24 = 19,548 \quad (4.12)$$

$$T_d = 0,48 \text{ tm} = 0,48 * 12,24 = 5,8752 \quad (4.13)$$

Tabla resumen de los métodos de sintonización

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos al aplicar cuatro métodos diferentes, es importante destacar que estos valores son referenciales y, para lograr una sintonización más precisa y estable, es necesario ajustarlos manualmente mediante un proceso de prueba y error, este ajuste requiere que el programador tenga la capacidad de analizar y refinar los valores para obtener resultados más cercanos al óptimo.

Tabla 6. Sintonización del Controlador PID.

Métodos de Sintonización	PID		
	kc	Ti	Td
Ford	3,47447	24,48	4,52
Hay	0,93904	39,168	9,792
Astrom and Hagglund	2,20675	24,48	6,12
Rotach	2,84061	19,584	5,8752

4.5. Estructura de comunicación

4.5.1. Comunicación entre la planta y el software

La estructura de comunicación para la interacción entre el software de diseño de los controladores (PID, Fuzzy) y la planta virtual se representa en la figura 4.7, en esta estructura, el PLC desempeña el papel de una pasarela, es decir, recibe y envía señales de la planta real al ordenador a través del puerto Ethernet. La comunicación OPC permite la lectura y escritura de datos desde Simulink y LabVIEW al PLC, y este, a su vez, se comunica con la planta.

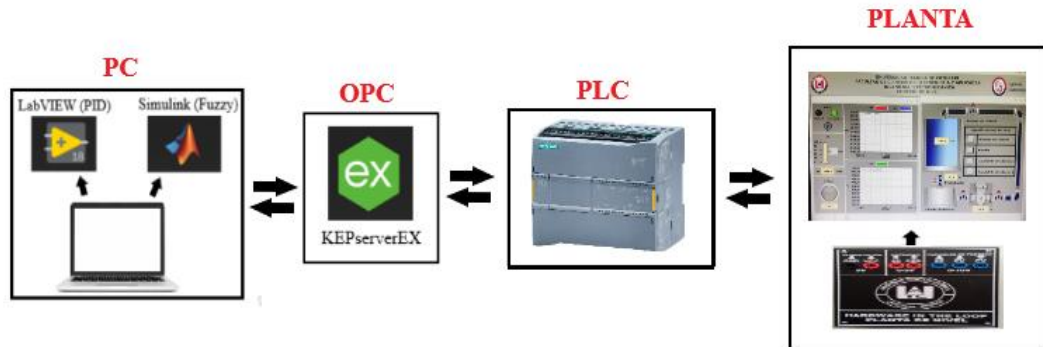


Figura 4.7. Estructura de comunicación entre el software diseñado y la planta.

4.5.2. Programación de las señales analógicas de entrada y salida en el PLC

Como primer paso es necesario establecer la comunicación entre el PLC y la planta, configurando las señales de entrada analógica, primero la IW64, luego la IW66, finalmente la salida analógica QW80. Para garantizar un correcto funcionamiento, es necesario normalizar y escalar estas señales antes de su procesamiento.

En la tabla 7 se muestra cada señal que recibe el PLC, las señales IW64 y IW66 provienen de la planta de nivel, la QW80 es la señal de control que sale hacia la planta, estas funcionan en un rango de 0 a 10V, como se menciona anteriormente es necesario realizar un proceso de normalización y escalado para cada señal, es decir, 0V serán 0 unidades digitales, y 10V serán 27648 unidades digitales. Estos valores se almacenan en las correspondientes marcas, y una vez

diseñados los bloques de programación para la lectura y escritura en las entradas y salidas analógicas, es necesario cargar el programa en la memoria física del PLC.

Tabla 7. Normalización y escalado de las entradas y salida analógica.

Entradas y salidas	Señal	Normalización y escalado de la señal		Almacenamiento de la señal
		Voltios	Unidades digitales	
Entrada analógica IW64	Desde la planta (señal de referencia SP)	0-10 V	0-27648	MW104
Entrada analógica IW66	Desde la planta (sensor de flujo)	0-10 V	0-27648	MW108
Salida analógica QW80	Señal de control hacia la planta	0-10 V	0-27648	QW80

La configuración de las señales se presenta en la figura 4.8, donde se pueden ver los bloques de normalización y escalado, como se indica en la tabla 7 los datos procesados se almacenan en las marcas correspondientes, y una vez diseñados los bloques, estos se cargan al PLC.



Figura 4.8. Bloques de normalización y escalado.

4.5.3. Configuración NI OPC Servers

Para conectar el OPC en NI OPC Servers, primero es necesario crear un nuevo servidor seleccionando el tipo de dispositivo y protocolo de comunicación adecuado, luego, se agrega el dispositivo ingresando su dirección y parámetros específicos, también se deben configurar los tags necesarios para establecer la comunicación, así como se indica en la figura 4.9. Finalmente, se usa un cliente OPC para probar y verificar la conexión con los datos configurados.

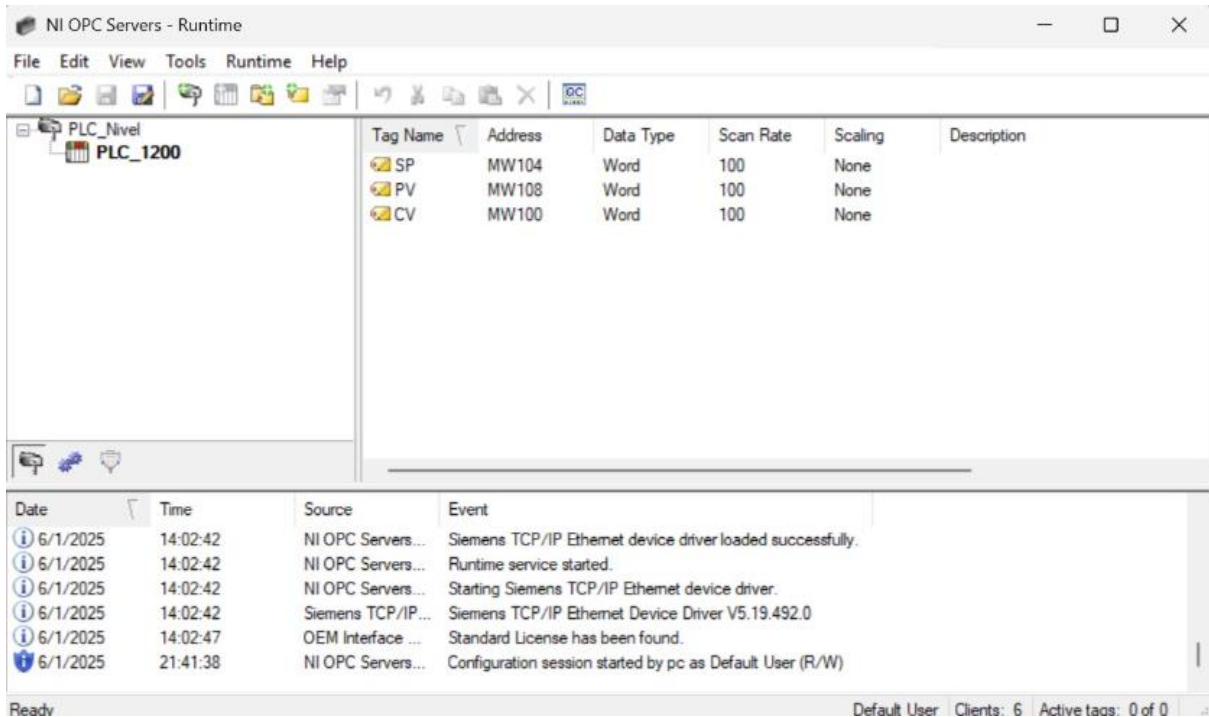


Figura 4.9. Canal de comunicación con LabVIEW.

4.5.4. Configuración OPC en KEEPServerEX

Para este caso la conexión es parecida con el anterior caso, para conectar el OPC en KEEPServerEX, se configura un nuevo canal seleccionando el tipo de dispositivo y protocolo, luego se agrega el dispositivo correspondiente ingresando sus detalles, así como se muestra en la figura 4.10. Además, se requiere definir los tags para la comunicación y finalmente se utiliza un cliente OPC para probar la conexión y verificar la comunicación con los datos configurados.

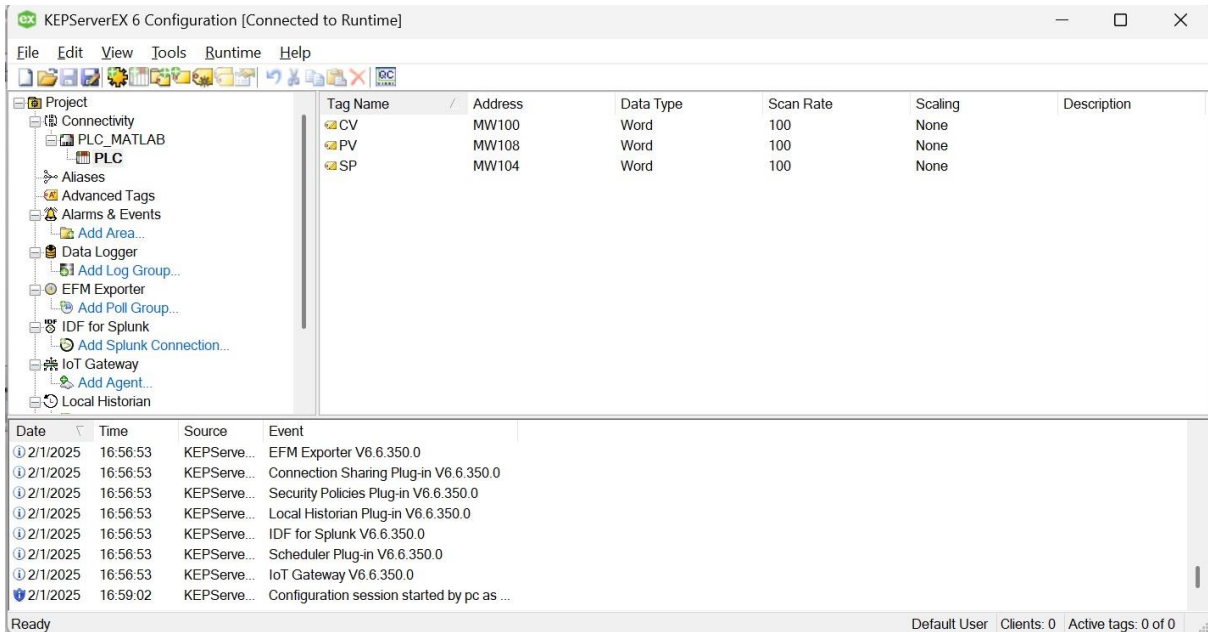


Figura 4.10. Ventana de la interfaz de KEPServerEX.

4.5.5. Configuración OPC en Simulink

Para el caso de Simulink, el OPC Toolbox permite configurar fácilmente la comunicación con un servidor OPC utilizando bloques específicos como, Configuration, Read, y Write, en la figura 4.11 se muestra cómo realizar la búsqueda de estos bloques en la Librería. Los bloques Read y Write se utilizan para leer y escribir datos, respectivamente, integrándolos directamente con las señales del modelo.

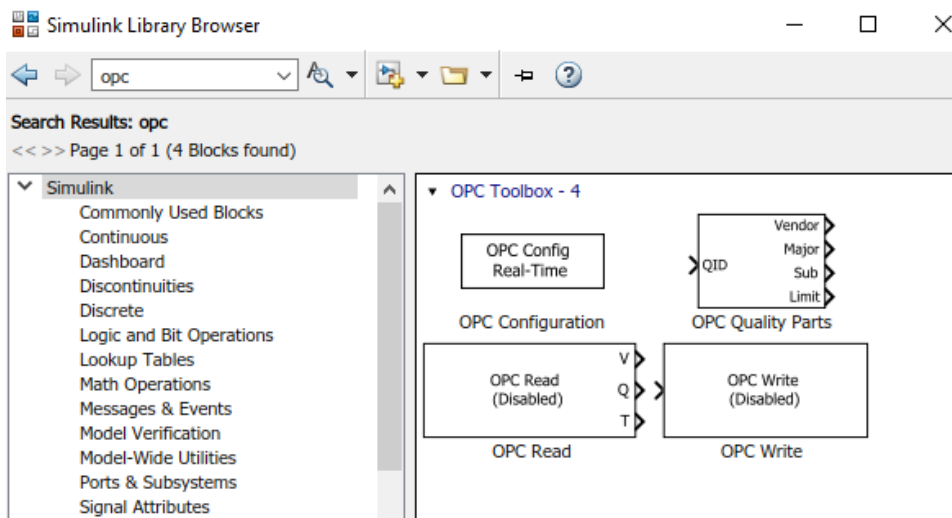


Figura 4.11. OPC Toolbox.

Para el bloque OPC Configuration Real-time en la figura 4.12 se indica su configuración para la comunicación, este bloque nos ayuda a comunicar las salidas y entradas analógicas del PLC que se está utilizando para el diseño del controlador difuso.

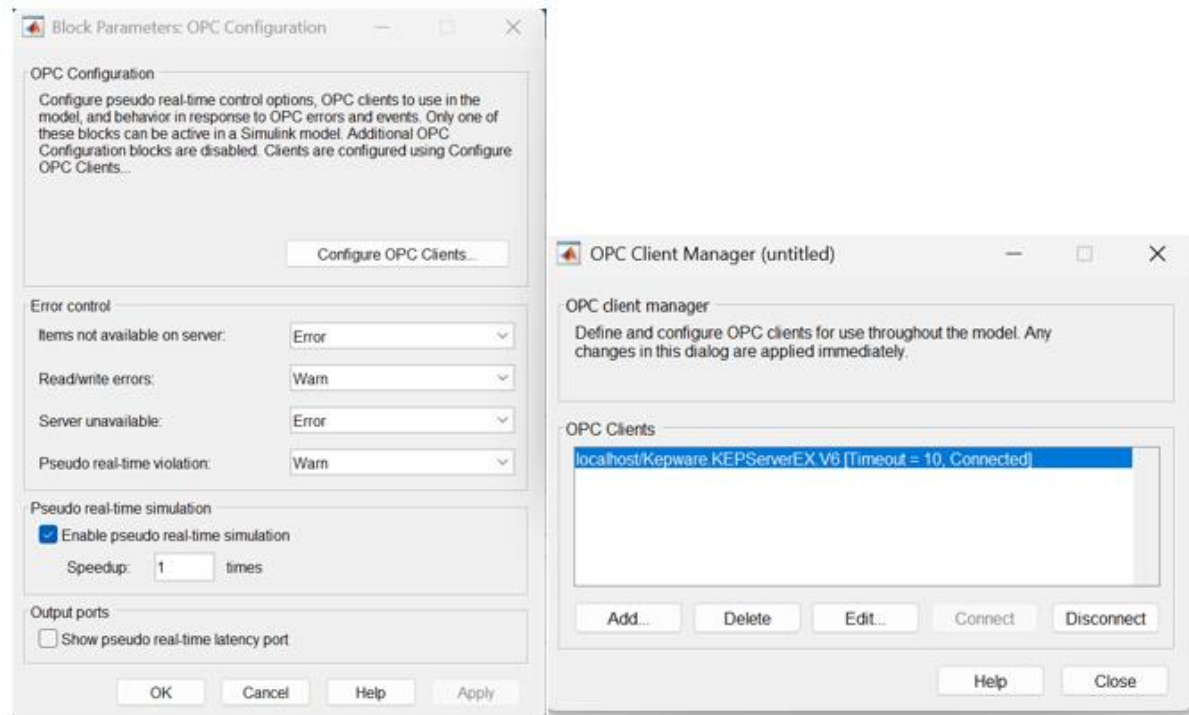


Figura 4.12. Configuración del bloque OPC Configuration.

Una vez agregada la comunicación el siguiente paso es agregar dos bloques OPC Read como se indica en la figura 4.13, estos van a leer las entradas analógicas del PLC, como son el set point (SP) y el sensor de nivel de la planta virtual (PV).

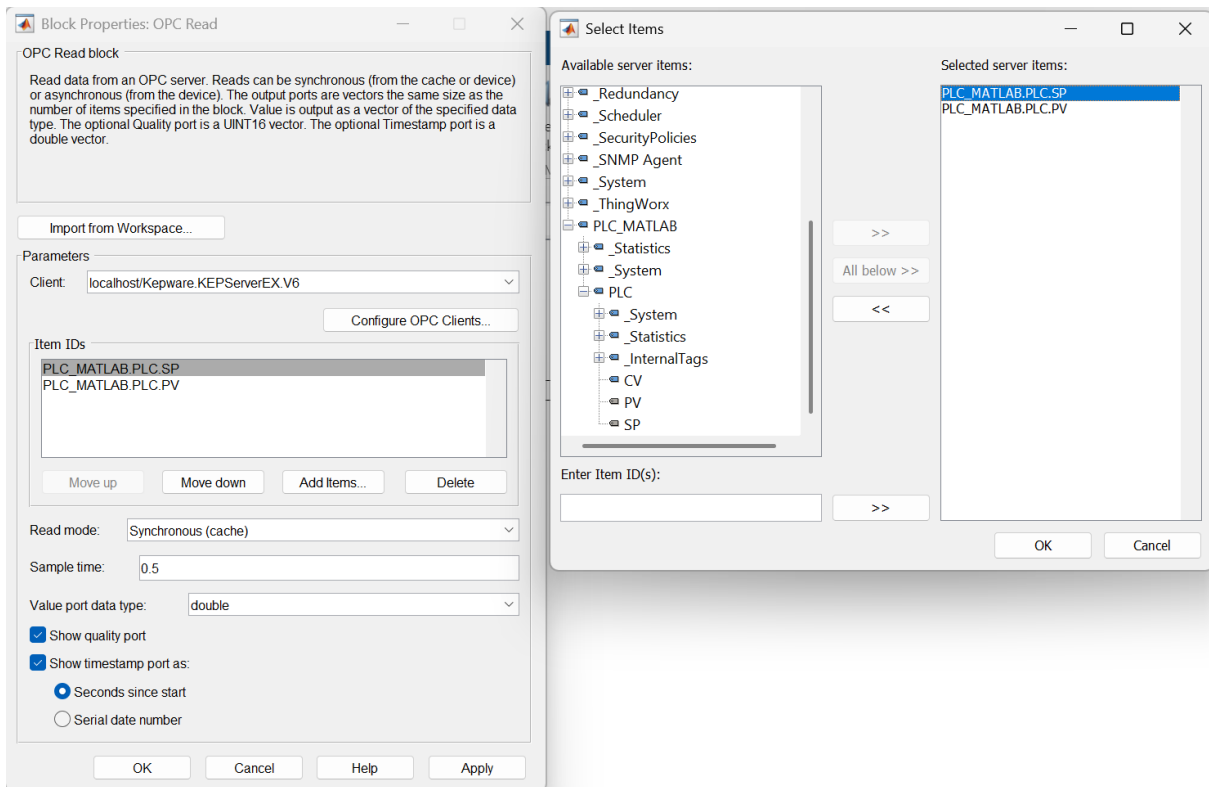


Figura 4.13. Configuración del bloque OPC Read.

4.5.6. Desarrollo del control PID

Para el realizar el control PID en el programa LabVIEW lo primero que se realiza es llamar a los tags previamente cargados en el canal del OPC como se indica en la figura 4.14, en donde el OPC1 es nuestro canal de comunicación y el SP, PV y CV son los tags.

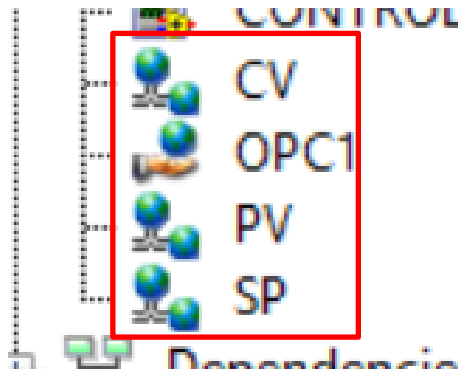


Figura 4.14. Canal y tags del OPC.

Posteriormente se coloca un bloque de controlador PID así como se indica en la figura 4.15, este sirve para calcular la señal de control en función de la variación entre el set point SP y el sensor de nivel PV, además se incluyen los parámetros ajustables de ganancia (PID gains).

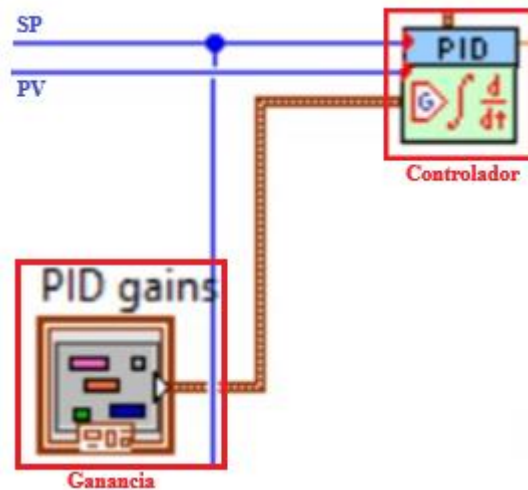


Figura 4.15. Bloque del controlador PID y bloque de ganancia.

Una vez realizada la programación en el diagrama de bloques, pasamos al panel frontal mostrado en la figura 4.16. Este panel actúa como interfaz gráfica, la cual nos permitirá interactuar con el sistema, además de monitorear las variables de control y ajustar los parámetros de ganancia K_c , K_d , T_i para una respuesta efectiva del controlador.

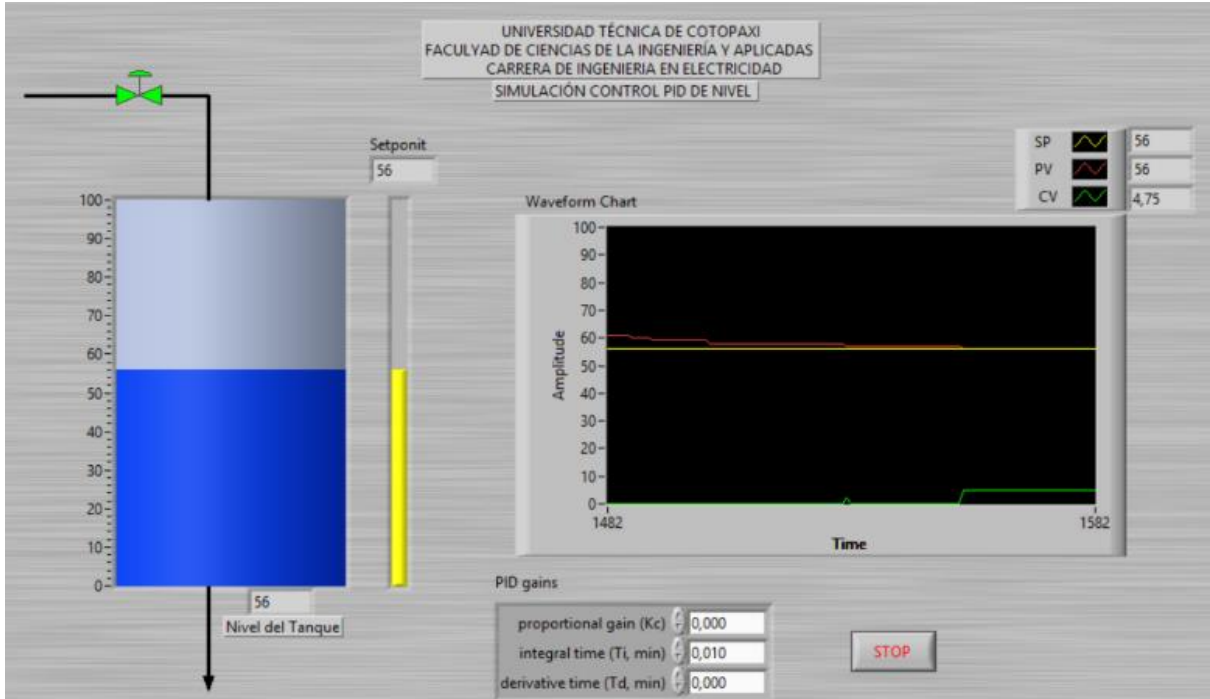


Figura 4.16. Panel frontal del controlador PID realizado en LabVIEW.

4.5.7. Desarrollo del control Difuso

Para el diseño del controlador difuso primero hay que tener en cuenta que la planta a operar en este caso es en un entorno virtual, para ello, se emplea el software MATLAB, donde se llevará a cabo el control del error de la planta y su derivada, lo que nos va permitir corregir la diferencia que existe entre el sensor de nivel (PV) y el set point (SP). La figura 4.17 muestra el diagrama de bloques de la estructura del controlador difuso que se utilizará.

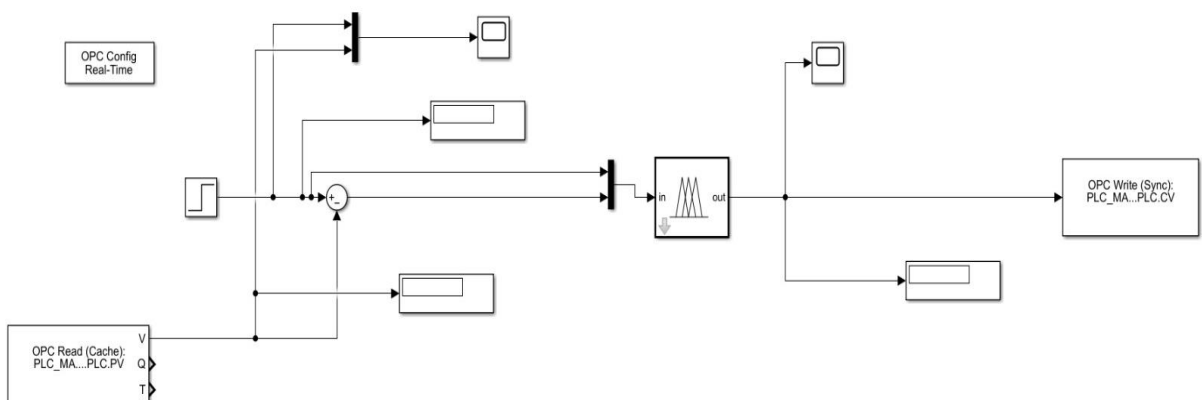


Figura 4.17. Estructura para la implementación de un controlador difuso con comunicación OPC.

Para la configuración del controlador difuso, es fundamental definir la cantidad de entradas y salidas, como se indica en la figura 4.18. Para este caso, se han determinado dos entradas, el error, que representa la variación entre el nivel deseado y actual del tanque, y la derivada del error, que mide la velocidad de cambio del error, permitiendo anticipar la tendencia del sistema. La salida es la válvula, esta es la señal de control que ajusta su apertura o cierre para regular el nivel del tanque.

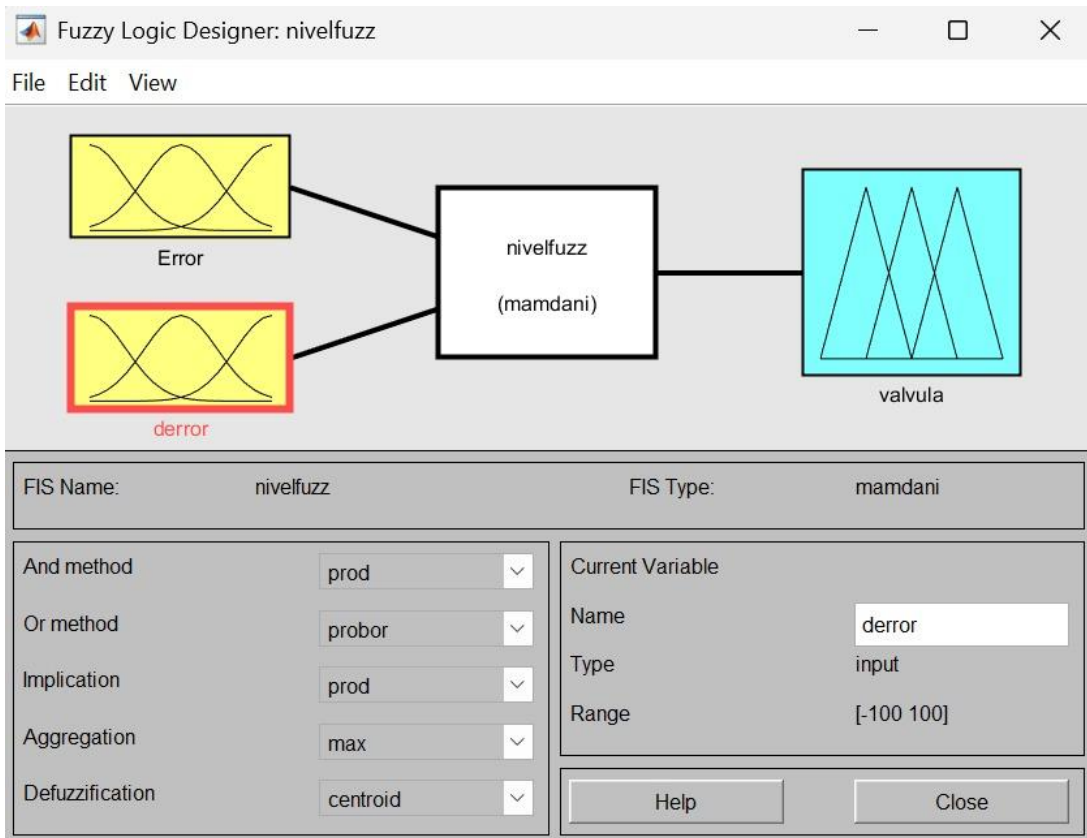


Figura 4.18. Entradas y salidas del controlador difuso.

Además, se determina el número de funciones de membresía que se utilizarán en el controlador, para este diseño, se ha optado por emplear la función de membresía tipo triangular para las entradas, así como se indica en la figura 4.19.

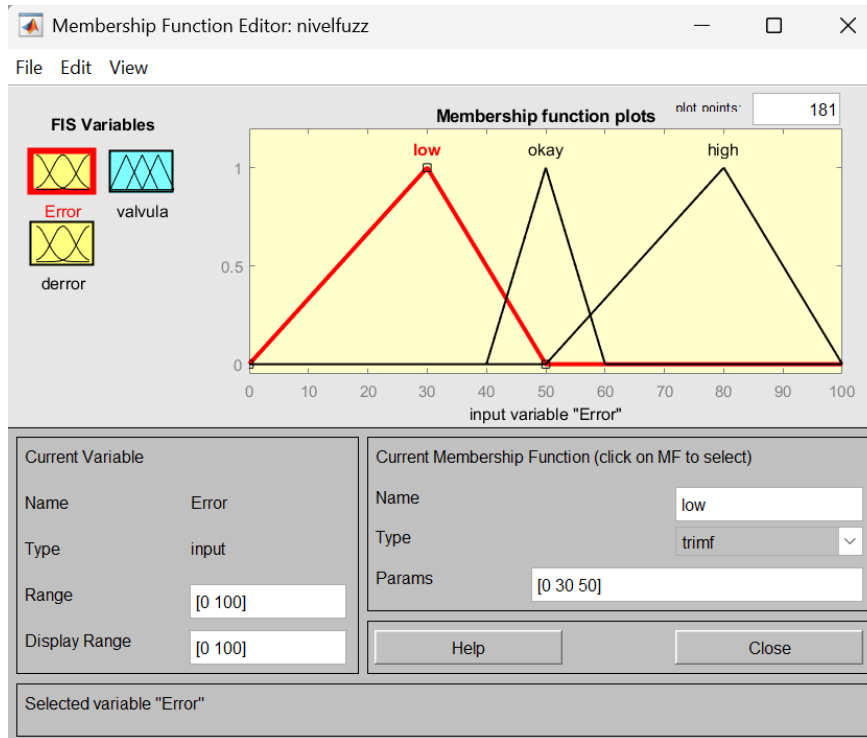


Figura 4.19. Funciones de membresía del controlador difuso.

Se optó usar las funciones de membresía triangulares, ya que, su forma geométrica facilita la implementación y reduce la carga computacional, este tipo de funciones se definen mediante tres parámetros: puntos de inicio, pico y final, permitiendo modificar fácilmente sus valores para afinar el comportamiento del sistema.

Para establecer las reglas del controlador difuso, se empleó el método de Mamdani, una de las metodologías más utilizadas en sistemas difusos debido a su simplicidad y efectividad. Este método relaciona el error (e) y su derivada (e') como entradas del sistema, permitiendo que el sistema tome decisiones de manera gradual y adaptativa.

Para definir las variables lingüísticas no existe regla formal que indique el número de términos que se debe utilizar, todo depende del diseñador, del controlador y del objetivo a alcanzar, la mayoría de las variables lingüísticas tienen número impar, ya que, los términos se definen de manera simétrica, y un término debe describir la región media entre los dos extremos. Por esta razón, se definieron tres funciones de membresía para el error y su derivada, y cinco funciones para la salida.

Las reglas fueron establecidas a partir de las funciones de membresía previamente definidas, en este caso, se utilizaron 10 reglas, estas se indican en la figura 4.20, cada una representa un comportamiento específico del sistema difuso. Estas reglas permiten modelar la lógica de control necesaria para manejar distintas condiciones y asegurar una respuesta adecuada del sistema.

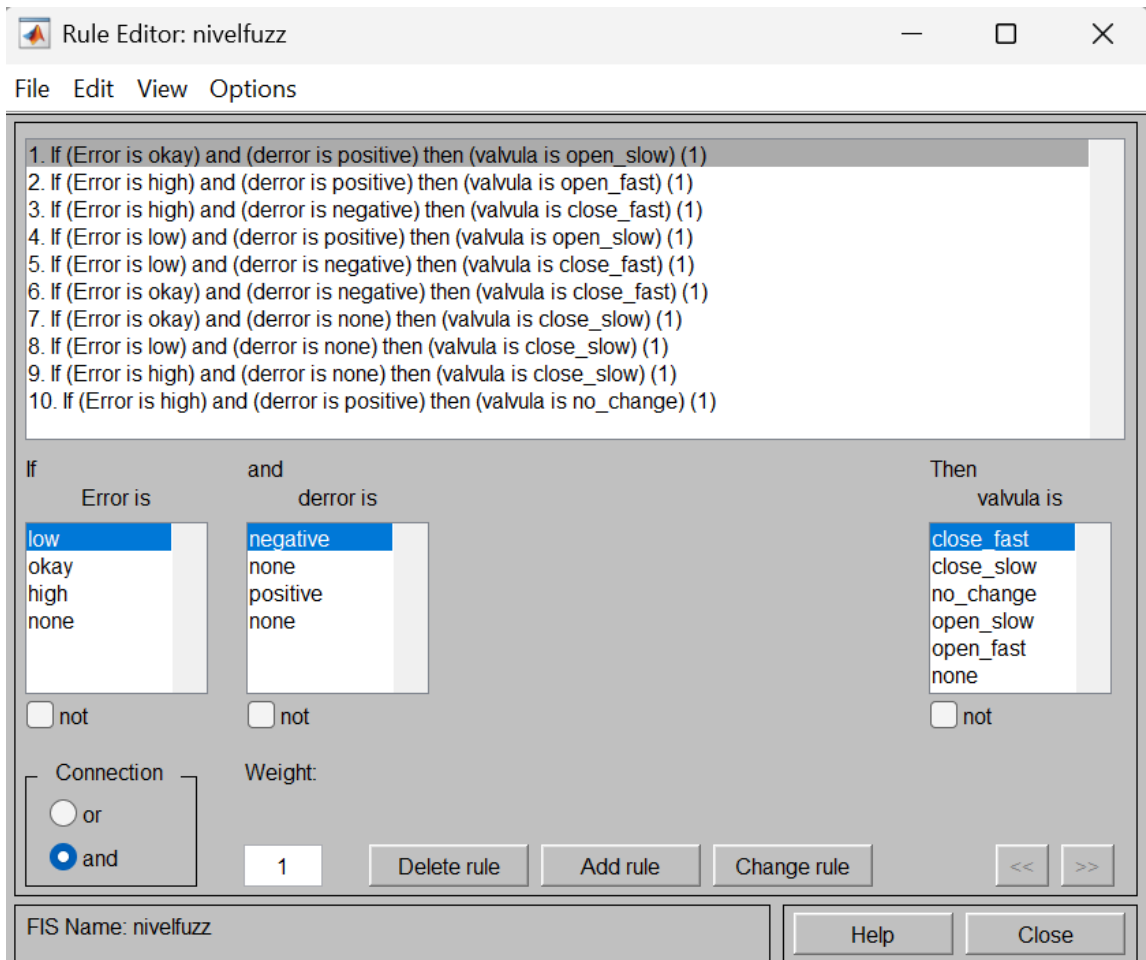


Figura 4.20. Configuración de las reglas del controlador difuso.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El estudio de los resultados de la simulación de los controladores PID y Difuso se realizó analizando su comportamiento frente a distintos valores de set point, con el fin de observar la respuesta transitoria de cada controlador y posteriormente realizar la comparación entre los controladores.

5.1. Simulación de los controladores

A continuación, se presentan las simulaciones de cada controlador, realizadas para analizar el comportamiento de cada uno frente a incrementos o decrementos en la señal de entrada tipo escalón (set point).

5.1.1. Simulación del control PID

La simulación del control PID se basa en la estructura de la función de transferencia determinada para el sistema, previamente mostrada en la figura 4.5, correspondiente a la configuración del controlador PID. Con el propósito mejorar la velocidad respuesta, se ajustan las constantes del controlador, estas fueron obtenidas por el método de sintonización de Ford, mostrado en la tabla 5.

Para la simulación de este controlador, como configuración inicial, el flujo constante en la válvula de salida del sistema se establece en un 25%, y el set point inicial es 30 cm. En la figura 5.1, se puede observar que el sistema responde rápidamente a los cambios de set point, presenta ligeros sobreimpulsos, lo que refleja un balance entre rapidez y estabilidad, las oscilaciones son mínimas, lo que indica que los parámetros de sintonización presentados en la tabla están adecuadamente establecidos.

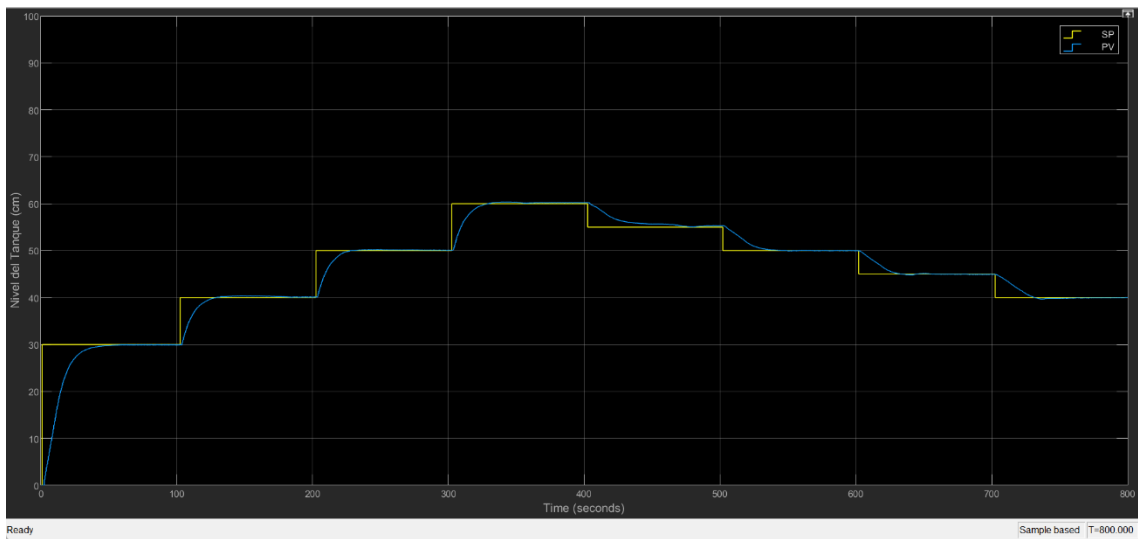


Figura 5.1. Comportamiento del controlador PID ante la variación del set point.

Los valores de sintonización utilizados para la simulación del controlador PID se encuentran detallados en la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros de sintonización del controlador PID.

Kp	3,47447006
Ki	0,04084967
Kc	4,5288

5.1.2. Simulación del control difuso

La simulación para el control difuso debe ser en las mismas condiciones del control PID, y dentro del mismo entorno de trabajo, en este caso Simulink, en la figura 5.2 se puede observar que el controlador maneja bien los cambios con respecto al set point, la respuesta del sistema es rápida, adaptándose adecuadamente a los cambios tanto ascendentes como descendentes con una transición suave y sin oscilaciones significativas, lo que evidencia su capacidad para regular el sistema de manera estable y robusta minimizando las oscilaciones.

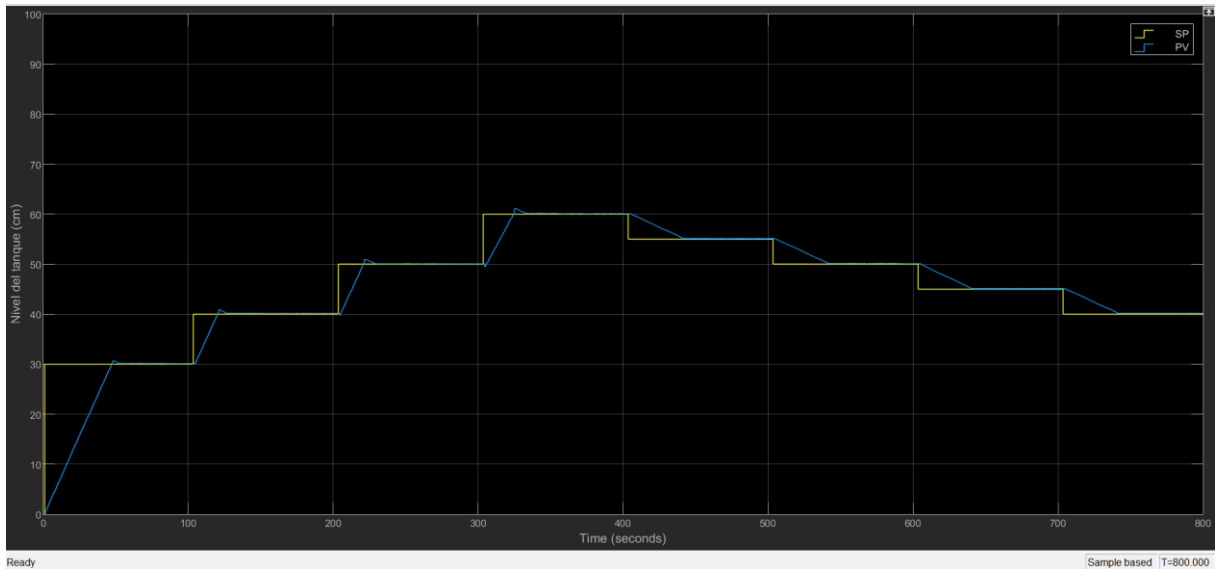


Figura 5.2. Comportamiento del controlador difuso ante la variación del set point.

5.2. Comparación de los controladores

5.2.1. Controlador PID vs controlador Difuso

En la figura 5.3 compara el desempeño de los controladores PID y Difuso frente a cambios escalados en el punto de ajuste (SP). Se observa que los controladores siguen de manera similar la referencia, aunque el PID muestra una respuesta más rápida con ligeros sobreimpulsos, mientras que el difuso presenta una transición más suave y progresiva, especialmente en los cambios iniciales. A medida que avanza el tiempo, estos convergen de manera estable al valor deseado, destacando que el PID tiene una reacción más inmediata, mientras que el difuso prioriza una respuesta más amortiguada, reduciendo posibles oscilaciones.

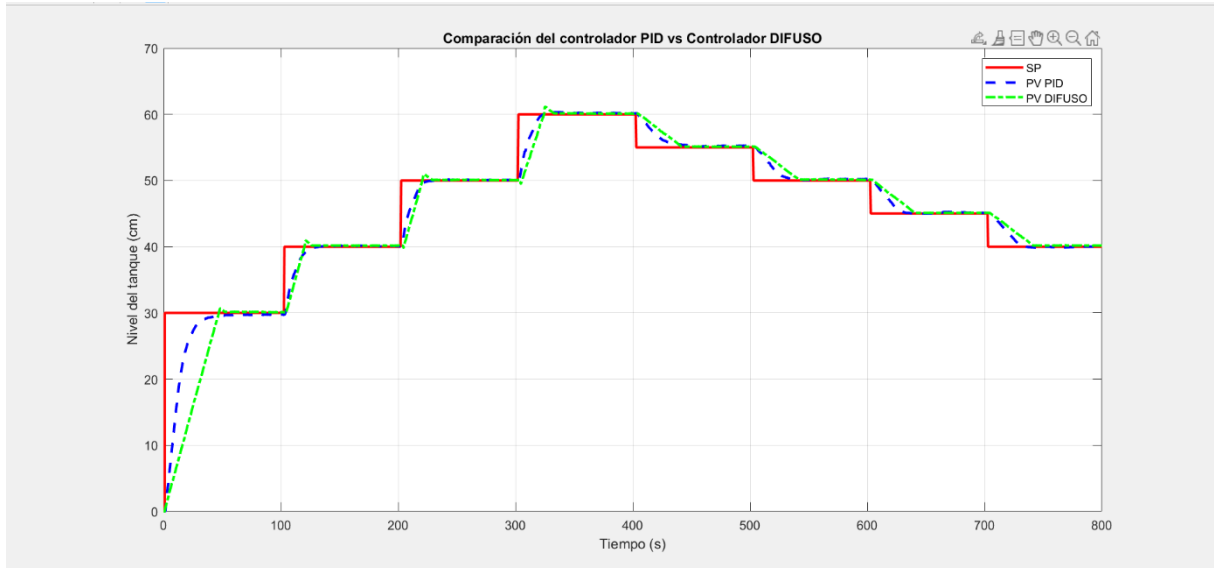


Figura 5.3. Comparación del controlador PID vs el controlador Difuso.

5.2.2. Parámetros de los controladores

En este apartado se presenta el análisis comparativo entre el controlador PID y Difuso, analizando los siguientes parámetros:

- **Tiempo de estabilización:** es el momento en que la curva alcanza y permanece dentro de un margen pequeño alrededor del nivel final.
- **Tiempo de retardo:** es el tiempo cuando la curva comienza a responder.
- **Tiempo de respuesta:** es el tiempo que tarda la respuesta del sistema en alcanzar el 63% de su valor final.
- **Nivel de error:** diferencia entre el SP y el valor más alto de nivel (PV).
- **Apertura de la válvula de salida:** porcentaje de apertura para los controladores (constante en 25%).

Los valores obtenidos de cada controlador se detallan en la tabla 9, permitiendo con ello comparar el desempeño de los controladores, evaluando el tiempo de estabilización, retardo, respuesta y error.

Tabla 9. Resumen del comportamiento del control PID y Difuso.

Controlador PID							
Set point (SP) [cm]	SP ascendente	SP descendente	Tiempo de estabilización [segundos]	Tiempo de retardo [segundos]	Tiempo de respuesta [segundos]	Nivel de error [segundos]	Apertura de la válvula de salida [segundos]
30	x		49.774	1.065	13.595	0.1	25
40	x		37.227	1.615	9.137	0.1	25
50	x		38.722	1.535	9.035	0.1	25
60	x		37.329	1.525	8.476	0.1	25
55		x	65.068	2.066	19.362	0.1	25
50		x	40.440	2.725	16.964	-0.1	25
45		x	43.252	1.514	15.876	-0.1	25
40		x	47.598	1.272	16.315	-0.1	25
Controlador Difuso							
Set point (SP) [cm]	SP ascendente	SP descendente	Tiempo de estabilización [segundos]	Tiempo de retardo [segundos]	Tiempo de respuesta [segundos]	Nivel de error [segundos]	Apertura de la válvula de salida [segundos]
30	x		51.532	1.113	28.867	0.5	25
40	x		22.938	1.826	10.994	1	25
50	x		25.045	2.270	11.587	1	25
60	x		29.688	2.554	14.078	1	25
55		x	38.546	2.579	25.691	-0.1	25
50		x	38.607	2.502	25.355	-0.1	25
45		x	37.160	2.563	24.622	-0.1	25
40		x	37.538	2.624	25.556	-0.1	25

Observaciones principales de los controladores

Tiempos de estabilización

- Para el controlador PID los tiempos de estabilización varían, son mayores a comparación del controlador Difuso, a excepción de cuando el SP es 30, en donde el control PID es menor con un tiempo de 49.774 s y el controlador difuso tiene una estabilización en 51.532 s. El controlador Difuso tiene tiempos de estabilización más bajos con respecto al controlador PID, lo que quiere decir que alcanza un estado estable más rápido que el PID.

Tiempos de retardo y respuesta

- En los tiempos de retardo el controlador difuso presenta tiempos un poco más altos a diferencia del controlador PID con algunas excepciones en donde el controlador difuso presenta un tiempo menor. En cambio, para los tiempos de respuesta en el controlador PID son menores que los tiempos de respuesta del controlador difuso.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- A través de la investigación bibliográfica se logró definir los principios y fundamentos básicos de los controladores, lo que permitió identificar sus diferencias en términos de funcionamiento, como, por ejemplo, el controlador PID se basa en un modelo matemático simple y es ampliamente utilizado, y el controlador difuso ofrece mejor adaptación a las variaciones sin necesidad de un modelo matemático, pero necesita un análisis detallado de las reglas y funciones de membresía.
- Los resultados de los controladores ante diferentes variaciones en la señal de referencia (set point), permitieron analizar su desempeño en términos de estabilidad, retardo y respuesta. El controlador difuso ofrece en la mayoría de los casos una respuesta más rápida comportándose de diferente manera cuando el set point fue 30 cm, donde el tiempo de estabilización del control PID fue 49.774 s a diferencia del controlador difuso que ocupó un tiempo de 51.532s. Estos resultados indican que, si bien el controlador difuso tiene mayor capacidad de adaptación a cambios en el set point, en ciertos casos el PID puede alcanzar una estabilización más rápida.
- El sobreimpulso generado por los controladores indica diferencias significativas en su comportamiento. El controlador difuso presentó un sobreimpulso de 1 cm a diferencia de los 0.1 cm del PID, a pesar de que los dos generan cierto nivel de sobreimpulso, el controlador PID es más adecuado cuando la exactitud es necesaria, mientras que el controlador difuso es mejor cuando se requiera mejor adaptabilidad y robustez del sistema.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un correcto ajuste de las constantes: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), que permita lograr un equilibrio entre velocidad de respuesta, precisión y estabilidad, para que no exista sobreimpulso e inestabilidad en el sistema y mejorar el desempeño del controlador, para este estudio se utilizó como referencia el método de FORD, sin embargo, hay que considerar que al reajustar las constantes, tenemos que basarnos en ellas como referencia, no es necesario usar los mismos valores, ya que si no se hace un reajuste de estos parámetros a veces los resultados de estos métodos difieren entre sí y no se tiene una buena estabilización del sistema.

- Para el control difuso es importante definir adecuadamente las reglas y funciones de membresía, ya que estas influyen directamente en el desempeño del sistema, es recomendable realizar pruebas y simulaciones con diferentes ajustes para determinar la que mejor rendimiento tiene en términos de precisión, estabilidad y rapidez de respuesta.
- Se sugiere ampliar el estudio actual realizando simulaciones adicionales en donde se incrementen diferentes configuraciones y condiciones operativas, estas nuevas simulaciones ayudaran a obtener nuevos resultados para la selección de un controlador, además, estas nuevas configuraciones ayudaran a entender como el cambio de parámetros afecta al desempeño del sistema.

7. REFERENCIAS

- [1] O. Camacho, A. Rosales, and F. Rivas, *Control de Procesos*, 1st ed. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [2] M. Ranjitha, “Comparative Analysis of Fuzzy Logic Controllers and PID Controllers in Industrial Automation Systems,” *Engineering Sciences*, vol. 15, pp. 1534–1536, 2024.
- [3] O. Fuad, “Performance Comparison of PID Controller and Fuzzy Logic Controller for Water Level Control with Applying Time Delay,” *Konya Journal of Engineering Sciences*, pp. 861–866, Sep. 2021.
- [4] M. Perez, A. Perez, and E. Perez, “Introducción a los Sistemas de Control y Modelo Matemático para Sistemas Lineales Invariantes en el Tiempo,” San Juan, 2007.
- [5] F. Gonzalez, “Introducción a los Sistemas de Control,” in *Teoría de Control*, 2016, ch. 1, pp. 5–8. Accessed: Nov. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/294721439>
- [6] B. Kuo, *Sistemas de control automático*, 7th ed. 1996.
- [7] M. Carpio and W. Orozco, “Introducción al Análisis e Implementación de Sistemas de Control Automático,” Cuenca, Jun. 2017.
- [8] P. Coronel and E. Peralta, “Diseño e implementación de un sistema PID para el control de nivel de un tanque desarrollado con el PLC Siemens S7-200,” Universidad del Azuay, Cuenca, 2009.
- [9] L. Caiza, “Sistemas de Control de Lazo Abierto y Cerrado de Voltaje para Determinar el Error en Estado Estable a Diferentes Pulsos de Entrada en el Laboratorio de Control y Automatización de la FICM,” Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2015.
- [10] H. Unbehauen, “System Analysis and Control: Classical Approaches II,” in *Control Systems, Robotics and Automation*, vol. II, 2009, pp. 65–66.
- [11] R. Vilanova and V. Alfaro, “Control PID robusto: Una visión panorámica,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 8, no. 3, pp. 141–158, 2011.
- [12] J. Guilcamaigua and M. Villacis, “Análisis del Control PID de un Sistema Didáctico de Tanques,” Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2022.
- [13] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 5th ed. Madrid, 2010.
- [14] M. García, “Análisis comparativo de parámetros PID mediante controladores de lógica difusa y no lineales usando Simulink/MatLab,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2020.

- [15] E. Criollo, “Diseño e implementación de un controlador difuso tolerante a falla, aplicado al control de nivel de líquido,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2015.
- [16] L. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [17] I. da Silva, “Controle Fuzzy para Ar-Condicionado via mensagens MQTT,” Universidad Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.
- [18] J. H. Lilly, *Fuzzy Control and Identification*, 1st ed. 2010.
- [19] P. Centeno, “Introducción a TIA Portal con S7-1500,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- [20] R. Lajara and J. Pelegrí, *LabVIEW*, 2nd ed. Madrid: Entorno gráfico de programación, 2011.
- [21] M. Matlab, “Matlab & Simulink.” [Online]. Available: <https://la.mathworks.com>
- [22] National Instruments, “¿Qué es el hardware-in-the-loop (HIL)?,” National Instruments. [Online]. Available: https://www.ni.com/es/solutions/transportation/hardware-in-the-loop/what-is-hardware-in-the-loop-.html?srsltid=AfmBOoof2lGjl3iZAucSwPpRMaMR_y9_vEHwECaLEXFYVKQUc48zJl3W
- [23] B. Bonilla, “Implementación de un Sistema HIL (Hardware in the Loop) para el Control de Nivel,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2021.
- [24] F. Pazmiño and J. Toapanta, “Desarrollo de un entorno virtual 3D para el control de nivel de agua,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2021.
- [25] National Instruments, “Introducción a OPC,” National Instruments. [Online]. Available: <https://www.ni.com/en/solutions/industrial-machinery/smart-machine-control/introduction-to-opc.html?srsltid=AfmBOoqhpA3IvJtVLxyFA7mAkA7E1xVbhmm0RFVc1LWXAQjHYane7o54>
- [26] G. Balladares and H. Teneda, “Sistema virtual 3D de una torre de destilación, mediante la técnica de Hardware in The Loop, para la enseñanza en el Control de Procesos,” Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2020.