UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

ALGORITMOS DE CONTROL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y CAUDAL EN DEPÓSITOS PARA LÍQUIDOS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

AUTOR(ES):

Noe Isaías Quinga Yasig

Miguel Angel Quimbita Panchi

TUTOR:

PhD. Secundino Marrero

LATACUNGA, FEBRERO 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

QUINGA YASIG NOE ISAÍAS, con cédula de ciudadanía No. **0504168832** **QUIMBITA PANCHI MIGUEL ANGEL** con cédula de ciudadanía No. **0503422800**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: "**ALGORITMOS DE CONTROL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y CAUDAL EN DEPÓSITOS PARA LÍQUIDOS".** siendo el **PhD. SECUNDINO MARRERO**. tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, febrero19 del 2025

.....

Noe Isaías Quinga Yasig

C.C: 0504168832

.....

Miguel Angel Quimbita Panchi

C.C: 0503422800

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

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

"ALGORITMOS DE CONTROL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y CAUDAL EN DEPÓSITOS PARA LÍQUIDOS", de **Noe Isaías Quinga Yasig y Miguel Angel Quimbita Panchi** de la carrera de **Electricidad** considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 19 febrero, 2025

.....

PhD. Secundino Marrero
C.C: 1757177
TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación 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: **Noe Isaías Quinga Yasig y Miguel Angel Quimbita Panchi**, con el título del Proyecto de Investigación: **"ALGORITMOS DE CONTROL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y CAUDAL EN DEPÓSITOS PARA LÍQUIDOS",** ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido 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, febrero del 2025

Lector 1 (Presidente)
Ing. Castillo Jessica M.Sc.
CC:060459021-6

Lector 2
Ing. Diego Jiménez M.Sc
CC:050349370-2

Lector 3
Ing. Angel León M.Sc
CC: 050204135-3

AGRADECIMIENTO

En el presente trabajo de investigación, agradezco a Dios por ser mi guía y compañero en cada paso de mi vida, brindándome la paciencia y sabiduría necesarias para alcanzar mis metas con éxito. A mis abuelitos, que desde el cielo me cuidan y protegen, dándome fortaleza en los momentos difíciles. Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres, Avelino Quinga e Isolina Yasig, quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio han sido mi pilar fundamental y mi mayor inspiración para seguir adelante. A mis hermanos, Homero Quinga y Sandra Quinga, por su constante apoyo y ejemplo de perseverancia. A mis queridos sobrinos, Mavel Quinga y Alexis Quinga, quienes con su alegría y cariño han sido una motivación especial en este camino. Agradezco de manera especial a mi novia, Erika Tacuri, por su amor, paciencia y aliento incondicional en cada etapa de esta ardua investigación. Mis agradecimientos a todos los docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Carrera de Ingeniería en Electricidad, cuya sabiduría, conocimiento y apoyo me han inspirado a crecer personal y profesionalmente.

Noe Quinga.

AGRADECIMIENTO

En el presente trabajo de investigación agradezco a Dios por ser guía y compañero en el camino de mi vida, dándome la paciencia y sabiduría para perseguir con éxito mis metas, Al Ing. Holger Quimbita Rivera por su apoyo incondicional como amigo y don de persona, gracias por compartir sus conocimientos y guiar en todo el transcurso de la tesis hasta poder culminarla, al Ing. Bryan Guagchinga de igual manera por su apoyo y compartir sus conocimientos en el desarrollo de la tesis. Al Ing. Carlos Quinatoa que no solo fue profesor, también amigo y brindo sus conocimientos y su apoyo en todo momento del transcurso de la carrera. Mis agradecimientos a todos los docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Carrera de Ingeniería en Electricidad, cuya sabiduría, conocimiento y apoyo me han inspirado a crecer personal y profesionalmente.

Miguel Quimbita.

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado a mis queridos padres, María Yasig y Avelino Quinga, quienes, con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio han sido mi mayor fuente de inspiración. Gracias a su dedicación y valores inculcados, he logrado alcanzar mis metas y culminar mi carrera universitaria. Este logro también es suyo, pues sin su apoyo y confianza, este camino no habría sido posible.

Noe Quinga

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación dedico con mucho amor a mi madre Gladys María Panchi, que Dios le tenga en su santa glorias. Que gracias a sus consejos he logrado levantarme y continuar con mis sueños, con el fin de continuar su legado, siempre fue una mujer fuerte y luchadora pese a las circunstancias de la vida, alzaba la mirada y seguía adelante, no conocía el cansancio, tan admirable y hermoso fue su amor que saco adelante a sus hijos sola. Dedico también a mis hermanos Víctor, Richard Quimbita Panchi por ser mi fortaleza y motor de vida que a pesar de los momentos difíciles que vivimos siempre me impulsaron a culminar mi carrera Universitaria.

Miguel Quimbita

RESUMEN

El control de temperatura, presión y caudal en depósitos de líquidos es fundamental en numerosos sectores industriales, desde la producción química hasta la alimentaria. Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente, se emplean algoritmos de control avanzados que permiten regular estas variables en tiempo real.

Uno de los enfoques más utilizados es el control PID (Proporcional, Integral y Derivativo), que ajusta automáticamente la salida del sistema en función de los cambios detectados en la temperatura, presión o caudal. Esto evita fluctuaciones bruscas y optimiza el consumo energético. En sistemas más complejos, se emplean algoritmos predictivos y de control adaptativo, capaces de anticiparse a variaciones y ajustar los parámetros sin necesidad de intervención manual.

En el control de temperatura, los sensores detectan cualquier desviación y ajustan la calefacción o refrigeración para mantener condiciones óptimas. Para la presión, se utilizan válvulas de alivio y bombas que regulan el flujo de líquidos dentro del depósito. En cuanto al caudal, los algoritmos gestionan válvulas y bombas para mantener un flujo constante y evitar sobrecargas o desperdicios.

Gracias a la automatización y el uso de inteligencia artificial, estos algoritmos permiten mejorar la seguridad, reducir costos operativos y garantizar la calidad del producto final. La evolución tecnológica ha llevado a sistemas cada vez más eficientes y precisos, indispensables en procesos donde pequeños cambios pueden generar grandes impactos.

Palabras clave: PID, Sistemas de control continuo, estabilidad, lazos de control.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: 'TITLE: 'TEMPERATURE, PRESSURE AND FLOW CONTROL ALGORITHMS FOR LIQUID TANKS'..

Author(s):

Noe Isaías Quinga Yasig

Miguel Angel Quimbita Panchi.

ABSTRACT

The control of temperature, pressure and flow in liquid tanks is essential in many industrial sectors, from chemical to food production. To ensure safe and efficient operation, advanced control algorithms are used to regulate these variables in real time.

One of the most commonly used approaches is PID (Proportional, Integral and Derivative) control, which automatically adjusts the system output based on detected changes in temperature, pressure or flow rate. This avoids sudden fluctuations and optimises energy consumption. In more complex systems, predictive and adaptive control algorithms are used, capable of anticipating variations and adjusting parameters without the need for manual intervention.

In temperature control, sensors detect any deviations and adjust heating or cooling to maintain optimal conditions. For pressure, relief valves and pumps are used to regulate the flow of liquids inside the tank. For flow, algorithms manage valves and pumps to maintain a constant flow and avoid overloads or waste.

Thanks to automation and the use of artificial intelligence, these algorithms improve safety, reduce operating costs and guarantee the quality of the final product. Technological evolution has led to increasingly efficient and precise systems, which are indispensable in processes where small changes can have a big impact.

Keywords: PID, continuous control systems, stability, control loops

1. ÍNDICE GENERAL ..... **¡Error! Marcador no definido.**
2. INTRODUCCIÓN 1
2.1 Situación problemática 2
2.2 Formulación del problema 4
2.3 OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN 4
2.3.1 Objeto de investigación 4
2.4 BENEFICIARIOS 4
2.4.1 Directo 4
2.4.2 Indirecto 4
2.5 JUSTIFICACIÓN 4
2.6 HIPÓTESIS 5
2.7 OBJETIVOS 5
2.7.1 Objetivo General 5
2.7.2 Objetivo Específicos 5
2.8 Sistema de Tareas 6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 7
3.1 Antecedentes 7
3.2 Controlador PID. 9
3.3 Algoritmo PID. 9
3.4 Sistema de Control en lazo Cerrado 10
3.5 Sistema de Control en lazo abierto 10
3.6 Respuesta transitoria para sistema de Control 11
3.6.1Tiempo de retardo o delay 11
3.6.2 Tiempo de subida 11
3.6.3 Tiempo de pico 12
3.6.4 Tiempo de establecimiento 12

3.1.1 Diseño de sistema de control 12
3.1.2 Señales analógicas 13
3.1.3 Reglas de sintonización 13
3.2 Estabilidad Criterio de Routh Hurwitz 14
3.2.1 Proporcional 14
3.2.2 Modo Integral 14
3.3 Perturbaciones 14
3.4 Matlab 15
3.5 PLCs MicroLogix 15
4. MÉTODOS Y MATERIALES 15
4.1 Métodos 15
4.1.1 Método experimental 16
4.1.2 Método Analítico 16
4.1.3 Método Cuantitativo 16
4.2 Descripción del Proyecto 16
4.3 Variables Independientes 17
4.4 Flujo Grama de Variables de Control 17
4.4.1 Control de Caudal 17
4.5 EL Control de Presión 18
4.5.1 Condiciones iniciales 18
4.5.2 Activación del control de presión: 18
4.5.3 Ajuste automático del sistema: 18
4.5.4 Estabilización y monitoreo: 18
Control de Temperatura 19
4.6 Preparación del sistema: 19
4.7 Medición de la temperatura: 19
4.7.1 Ajuste automático mediante el PID: 19

4.8 Especificaciones Técnicas de sensores 20
4.8.1 Sensores de caudal 20
4.8.2 Sensor de Presión 20
4.8.3 Sensor de Caudal 20
4.9 Especificaciones técnicas de los actuadores 22
4.9.1 Actuador eléctrico de regulación TCR-02T 22
4.9.2 Variador - ATV12 22
4.9.3 Calefón Shiva HMS-B002 22
4.9.4 RONG-LONG (Motor trifásico) 22
4.9.5 Modulo atenuador 22
4.9.6 PLC Micrologix 1100 23
4.9.7 Arduino nano. 23
4.9.8 Rele- G2R-(S) 23
4.9.9 Especificaciones de los Software. 26
4.10 Obtención de Datos de Entrada y Salida de las variables caudal, presión y temperatura. 28
4.10.1 Datos de lazos de control caudal. 28
4.10.2 Comportamiento de curvas del caudal 28
4.10.3 Datos de lazos de control presión 29
4.10.4 Comportamiento de curvas de Presión 29
4.10.5 Datos de lazos de control temperatura. 30
4.11 Método para la Obtención de transferencia de caudal, presión y temperatura. 31
4.11.1 Función de transferencia caudal 31
4.11.2 Función de transferencia obtenida 32
4.11.3 Estabilidad de función de transferencia 32
4.11.4 Criterio de polos y ceros para lazo de caudal 33
4.11.5 Criterio Routh Hurwitz 33

4.11.6 Función de transferencia presión 34
4.11.7 Función de transferencia obtenida 34
4.11.8 Criterio de polos y ceros para lazo de caudal 35
4.11.9 Criterio Routh-Hurwitz 35
4.11.10 Función de Transferencia de Temperatura 35
4.11.11 Función de transferencia obtenida 36
4.11.12 Criterio de polos y ceros para lazo de Temperatura 36
4.11.13 Criterio Routh-Hurwitz 37
4.11.14 Sincronización de controladores PID. 37
4.11.15 Resultados de sintonización de lazos de control 38
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 39
5.1 Pruebas de comportamiento de los algoritmos de lazos de control 39
5.2 Verificación del comportamiento del algoritmo en el lazo de control (caudal) 39
5.2.1 Parámetros del sistema caudal 40
5.2.2 Lazo de control de Presión 40
5.2.3 Parámetros del sistema de presión. 41
5.2.4 Lazo de control de Temperatura 42
5.2.5 Parámetros del sistema temperatura 42
5.2.6 Comportamiento del sistema ante perturbaciones 43
5.2.7 Perturbación en el lazo de control caudal 43
5.2.8 Perturbación en el lazo de control presión 44
5.2.9 Perturbación en el lazo de control temperatura 46
5.2.10 Comportamiento del sistema ante cambio del SET POINT 47
5.2.11 Cambio del SET POINT en lazo de control de caudal 47
5.2.12 Cambio del SET POINT en lazo de control de presión 48
5.2.13 Cambio del SET POINT en lazo de control de temperatura 48
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 49

6.1 CONCLUSIONES 49

6.2 RECOMENDACIONES 49

7. REFERENCIAS 51

ÍNDICE FIGURAS

Figura 3.2: Sistema lazo abierto[6] 11

Figura 3.3 Sistema de control con realimentación[7] 12

Figura 3.4: señal analógica 13

Figura 3.5: Extracción de señales DC[8] 13

Figura 4.3: Diagrama de flujo de la variable Temperatura 20

Figura 4.4: Obtención de datos para obtener la función de transferencia(caudal) 28

Figura 4.5: Líneas de comportamiento del caudal y la apertura de la electroválvula de caudal 29

Figura 4.6: Obtención de datos para obtener la función de transferencia Variable (Presión) 29

Figura 4.7: líneas de comportamiento del caudal y la apertura de la válvula de (Presión). 30

Figura 4.8: Obtención de datos para obtener la función de transferencia (temperatura) 31

Figura 4.9: líneas de comportamiento del caudal y la temperatura de la electroválvula (temperatura) 31

Figura 4.10: Comportamiento de la función de transferencia de Caudal. 32

Figura 4.11: Función de transferencia de la variable caudal en Simulink-Matlab 32

Figura 4.12: Diagrama de polos y ceros (caudal) 33

Figura 4.13: Lineas de comportamiento del caudal y la apertura de la valvula (Presión). 34

Figura 4.15: Diagrama de polos y ceros para Presión. 35

Figura 4.16: Comportamiento de la función de transferencia de la variable (Temperatura) 36

Figura 4.17: función de transferencia de segundo orden aplicado para la variable (temperatura) 36

Figura 4.18: Líneas de comportamiento del caudal y la apertura de la válvula (Temperatura). 37

Figura 5.1: Comportamiento del lazo de control de caudal sintonizado 40

Figura 5.3: Parámetros de la función de transferencia de la temperatura..... 42

Figura 5.4: Diagrama de conexiones del lazo se control de caudal..... 44

Figura 5.5: Comportamiento del lazo de control de caudal ante una perturbación. 44

Figura 5.6: Diagrama de conexiones del lazo se control de presión 45

Figura 5.7: Comportamiento del lazo de control de presión ante una perturbación..... 45

Figura 5.8: Diagrama de conexiones del lazo se control de temperatura 46

Figura 5.9: Comportamiento del lazo de control de temperatura ante una perturbación 47

Figura 5.10: Comportamiento del lazo de control de caudal ante un cambio en el Set Point. 48

Figura 5.12 Cambio de Set-Point en la variable de temperatura 49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campos de la Ciencias y Tecnología UNESCO[1] 1

Tabla 2. Sistema de tareas 6

Tabla 4: Datos obtenidos bajo el criterio de Routh Hurwitz Para Caudal 33

Tabla 5: Criterio de Routh-Hurwitz aplicado para la variable de presión 35

Tabla 6: datos aplicados bajo el criterio de Routh-Hurwitz para (Temperatura) 37

Tabla 7: Datos de las tres variables de la función de transferencia sintonizada. 39

Tabla 8: Datos adquiridos de la función de transferencia del caudal. 40

Tabla 9: Datos de la variable presión. 41

Tabla 10: Valores de la variable de temperatura. 43

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema de proyecto: Algoritmos de control de temperatura, presión y caudal en depósitos para líquidos.

Modalidad de titulación

Propuestas tecnológicas	
Proyectos de Investigación	x

Carrera:

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto: ALGORITMOS DE CONTROL DE TEMPERATURA, PRESION Y CAUDAL EN DEPOSITOS PARA LIQUIDOS.

Equipo de Trabajo:

Estudiantes: Noe Isaías Quinga Yasig

Miguel Angel Quimbita Panchi

Tutor de Titulación: PhD. Secundino Marrero

Consultor: Ing. Eduardo Hinojosa

Área de Conocimiento:

Tabla 1. Campos de la Ciencias y Tecnología UNESCO[1]

07 ingeniería, Industria y Construcción	071 ingeniería y Profesiones Afines	0713 electricidad y Energía.
		0714 electrónica y automatización

Línea de investigación: Procesos Industriales

Sublíneas de investigación de la Carrera: Control y optimización en el uso de la energía del sector Industrial, comercial y residencial.

2. INTRODUCCIÓN

En la industria, los procesos que involucran depósitos de líquidos, como el almacenamiento, transporte y transformación de fluidos, dependen críticamente de

parámetros como temperatura, presión y caudal. Estas variables son fundamentales para garantizar la calidad del producto, la eficiencia energética y la seguridad del sistema.

2.1 Situación problemática

Las instalaciones industriales a menudo se encuentran atrapadas en un ciclo de desafíos que dificultan el control efectivo de variables críticas como la temperatura, la presión y el caudal. Este problema se ve acentuado por la variabilidad inherente de las condiciones ambientales. Por ejemplo, una planta de procesamiento de líquidos puede enfrentarse a cambios bruscos en la temperatura debido a factores climáticos, lo que no solo altera las propiedades físicas y químicas de los líquidos, sino que también puede llevar a un deterioro en la calidad del producto final. La falta de un sistema de control robusto que anticipe y responda a estas fluctuaciones puede resultar en ineficiencias operativas y, en última instancia, en pérdidas económicas. Además, el desgaste de los componentes mecánicos juega un papel crucial en la capacidad de una instalación para mantener un funcionamiento óptimo. Con el tiempo, las bombas, válvulas y otros elementos mecánicos pueden sufrir fallos o malfuncionamientos, lo que complica aún más la situación. En este contexto, la integración de sensores y controladores modernos se convierte en un aspecto esencial. Sin embargo, muchas instalaciones todavía luchan con la falta de cohesión entre estos elementos, lo que impide una supervisión y un control efectivos. La fragmentación en la tecnología utilizada puede hacer que las industrias se sientan estancadas, incapaces de beneficiarse plenamente de los avances en automatización y control.

A pesar de los esfuerzos por implementar algoritmos avanzados y sistemas de control, las industrias siguen enfrentando barreras significativas, especialmente en entornos donde los recursos son limitados y las configuraciones son complejas. La ausencia de modelos matemáticos adecuados y la falta de estrategias de control eficientes, como controladores PID adaptativos o sistemas basados en inteligencia artificial, pueden llevar a una gestión ineficaz de los procesos. Esto no solo pone en riesgo la rentabilidad de la empresa, sino que también plantea serios desafíos en términos de sostenibilidad y seguridad. Las consecuencias pueden ser devastadoras, no solo en el ámbito económico, sino también en el impacto ambiental y en la salud de los trabajadores, lo que destaca la urgencia de abordar estos problemas de manera integral y proactiva. La situación se complica aún más cuando se considera el contexto global en el que operan muchas de estas instalaciones. A medida que las industrias se esfuerzan por adaptarse a normativas

ambientales cada vez más estrictas, la presión por optimizar sus procesos y reducir las emisiones se vuelve inminente. Sin embargo, el desafío de integrar tecnologías de control avanzadas se convierte en una barrera significativa. Muchas instalaciones no cuentan con el personal capacitado ni con la infraestructura adecuada para implementar estas soluciones, lo que perpetúa un ciclo de ineficiencia y compliance deficiente. La falta de inversión en formación y actualización tecnológica puede llevar a que las empresas se queden atrás en un mercado cada vez más competitivo.

Además, la resistencia al cambio por parte de los empleados y la dirección puede ser otro obstáculo crítico. En muchas ocasiones, los trabajadores se sienten inseguros ante nuevas tecnologías y métodos de trabajo, lo que puede generar un ambiente de desconfianza y resistencia. Esta situación no solo frena la implementación de mejoras tecnológicas, sino que también puede afectar la moral del equipo. La clave para superar estas barreras radica en fomentar una cultura organizacional que valore la innovación y la formación continua, donde cada miembro del equipo se sienta parte del proceso de cambio y mejora.

Finalmente, la interconexión de sistemas y la digitalización de procesos ofrecen una oportunidad única para abordar estos desafíos de manera más eficaz. La implementación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) puede proporcionar datos en tiempo real que permiten un monitoreo constante de las variables críticas. Con un enfoque en la recopilación y análisis de estos datos, las industrias pueden anticipar problemas antes de que ocurran y ajustar sus operaciones en consecuencia. Aunque esta transformación digital requiere una inversión inicial considerable, los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia, reducción de costos y mejor gestión de recursos pueden ser significativos. La capacidad de adaptarse a un entorno en constante cambio no solo es crucial para la supervivencia de las empresas, sino que también contribuye a un futuro más sostenible para la industria en su conjunto.

2.2 Formulación del problema

¿De qué manera el diseño e implementación de algoritmos de control para la regulación de variables como la temperatura, presión y caudal en depósitos de líquidos, puede contribuir a mejorar la eficiencia operativa de los procesos industriales y garantizar la estabilidad y seguridad de las operaciones en distintas condiciones de trabajo?

2.3 OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de investigación

Estudio de los sistemas de control aplicados a las siguientes variables: Temperatura Presión y Caudal.

Campo de Acción

El campo de acción para el proyecto: 330000 ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas.

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directo

Los beneficiarios directos son los estudiantes de la Carrera de electricidad (500 estudiantes).

2.4.2 Indirecto

Los beneficiarios indirectos son estudiantes de ingeniería, docentes, profesionales, organizaciones que emplean los sistemas de control.

2.5 JUSTIFICACIÓN

El control PID representa una solución efectiva y ampliamente utilizada para el control de sistemas de fluidos. Su capacidad para mantener la precisión, estabilidad y robustez, junto con su versatilidad y facilidad de implementación, lo convierten en una herramienta esencial para garantizar el funcionamiento óptimo de una amplia gama de aplicaciones industriales. El seguimiento de las normas IEEE, asegura que los sistemas sean seguros, y confiables.

La aplicación de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) en un sistema de fluidos se justifica por su capacidad para lograr un control preciso y estable de variables críticas como el caudal, la presión y temperatura. La acción integral del PID corrige errores persistentes, asegurando que el sistema alcance y mantenga el punto de consigna deseado. Esto es crucial en aplicaciones donde se requiere una precisión constante, como

la dosificación de productos químicos o el mantenimiento de niveles en tanques de almacenamiento.

La operación derivativa permite predecir las variaciones ante un el error, aliviando a amortiguar las oscilaciones y reducir el sobreimpulso. Esto es esencial para prevenir daños en los equipos y para garantizar la estabilidad del proceso. La acción proporcional proporciona una respuesta inmediata a los cambios en el error, lo que permite al sistema adaptarse rápidamente a las perturbaciones y a los cambios en el punto de consigna.

Al realizar esta investigación se considera diferentes aspectos de confiabilidad y estabilidad realizando casos de estudio que permitan determinar un control optimo del proceso.

2.6 HIPÓTESIS

Se espera que un controlador PID, con parámetros ajustados mediante el método de sintonización de Ziegler- Nichols o un método similar, sea capaz de mantener la variable de procesos (por ejemplo, caudal, presión o nivel) de un sistema de control de fluidos dentro de un rango de error estacionario aceptable, con un tiempo de respuesta rápido y un Sobreimpulso mínimo, en presencia de perturbaciones y cambios en el punto de consigna.

2.7 OBJETIVOS

2.7.1 Objetivo General

Evaluar un sistema de control PID para las variables de Presión, Caudal y Temperatura del módulo de fluidos en el Laboratorio de Automatización CIYA.

2.7.2 Objetivo Específicos

1. Determinar el estado del arte en función de los sistemas de control aplicados en fluidos.
2. Obtener las funciones de transferencia de las variables de temperatura, caudal y presión de un sistema de fluidos en lazo cerrado´
3. Diseñar la planta considerando criterios de estabilidad aplicando un controlador PID.
4. Validar el funcionamiento de la planta a través de casos de estudio.

2.8 Sistema de Tareas

Tabla 2. Sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividades (Tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Determinar el estado del arte en función de los sistemas de control aplicados en fluidos.	Investigación de los parámetros, normativas y requerimientos utilizados en los sistemas de control.	Desarrollo de un marco teórico.	Tesis Artículos Manuales Libros
Obtener las funciones de transferencia de las variables de temperatura, caudal y presión de un sistema de fluidos en lazo cerrado	Determinación de los componentes, equipos y materiales necesarios para la construcción y óptimo funcionamiento del módulo.	Listado de materiales y dispositivos que son parte del módulo. Funciones de transferencia	Utilización de software de control Matlab
Diseñar la planta considerando criterios de estabilidad aplicado un controlador PID	Definición cada uno de los elementos que están ubicados en el módulo como ensamble y la utilización.	Manual de Practicas Documentación escrita, gráfica y modulo finalizado. Diagramas de flujo.	Software Rs Logix 500 Factory Talk View Studio Microsoft Excel
Validar el funcionamiento de la planta a través de casos de estudios.	Ubicación de diferentes SetPoint considerando las variables.	Monitoreo y control de HMI	RS Logix 500 Factory Talk

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo analiza los fundamentos de los sistemas de control aplicados en procesos de lazo cerrado.

3.1 Antecedentes

En Ecuador, se llevó a cabo un artículo científico cuyo objetivo fue comprender de manera práctica los algoritmos de control PID. Este estudio se centró en el control de dos lazos: el nivel y el caudal de agua. El autor, Rogger José Andrade Cedeño, ingeniero en Electrónica y Control, presentó su trabajo en la Revista RIEMAT[2].

En su artículo titulado "Módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua, mediante sistema SCADA, PLC y algoritmo PID", Andrade Cedeño propuso un innovador módulo didáctico. Este módulo integra un controlador lógico programable (PLC), algoritmos PID y sistemas SCADA, además de varios componentes de medición y control, como un sensor transmisor de presión diferencial, un medidor de caudal tipo turbina, válvulas de control, una bomba centrífuga y un computador personal.

Gracias a la combinación de estos elementos, el autor logró implementar el control a través de un algoritmo PID, realizando diversas pruebas para evaluar el comportamiento del sistema ante perturbaciones y variaciones en el punto de consigna. La investigación se enmarca en un enfoque aplicado-experimental.

Los resultados obtenidos revelaron que, para el control de nivel, fue necesario sintonizar el algoritmo con los siguientes valores: Kc=5, Ti = 0.2 y Td = 0.02. Para el control caudal, los valores de sintonización fueron Kc = 0.2, Ti = 0.08 y Td = 0. Con estos ajustes, Andrade Cedeño logró una respuesta óptima tanto en estado transitorio como en estado estacionario, evidenciando la efectividad de su propuesta[2].

En la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, se desarrolló un proyecto de titulación titulado “Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y nivel de agua en la planta de llenado de tanques del laboratorio de automatización industrial utilizando un algoritmo PID”. Este trabajo fue elaborado por Carlos Andrés Viñán Velasco y Ronald Darío Alvarado Bajaña, bajo la dirección del Ing. Byron Lima Cedillo, MSc., en el año 2018

El objetivo principal de este proyecto fue controlar el nivel y la temperatura del agua mediante un algoritmo PID y lazos de control en una planta de llenado de tanques. Los autores se centraron en el control de estas variables críticas, utilizando la función ident de

Matlab para determinar la función de transferencia, a partir de muestras de datos tomadas de la señal PRBS. Los resultados obtenidos revelaron que, al aplicar los parámetros encontrados, el control tanto del nivel como de la temperatura logró una precisión excelente, con un margen de error por debajo del 5%.

En Chile, específicamente en la ciudad de La Serena, durante el año 2014, se llevó a cabo una investigación titulada "Sistema Didáctico de Control de Presión". El objetivo principal del estudio fue diseñar e implementar un sistema de control de presión con arquitectura abierta, capaz de integrar software y hardware para crear una plataforma flexible y adaptable al avance de la tecnología. Este sistema fue concebido como una herramienta de aprendizaje que permite desarrollar prácticas y proyectos de investigación en controladores digitales, virtuales y otros, basados en estándares de instrumentación.

El trabajo destacó la importancia de la medición y control de presión en procesos industriales, considerando aspectos clave como la seguridad operativa y la optimización de recursos. Los resultados obtenidos demostraron que el sistema permite comprender y conceptualizar eventos industriales, explorar efectos de modificaciones y estimular la creatividad en los estudiantes. Además, el sistema favorece la enseñanza de controladores PID y otras tecnologías, mientras se adapta a nuevas necesidades educativas y de investigación[3].

La historia del control PID se remonta al siglo XVIII, cuando se utilizaba retroalimentación mecánica en la industria para controlar procesos, aunque únicamente con acciones Proporcional e Integral o Proporcional y Derivada. En 1911, Elmer Sperry desarrolló el control PID completo para automatizar la dirección de barcos en la Armada de los Estados Unidos, integrando las tres acciones en un sistema que compensaba variaciones y predecía futuros cambios. Más tarde, Nicolas Minorsky formalizó este control con una ecuación matemática que sigue siendo fundamental.

En la actualidad, el control PID es ampliamente utilizado en procesos industriales, como en petroquímicas, plantas de pulpa o sistemas de saneamiento, gracias a su capacidad para reducir errores y estabilizar procesos. Aunque existen métodos más avanzados, su eficacia, facilidad de configuración y robustez hacen que siga siendo el estándar en el 90% de los circuitos de control en la industria[3].

3.2 Controlador PID.

Un controlador PID es un mecanismo de control que opera mediante un lazo de retroalimentación, también conocido como control de tres términos. Este tipo de controlador se basa en tres componentes fundamentales.

En primer lugar, se encuentra el controlador proporcional (Kp), que se encarga de acelerar la respuesta inicial del sistema, lo que ayuda a reducir el tiempo de elevación. En segundo lugar, está el control derivativo (Kd), que agrega estabilidad al sistema al disminuir los sobrepicos y mejorar la respuesta transitoria. Por último, el término de control integral (Ki) juega un papel importante al eliminar el error de estado estacionario.

Estos tres componentes permiten que el controlador PID ajuste su salida de manera efectiva, garantizando un rendimiento óptimo en diversas aplicaciones. De esta forma, el controlador PID se convierte en una herramienta invaluable en el ámbito de la automatización y el control de procesos[4]

3.3 Algoritmo PID.

El algoritmo de control PID, presentado en la ecuación 1, es uno de los algoritmos lineales más comunes y ampliamente utilizados para gestionar lazos de retroalimentación o lazos cerrados. En la primera parte de la ecuación, $Ke(t)$ representa la componente proporcional, que se refiere al error actual del sistema.

La segunda parte de la ecuación, $\frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)\,dt$, corresponde a la componente integral, la cual acumula la suma de todos los errores a lo largo del tiempo, ayudando a eliminar el error persistente. Por último, la última parte de la ecuación, $K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$ representa la componente derivativa, que actúa en función de la velocidad del error, anticipándose a cambios futuros.

Estas tres componentes permiten que el controlador PID ajuste su salida de manera efectiva, garantizando un desempeño óptimo en diversas aplicaciones de control[4].

$$u(t) = Ke(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)\,dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

Donde:

$e(t)$: Es la señal de error entre la consigna y la salida de la planta.

$u(t)$: Es la salida del controlador

$K\,p$: La ganancia proporcional.

$T\,i$: La constante de tiempo integral.

Td: La constante de tiempo derivativa.

3.4 Sistema de Control en lazo Cerrado

Un sistema de control a lazo cerrado es un mecanismo que utiliza la señal de salida como referencia para tomar decisiones a través del controlador, permitiendo así ajustar su funcionamiento. En este contexto, el controlador compara la señal de salida con un valor previamente establecido, conocido como Set Point, que representa el objetivo que se desea alcanzar[5].

Si el valor de salida no coincide con el Set Point, el sistema calcula el error y a partir de esta información, procede a realizar los ajustes necesarios en el sistema o proceso como se puede observar en la figura 3.1. De esta manera, el sistema de control a lazo cerrado se convierte en una herramienta eficaz para mantener la estabilidad y el rendimiento deseado, adaptándose a las variaciones y garantizando que se alcancen los objetivos establecidos[6].

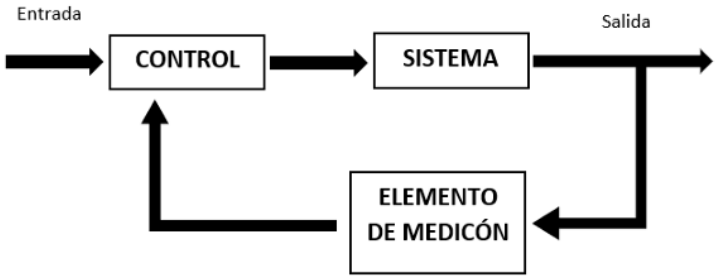


Figura 3.1: Lazo cerrado

En la figura 1 se presenta un diagrama que ilustra la estructura de un sistema de control a lazo cerrado. En este diagrama, se puede observar la presencia de un elemento de medición o retroalimentación, el cual juega un papel crucial en la regulación del comportamiento del sistema. A través del controlador, este elemento permite ajustar y mantener la salida en el nivel deseado. Así, el sistema se asegura de que su funcionamiento se mantenga dentro de los parámetros establecidos, adaptándose a las variaciones y garantizando un rendimiento óptimo

3.5 Sistema de Control en lazo abierto

El sistema de control a lazo abierto se caracteriza por la ausencia de retroalimentación, lo que significa que la salida del sistema no influye en el control del proceso. En este tipo

de sistema, las acciones de control se realizan de manera manual o se definen previamente, sin ajustes basados en el resultado actual.

Para identificar la respuesta del proceso, se introduce una perturbación, que actúa como un cambio en las condiciones del sistema como se puede observar en la figura 3.2. Al observar cómo reacciona el sistema ante esta perturbación, es posible modelar matemáticamente su comportamiento. Esta modelización permite entender mejor las dinámicas del proceso y prever cómo responderá ante diferentes situaciones, aunque sin la capacidad de corregir el curso de acción en tiempo real[6]

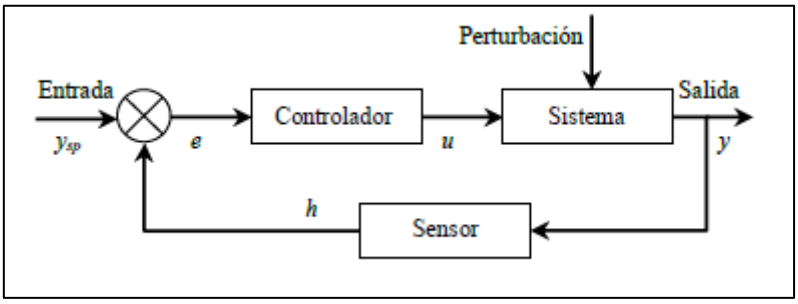


Figura 3.2: Sistema lazo abierto[6]

3.6 Respuesta transitoria para sistema de Control

La respuesta transitoria de un sistema de control es el comportamiento de la señal de salida antes de que alcance un estado estable. En otras palabras, es la parte inicial de la salida del sistema antes de llegar a ese equilibrio.

La respuesta de un sistema de control se divide en dos partes: la respuesta transitoria, que cambia con el tiempo y depende de ciertos factores como el tiempo de subida, el tiempo de retardo, el tiempo pico y el tiempo de establecimiento, entre otros; y la respuesta estable, que se caracteriza por no cambiar con el tiempo. Esta última representa la fase final de la señal de salida, en la cual el sistema ya se ha estabilizado.

3.6.1Tiempo de retardo o delay

Se conoce como tiempo de retardo al periodo que transcurre hasta que una señal alcanza el 50% de su valor final tras la aplicación de una acción de control. Esta acción puede ser, por ejemplo, el accionamiento de una válvula o cualquier otra intervención que genere una respuesta en el sistema.

3.6.2 Tiempo de subida

Se denomina tiempo de subida al periodo que necesita la señal de salida de un sistema para aumentar desde el 10% hasta el 90% de su valor final y, posteriormente, estabilizarse.

3.6.3 Tiempo de pico

Se denomina tiempo pico al periodo que tarda la respuesta de un sistema en alcanzar su valor máximo antes de comenzar a descender hacia un rango de estabilidad.

3.6.4 Tiempo de establecimiento

Se conoce como tiempo de establecimiento al periodo que transcurre hasta que un sistema se estabiliza o alcanza su valor final previamente establecido. Este proceso se considera completo cuando la respuesta del sistema se sitúa dentro de un rango del 2% al 5% del valor de estabilidad

La entrada escalón indica un comportamiento o una referencia constante introducidos al sistema, mientras que la entrada rampa supone una referencia con variación continua en el tiempo, y la entrada se caracteriza por ser una señal de prueba con magnitud muy grande y duración corta. La función respuesta de impulso o función de transferencia es la representación matemática del sistema[6]

3.1.1 Diseño de sistema de control

Al diseñar un sistema de control, lo esencial es estudiar minuciosamente la planta, es decir, entender qué hace, qué tipos de variables disponen y cuales son importantes, cuáles son sus limitaciones, su capacidad, las condiciones necesarias que se aplicaría para un óptimo funcionamiento, que su sistema sea seguro y confiable. El objetivo de control puede ser regular o seguir una trayectoria. Como es nuestro caso de estudio, aplicando tres variables, de caudal, presión y temperatura con el objetivo que las variables sigan un patrón preestablecido, sin importar las perturbaciones que puedan presentarse como se puede observar en la figura 3.3 [7].

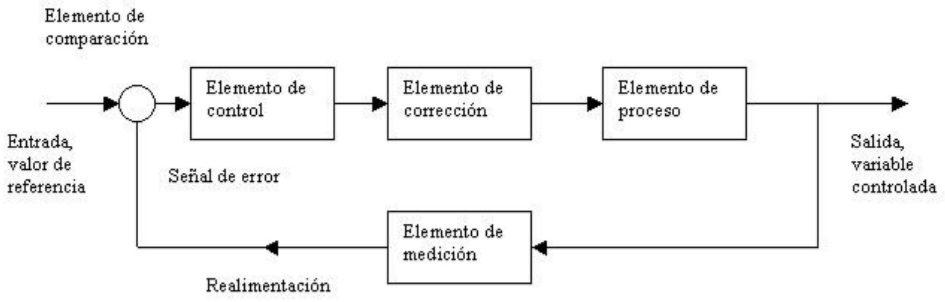


Figura 3.3 Sistema de control con realimentación[7]

3.1.2 Señales analógicas

Las señales analógicas son señales que su variación, de amplitud, en el transcurso del tiempo, es continua, por lo que este tipo de señal permite tomar valores en tiempo real en cualquier momento del tiempo como se puede observar en la figura 3.4.

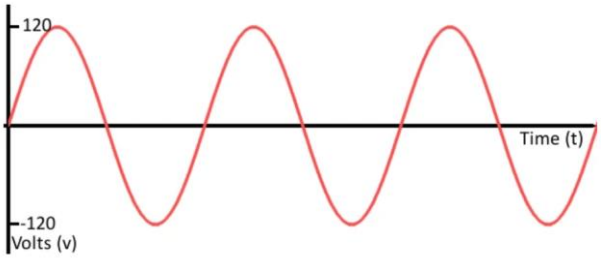


Figura 3.4: señal analógica

La señale en DC da a comprender que se encuentran en un estado estacionario y varían minuciosamente en el tiempo. Es caracterizada por su tipo de señal, ya que la información que transporta se encuentra en función de nivel o amplitud por un tiempo determinado, en cualquier escenario, por lo cual es evidente que el instrumento monitoriza su señal y nos remite datos que indican la magnitud de señal en determinados tiempos como se puede evidenciar en la figura 3.5 [8].

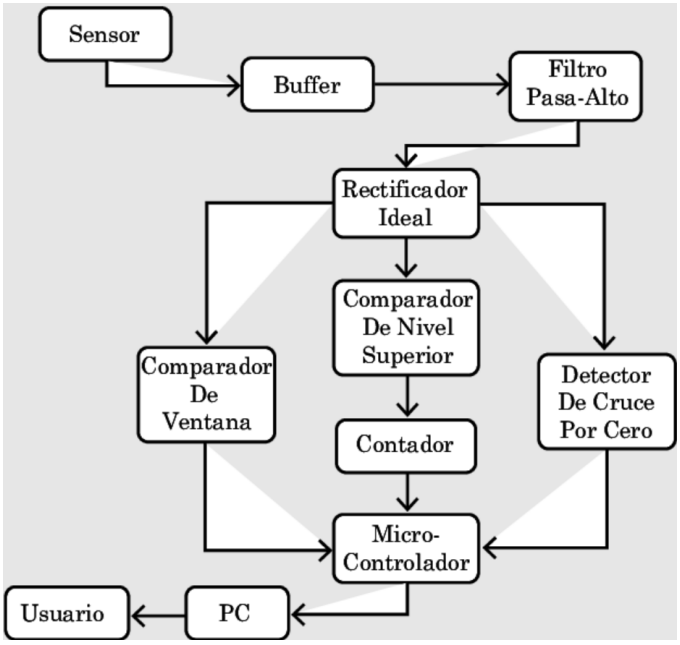


Figura 3.5: Extracción de señales DC[8]

3.1.3 Reglas de sintonización

Acorde a su desarrollo tecnológico a permitido que el controlador PID, cree varias funciones de transferencia, a comparación con Ziegler-Nichols en sus evaluaciones que en el transcurso del tiempo a determinado que sus modelos son de primer orden.[9].

3.2 Estabilidad Criterio de Routh Hurwitz

En un sistema lineal determinado los polos se encuentran en el semiplano derecho, provocando que con el tiempo el sistema se vuelva inestable, lo que contrae que su respuesta sea transitoria que crece sin control y oscile cada vez más. Pero si los polos se encuentran en otro escenario es decir se ubican el semiplano izquierdo el sistema es estable, considerando que su respuesta no sea optima[10].

3.2.1 Proporcional

El proporcional consiste en que el resultado entre la señal de error y la constante proporcional permite que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en gran parte de los casos sus valores serán aceptables para cada rango, pero también existe valor límite en la constante proporcional.

En caso de que sobre pase los limites superiores no deseados, este creara sobreoscilaciónes sobre el sistema de control.

3.2.2 Modo Integral

El modo Integral permite introducir un desfase de 90 grados a su respuesta, por lo cual al sumarse a los 180 grados de retroalimentación negativa, hace que el sistema obtenga un retraso de 270 grados, por lo que significa que en un tiempo estable del proceso, integra 90 grados de retardo , el comportamiento del sistema empieza a generar oscilaciones al sistema, Para evitar este tipo incidentes y el proceso se estabilice, la ganancia total del sistema debe mantenerse por debajo de un valor minio a 1, y como resultado, apoyaría a reducir la salida del controlador y mantener el sistema estable[10].

3.3 Perturbaciones

Las acciones externas que no pueden ser controladas deliberadamente son conocidas como perturbaciones. Estas perturbaciones pueden influir negativamente en el valor de salida de un sistema y, por lo general, pueden ser detectadas a través de variables medibles.

Las perturbaciones se dividen en dos categorías: medidas y no medidas. Las perturbaciones medidas son aquellas que se pueden cuantificar y monitorear, lo que permite a los sistemas de control ajustarse en consecuencia. Por otro lado, las perturbaciones no medidas son aquellas que no se pueden rastrear directamente, lo que puede complicar la gestión del sistema y su rendimiento como se puede observar en la figura 3.6 [7].

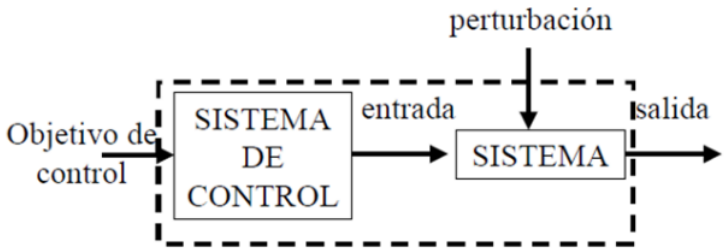


Figura 3.6: Diagrama de perturbación.

3.4 Matlab

Es un Software que se caracteriza y destacadas por el manejo de datos básicos, que se representan como arreglos, como vectores y matrices. Esto significa que no es necesario declarar variables ni gestionar la memoria manualmente. Esta capacidad permite manipular vectores y matrices de manera intuitiva.

Hoy en día, MATLAB va más allá de la simple solución de ejercicios matemáticos. Su constante desempeño en mejorar hoy Matlab crea una variedad de herramientas que permite facilitar la integración con otros softwares permitiendo interactuar entre si sus datos en tiempo real, con el fin de obtener soluciones rápidas y óptimas[11]

3.5 PLCs MicroLogix

De la Familia MicroLogix, el PLC1100 se pude definir que son uno de los instrumentos más completos que nos permite, aplicar distintos protocolos de comunicación como son por ethernet, Profibus y protocolos en señales de RS485 y RS232, el mencionado dispositivo es utilizado en las pequeñas industrias[12].

Los modelos MicroLogix 1200 y 1500 cuentan con entradas y salidas discretas integradas en el controlador.

4. MÉTODOS Y MATERIALES

En esta sección se describen de manera detallada los pasos a seguir para la elaboración del proyecto de investigación, con el objetivo de desarrollar algoritmos de control de temperatura, presión y caudal en depósitos para líquidos. Se especifican las modelaciones, cálculos, simulaciones y experimentaciones necesarias, así como los recursos requeridos para la implementación de la solución.

4.1 Métodos

En la elaboración del proyecto científico se utilizaron diferentes métodos que define los principios del método científico, el mismo que incluye:

4.1.1 Método experimental

El estudio del método experimental nos permite realizar pruebas prácticas para evaluar el desenvolvimiento de un control PID en un sistema incorporado real, por ejemplo, en un sistema de control de líquidos, con tres tipos de variables como: caudal, presión y temperatura. En el transcurso de evaluación del sistema experimental, se analizaron factores como el tiempo de respuesta, sobreimpulso y estabilidad en el sistema, permitiendo un adecuado control y su efectividad en su desempeño. Es evidente que las pruebas realizadas fueron fundamentales para validar que el sistema diseñado cumple con los requisitos de estabilidad y eficiencia ante su implementación final.

4.1.2 Método Analítico

Es evidente que el método analítico permite modelar matemáticamente el comportamiento de un sistema en funcionamiento. Por medio de uso de ecuaciones diferenciales se desarrolló la función de transferencia, permitiendo analizar su dinámica e implementar estrategias adecuadas. Acorde a su enfoque facilito optimizar el control PID. Ya que permitió obtener los parámetros de sintonización, que garantizara una respuesta estable y eficiente.

4.1.3 Método Cuantitativo

El estudio del método cuantitativo permite la adquisición o recopilación de varios datos numéricos para su análisis, con aquellos datos adquiridos en simulaciones y pruebas experimentales, se pudo evaluar las variables de caudal, presión y caudal, en varios escenarios operáticos consiguiendo que sus resultados fueran significativos.

4.2 Descripción del Proyecto

El presente estudio tiene como objetivo diseñar algoritmos de control para tres lazos de control independientes: con las variables de caudal, presión. Por tal motivo es necesario adquirir datos para determinar el comportamiento y reacción en la curva a medida que pasa el tiempo. Este proceso tiene como finalidad utilizar los datos recopilados para obtener la función de transferencia relacionada con el comportamiento de reacción de cada lazo de control.

Posteriormente, se empleará la herramienta MATLAB, específicamente la función ident, para extraer la función de transferencia introduciendo los polos y los ceros. Luego, se utilizará la función PID tuner para sintonizar los controladores, buscando una respuesta más rápida, con menos transitorios y más estable. Esto permitirá determinar los

parámetros Kp, Ki y Kd, que corresponden a las acciones proporcional, integral y derivativa.

Finalmente, se aplicarán estos parámetros sintonizados a los controladores y se analizará la respuesta del sistema al introducir una perturbación o un cambio en el SetPoint.

4.3 Variables Independientes

SetPoint de temperatura, presión y caudal.

Ganancias del controlador PID.

Tipo de perturbaciones introducidas al sistema.

Variables dependientes:

Tiempo de establecimiento.

Sobreimpulso.

Error en estado estacionario.

Estabilidad del sistema

4.4 Flujo Grama de Variables de Control

En la figura 4.1 se puede evidenciar el diagrama de flujo de la variable de control de caudal en donde se puede evidenciar principalmente

4.4.1 Control de Caudal

Para regular el flujo de agua como se puede observar en la figura 4.1 primero se enciende el motor que impulsa el líquido a través de la tubería. Al pasar por el sensor de flujo, se mide la cantidad de agua que circulante y se compara con el valor del objetivo SetPoint. Si hay desviaciones, el PID ajusta el sistema automáticamente para mantener el caudal.

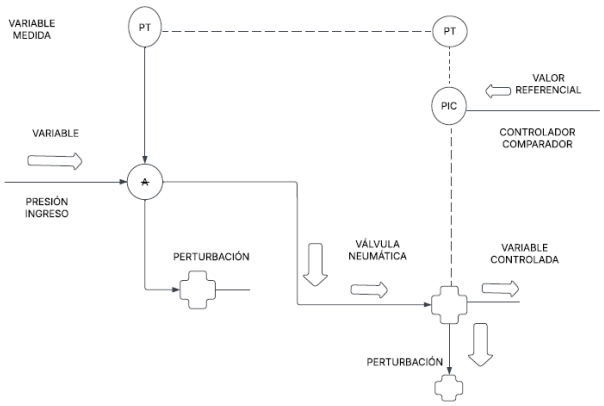


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la variables Caudal.

4.5 El Control de Presión

En el sistema sigue un procedimiento automatizado para garantizar estabilidad y eficiencia en la operación. A continuación, se detallan los pasos clave de su funcionamiento:

4.5.1 Condiciones iniciales

El sistema inicia con la presión en un estado neutro o dentro de un rango esperado.

La electroválvula 2 se encuentra abierta, permitiendo el flujo normal de líquido dentro del depósito o tubería.

4.5.2 Activación del control de presión:

Se cierra la electroválvula 2, restringiendo el paso del líquido en una sección específica del sistema.

Esto genera una variación de presión dentro del circuito, la cual es detectada por el sensor TP1.

Medición y envío de datos: El sensor TP1 mide la presión en tiempo real y transmite los datos al SetPoint del sistema de control como se ilustra en la figura 4.2. Este valor se compara con el punto de referencia previamente establecido en el controlador PID.

4.5.3 Ajuste automático del sistema:

Si la medida de presión es superior o inferior al punto de ajuste, el PID calcula la acción correctiva necesaria.

Dependiendo del resultado, el sistema puede:

- Abrir o cerrar otras válvulas para regular el flujo.
- Ajustar la velocidad de una bomba para equilibrar la presión.
- Active una válvula de alivio en caso de sobrepresión para evitar daños en el sistema.

4.5.4 Estabilización y monitoreo:

Una vez que la presión alcanza el valor deseado, el PID mantiene los parámetros en equilibrio, realizando ajustes menores si es necesario. El usuario puede monitorear en tiempo real la respuesta del sistema y verificar su correcta interacción. Este proceso asegura que la presión se mantenga dentro de los rangos óptimos, evitando fluctuaciones que puedan afectar la eficiencia o seguridad del sistema.

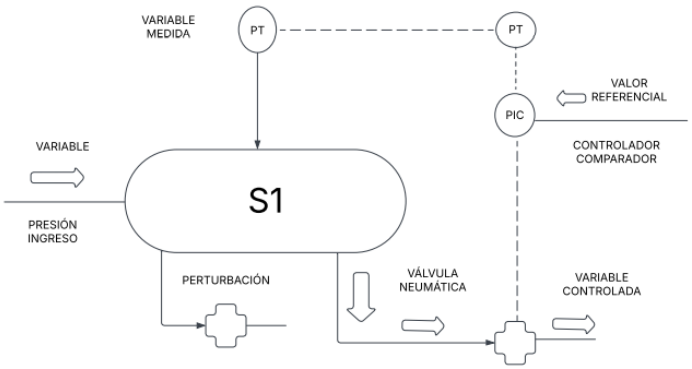


Figura 4.2: Diagrama de flujo de las variables Presión

Control de Temperatura

En el sistema se realiza mediante un procedimiento automatizado que garantiza que el agua no supere los 20°C

4.6 Preparación del sistema:

Se cierra la válvula manual V5, evitando el flujo de agua por una ruta alternativa. Simultáneamente, se abre la válvula V6, permitiendo que el agua fluya a través de la electroválvula 3.

4.7 Medición de la temperatura:

A medida que el agua circula, el sensor TT1 mide la temperatura en tiempo real.

Los datos obtenidos son enviados al SetPoint donde se comparan con el valor de referencia programado (máximo 20°C).

4.7.1 Ajuste automático mediante el PID:

Si la medida de temperatura es superior al SetPoint, el PID activa las correcciones necesarias en el sistema. Dependiendo de la desviación, el sistema puede:

- Abrir o cerrar válvulas para aumentar o reducir e
- Activar un sistema de enfriamiento si e
- Mantenimiento de condiciones óptimas:
- Una vez alcanzada la temperatura deseada, el PID Sigue Realizando
- Esto asegura que la temperatura del agua no supere los 20°C.

Gracias a este procedimiento, el sistema mantiene un control preciso de la temperatura, a continuación, en la figura 4.3 se puede evidenciar el sistema de control de la variable temperatura.

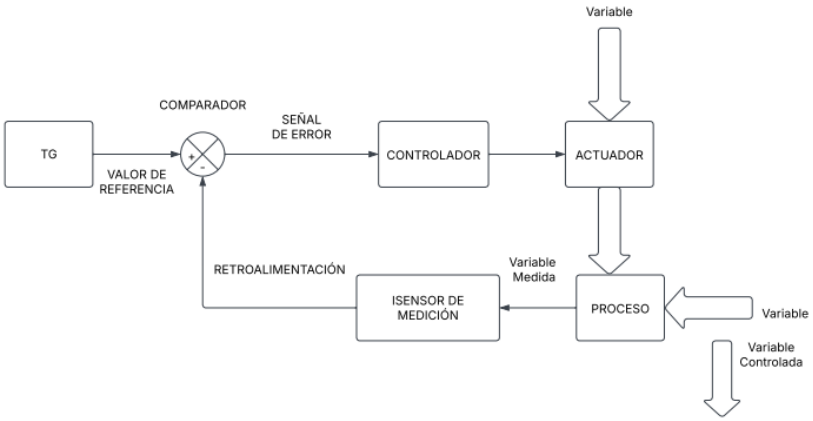


Figura 4.3: Diagrama de flujo de la variable Temperatura

4.8 Especificaciones Técnicas de sensores

4.8.1 Sensores de caudal

Sensor de Caudal YF-S201

Este tipo de sensor es un medidor de flujo, que permite tomar datos por medio de su interfaz con sensores que sirven para medir el flujo acorde a su identificación de cables: el rojo (es la entrada por donde ingresa el voltaje), negro es la tierra o conocida también como GND y el cable de color amarillo permite una salida de pulsos generando una onda cuadrada. Su pulso es aproximadamente de 2,25 mililitros.

El sensor tiene la capacidad de ser controlado por Arduino, por medio de programación, para poder obtener los valores de flujo.

4.8.2 Sensor de Presión

Sensor LD 301Es un transmisor de flujo y presión inteligente que permite diferentes mediciones ofreciendo un funcionamiento seguro. Su tecnología digital nos da acceso a varios funcionamientos, permitiendo una adecuada interfaz entre Sala de control y campo.Este tipo de sensor permite que la variable del proceso se compare con un valor (SetPoint), permitiendo actuar sobre su señal de salida, de acuerdo a un algoritmo PID[13].

4.8.3 Sensor de Caudal

Sensor de Temperatura TSP-321 es un sensor que soporta grandes temepraturas y presiones, sus valores son calculados dependiendo de la velosidad del flujo, presión, y temperaturas producidas por el proceso. Gracias a sus caracteristicas de aislamiento mineral y envoltura Plastica, garantiza una alta resistencia a las vibraciones a todos los elementos medidores de sensores TSP. El tipo de respuesta del sensor de temperatura

acorde a su extructura de la punta permite alcanzar una transmision termica muy buena. Su rango permitido en ambito de conexiones electricas es de -40 a 176º[14].

SENSORES	ESPECIFICACIONES
 Modelo: Sensor LD 301	**Fluido de Proceso** • Líquido, gas o vapor **Señal de salida** • 4 mA mínimo a 20 mA como máximo a dos hilos **Alimentación** • 12 a 45 Vdc.
 Modelo: YF-S201	**Voltaje de operación** • Voltaje 5V-18Vdc **Consumo de corriente** • 15mA (5V) **Volumen promedio por pulso** • 2.25Ml **Presión de trabajo máximo** • 25ºC a 80ºC

 Sensor de Temperatura TSP-321	**Salida de sensor directa** • HART de 4 a 20 mA Profibus **Temperatura de transporte** -20 a 70ºC (-4 a 158ºF)

4.9 Especificaciones técnicas de los actuadores

4.9.1 Actuador eléctrico de regulación TCR-02T

Es un actuador eléctrico destinado para motorizar válvulas de ¼ de vueltas con un par de 20 Nm (Newton metro) en función de control.

Es un motor que se utiliza para controlar la posición de la valvula en función de una entrada de 4-20 mA o 0-10V

4.9.2 Variador - ATV12

El variador está diseñado para un motor de 0.5 hp a una tensión de 240V mono y trifásico, dispone una compactibilidad electromagnética y con funciones dedicadas a 3 macros de aplicación PID. El mencionado dispositivo nos permite varia de 0 a 50 Hz.

4.9.3 Calefón Shiva HMS-B002

El calefón trabaja con un Voltaje de 220V con una potencia de 3500W, con una capacidad de 4 lt/min.

4.9.4 RONG-LONG (Motor trifásico)

Motor trifásico de o.5 Hp con una potencia de 0,37W, con un voltaje de 220V Conexión delta estrella este motor creara el flujo del líquido necesario para los 3 lazos de control.

4.9.5 Modulo atenuador

El módulo atenuador tiene una entrada que va a la salida del PLC conde la señal de voltaje es de 0 a 10V y una salida de 110/220V para el control del calefón eléctrico.

4.9.6 PLC Micrologix 1100

El PLC es el cerebro de nuestros lazos de control están conectados a nuestros actuadores y sensores con los cuales es posible un control PID, este cuenta con 10 entradas digitales y 2 entradas analógicas adicionalmente 6 salidas digitales más la comunicación en varios tipos de protocolos de comunicación.

4.9.7 Arduino nano.

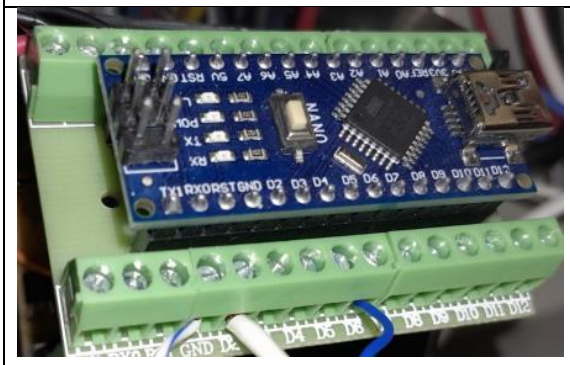
El Arduino Nano cuenta con una placa basada en el microcontrolador ATmega 328P, teniendo un voltaje de operación de hasta 5V. Incluye 14 pines digitales y 8 pines analógicos, y tiene una RAM de 6KB. Este Arduino se utilizará principalmente para medir el control del caudal en un lazo de control.

4.9.8 Rele- G2R-(S)

El relé G2R-(S) cuenta principalmente con un indicador mecánico incorporado para observar el estado del relé. Posee 1 polo y maneja una corriente de hasta 10A con un voltaje de control de 24V. Estos relés servirán principalmente para el sistema de control de todos los lazos que se van a gestionar.

ESPECIFICACIONES TECNICAS DE ACTUADORES	
ACTUADORES	**CARACTERISTICAS**
 Actuador eléctrico de regulación TCR-02T	**Torques (Nm)** • 20 Nm **Voltaje** • 24Vac-dc **Ajuste de señal** • 4 a 20 mA **Tiempo de maniobra (s)** • 10 (s)

  Variador - ATV12	**Alimentación eléctrica de consigna para potenciómetro de referencia.** • ± 5 % **Corriente máxima** • 10mA **Salida lógica** • Tensión 24V (máxima 30 V) **Impedancia** • 1kΩ, máximo 10mA
  alefón Shiva HMS-B002	**Capacidad** • 4 lt/min **Potencia máxima** • 3000 Watts **Voltaje** • 220V
 RONG-LONG (Motor trifásico)	**Características eléctricas** • **Potencia 0,37W** • **Caballos de fuerza Hp 0,5** **Frecuencia** • **Hz 50** **Conexión** • D/Y **Voltaje 22oV**
ESPECIFICACIONES TECNICAS DE CONTROLADORES	

 Modulo atenuador	**Control Modulación por ancho pulso (PWM)** Canal 3,3 V/V CA 50 Hz **Ingreso de voltaje** 220V 110
 PLC Micrologix 1100	**Entradas y salidas (E/S)** • E/S digitales 10, puntos. • 4 entradas analógicas dos de voltaje y corriente. **Comunicación** • RS 232- RS 480 • Voltaje de línea 120/240 Vca • Entrada de voltaje 24Vcc
 **Arduino nano.**	• Micro controlador • Voltaje de entrada de 5 a 12V • Pines digitales 6 • Pines análogos 8 • Puerto 1 de Hardware

 Rele- G2R-(S)	**Interfaz** • 2 polos **Tensión de bobina** • 24V • Corriente nominal de transporte 10 A • Tensión de servicio DC • Resistencia de la bobina de 253Ω
 Fuente de alimentacion SND5-24-100P	**Potencia de salida** • 120W **Voltaje de entrada** • 230 VAC **Número de salidas** • 1 output • Voltaje de salida 24Vdc • Corriente de salida 5 A

4.9.9 Especificaciones de los Software.

MATLAB	• Lenguaje de programación de alto nivel basado en matrices. • Entorno interactivo con editor de scripts y depurador. • Compatibilidad con programación estructurada, orientada a objetos y funcional.

	• Compatible con familias SLC 500 y MicroLogix (1000, 1100, 1200, 1400, 1500). • Lenguaje principal: Diagrama de Escalera (Ladder Logic, LD). Funcionalidad para creación, edición, simulación y monitoreo de programas.
	• Creación de pantallas gráficas interactivas para monitoreo y control. • Animaciones avanzadas para visualización en tiempo real. • Administración de alarmas y eventos. • Registro y tendencias históricas de datos. • Seguridad basada en usuarios con permisos personalizados. • Compatible con EtherNet/IP, ControlNet, DeviceNet y DF1. • Conectividad con PLCs Allen-Bradley: ControlLogix, CompactLogix, SLC 500 y MicroLogix. • Integración con OPC DA/UA para comunicación con otros sistemas.

4.10 Obtención de Datos de Entrada y Salida de las variables caudal, presión y temperatura.

4.10.1 Datos de lazos de control caudal.

En la figura 4.4 se puede apreciar los parámetros que se introdujeron para el proceso de obtención de datos. En este caso, para recopilar los datos de entrada, se consideró el porcentaje de apertura del actuador eléctrico modulante, el cual controla el flujo que pasa a través del sistema. En cuanto a la salida del sistema de control, se tomaron en cuenta las señales del sensor de caudal.

Para obtener estos datos, se configuró el actuador modulante en un 25% de apertura y se procedió a la recolección de datos sobre la curva de comportamiento. En total, se registraron alrededor de 294 datos, lo que permitirá desarrollar posteriormente una función de transferencia más confiable.

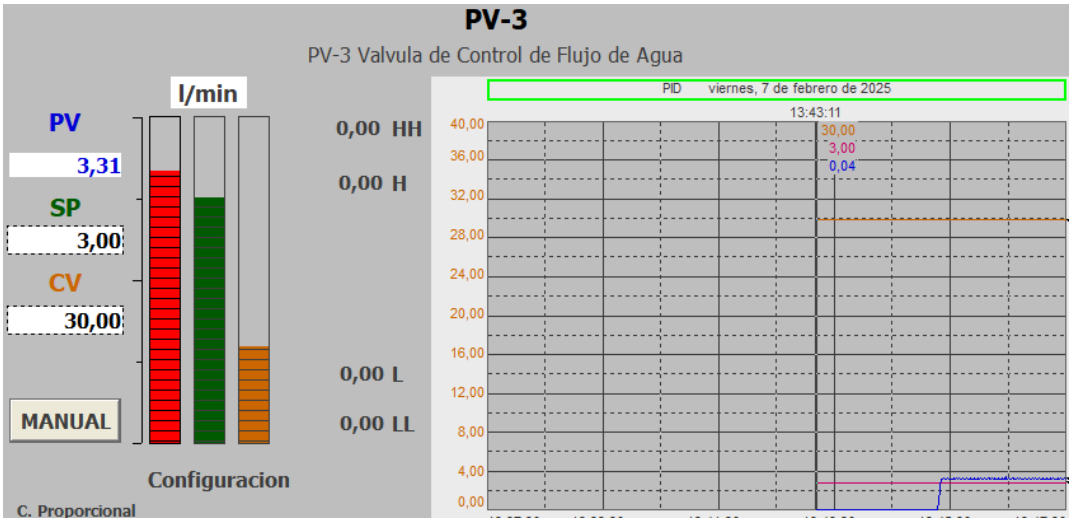


Figura 4.4: Obtención de datos para obtener la función de transferencia(caudal)

4.10.2 Comportamiento de curvas del caudal

Cuando el lazo de control de caudal inicia su operación y se procede a abrir la válvula, se observa que, en un corto período, presenta una subida con una pendiente muy pronunciada, estabilizándose de forma casi inmediata, como se puede apreciar en la figura 4.5. Esto se debe a que la respuesta del sensor al flujo de agua es rápida, lo que permite que este tipo de lazo sea uno de los más veloces en actuar.

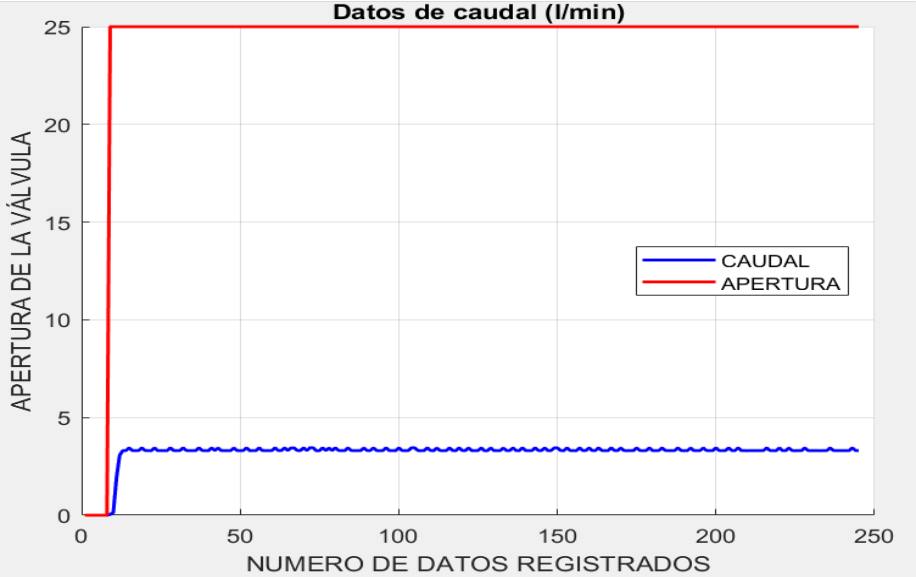


Figura 4.5: Líneas de comportamiento del caudal y la apertura de la electroválvula de caudal

4.10.3 Datos de lazos de control presión

En el caso del lazo de control de presión, se configurará el parámetro de apertura del actuador modulante eléctrico en un 75%. Esto nos permitirá observar el comportamiento de la curva de estabilidad y obtener datos que serán procesados posteriormente. Para los valores de entrada, se considerará la apertura del actuador, mientras que los valores de salida serán los datos registrados por el sensor de presión. De esta manera, podremos determinar la función de transferencia del sistema como se evidencia en la figura 4.6.

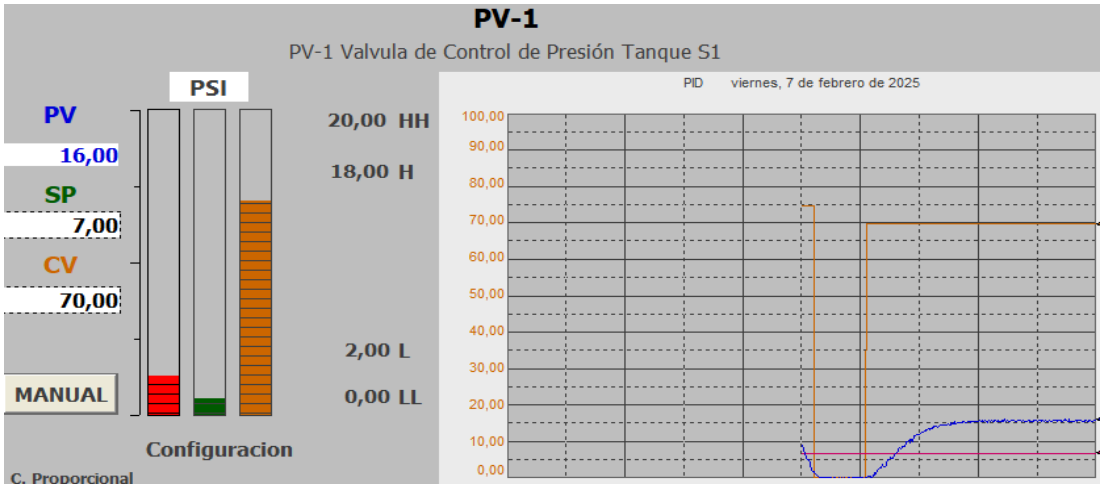


Figura 4.6: Obtención de datos para obtener la función de transferencia Variable (Presión)

4.10.4 Comportamiento de curvas de Presión

La apertura del actuador, al igual que en el caso del caudal, se mantiene constante en el valor previamente definido para observar la evolución y comportamiento de la presión.

En este caso como se puede observar en la figura 4.7 la curva de presión presenta un comportamiento más lento, tardando más tiempo estabilizarse.

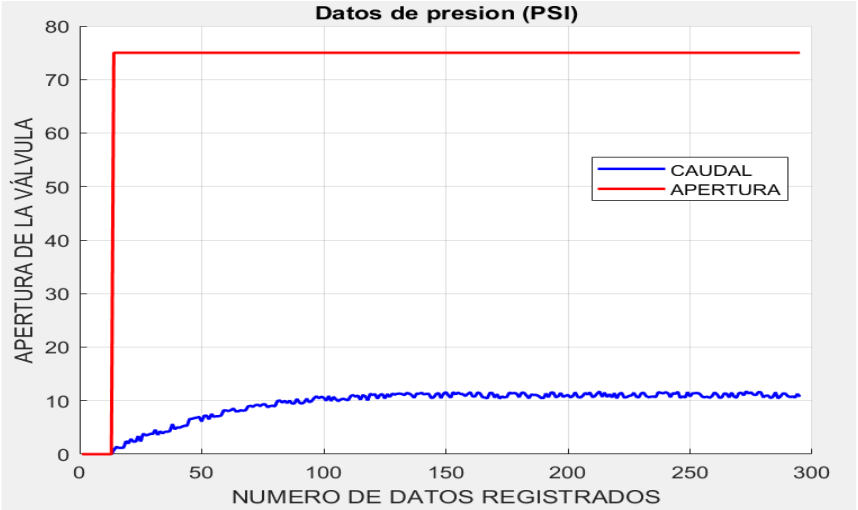


Figura 4.7: líneas de comportamiento del caudal y la apertura de la válvula de (Presión).

4.10.5 Datos de lazos de control temperatura.

Para el lazo de control de temperatura, es importante considerar que el sistema está compuesto por un calentador de agua que funciona a 120V y un sensor de temperatura. Para obtener los datos necesarios para la función de transferencia, se inyectarán porcentajes de voltaje al calefón que van dese 0% siendo este 0V a 100% ciento este 120V en este caso se aplicó un 90% de voltaje para que tenga una respuesta rápida al cambio de temperatura, el porcentaje aplicado representa aproximadamente 106V de corriente alterna a la salida posteriormente se registrará la medición de la temperatura en °C.

En la figura 4.8 se puede apreciar el porcentaje de voltaje que se usó para poder proceder al registro de los datos de salida, para este caso fue necesario recopilar más datos que en los casos anteriores, ya que esta variable es una de las que más tiempo tarda en estabilizarse. Esto se debe a que el líquido, en este caso el agua, debe calentarse en todo el sistema, lo que lleva su tiempo. Sin embargo, alrededor de una hora se puede observar cómo la función se logra estabilizar, lo que permite tratar los datos para obtener nuestra función de transferencia.

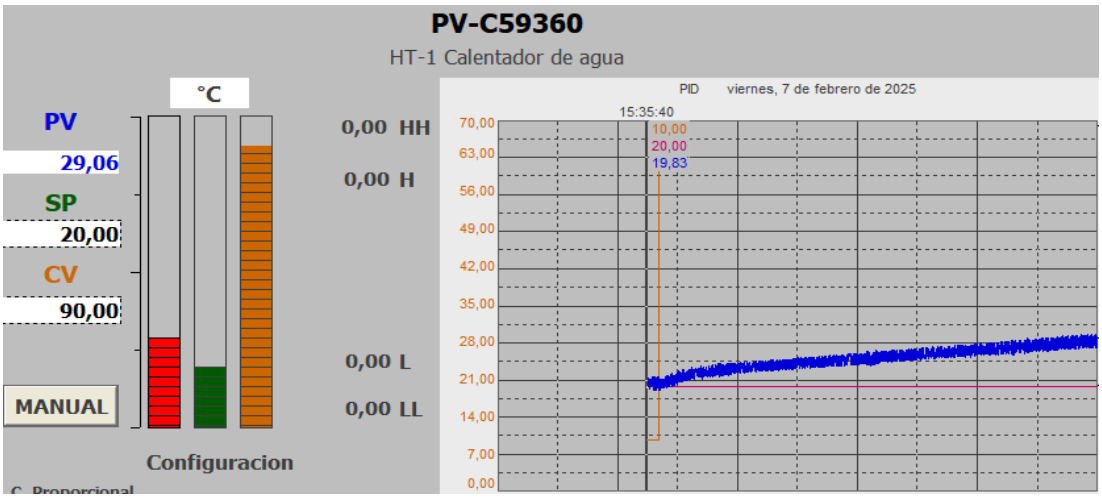


Figura 4.8: Obtención de datos para obtener la función de transferencia (temperatura)

Comportamiento de curvas de temperatura

La curva de temperatura como se puede observar en la figura 4.9 tarda muchísimo en estabilizarse debido a la acumulación y disipación del calor que absorbe el tanque TQ4 sin embargo al pasar un cierto tiempo la curva llega a su punto de estabilización y la curva de la apertura de nuestro actuador eléctrico como en los anteriores casos se mantiene lineal y a un porcentaje del 90%.

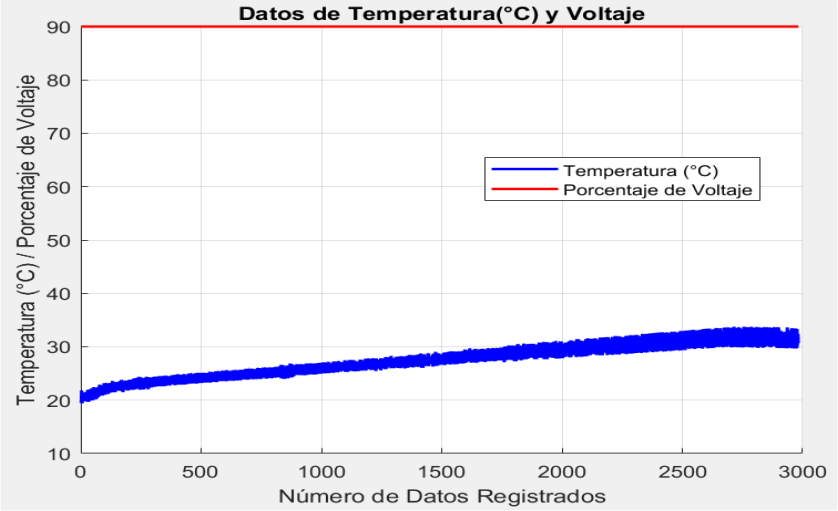


Figura 4.9: líneas de comportamiento del caudal y la temperatura de la electroválvula (temperatura)

4.11 Método para la Obtención de transferencia de caudal, presión y temperatura.

4.11.1 Función de transferencia caudal

Para la identificación de nuestra función de transferencia en el caudal, se utilizaron 236 datos de caudal, tomando como entrada la apertura de nuestro actuador eléctrico de

regulación y como salida los datos proporcionados por nuestro sensor de caudal. Con esto, se procede a exportar la información a MATLAB y se utiliza la función System Identificación, empleando 2 polos y un cero con el propósito de obtener la función de transferencia de segundo orden. Como se ilustra en la figura 4.10, se obtuvo un porcentaje de estimación de aproximadamente 76.13%, lo que indica que esta función de transferencia está bien estimada y será útil para realizar el control en nuestro lazo de caudal.

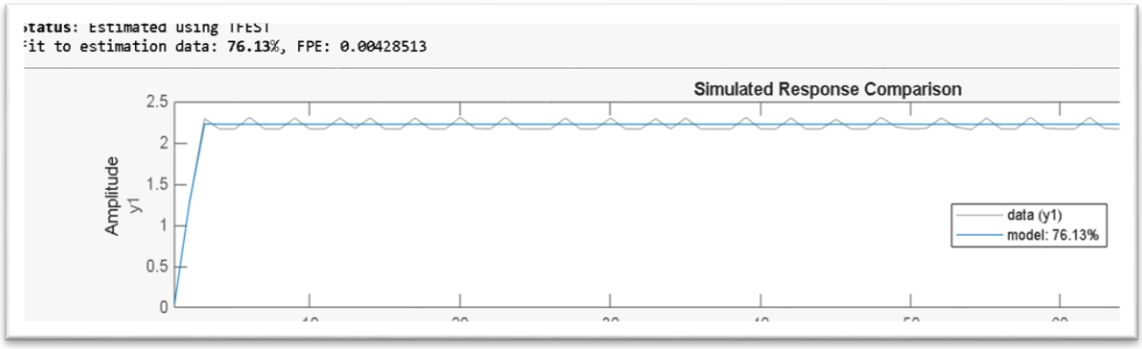


Figura 4.10: Comportamiento de la función de transferencia de Caudal.

4.11.2 Función de transferencia obtenida

A continuación, se presenta la función de transferencia obtenida tras el proceso de recolección de datos y la utilización de la función *System Identification* de MATLAB. Esta función de transferencia es de segundo orden, con un cero real positivo y dos polos. Esto proporciona un modelo adecuado para el comportamiento del sistema y permitirá realizar un control efectivo en el lazo de caudal como se ilustra en la figura 4.1.

```
From input "u1" to output "y1":
   -2.83 s + 2.437
---------------------
s^2 + 9.818 s + 27.41
```

Figura 4.11: Función de transferencia de la variable caudal en Simulink-Matlab

4.11.3 Estabilidad de función de transferencia

En este apartado, utilizaremos el criterio de polos y ceros, así como la tabla de Routh-Hurwitz, para determinar la estabilidad de cada uno de nuestros lazos de control. Además, este análisis nos permitirá evaluar si las funciones de transferencia obtenidas son adecuadas para calcular nuestros parámetros PID.

4.11.4 Criterio de polos y ceros para lazo de caudal

Para el criterio de estabilidad de una función de transferencia, es fundamental considerar que, si los polos se encuentran en el semiplano izquierdo, se puede afirmar que la función es estable. En la figura 4.12, se puede observar la ubicación de nuestros polos, los cuales están se evidencia en el semiplano del lado izquierdo. Por lo tanto, es evidente que el sistema es estable, los polos en esa posición presentan un comportamiento oscilatorio amortiguado. Es decir, a medida que pasa el tiempo, el sistema se amortigua y se estabiliza, evitando un comportamiento exponencial.

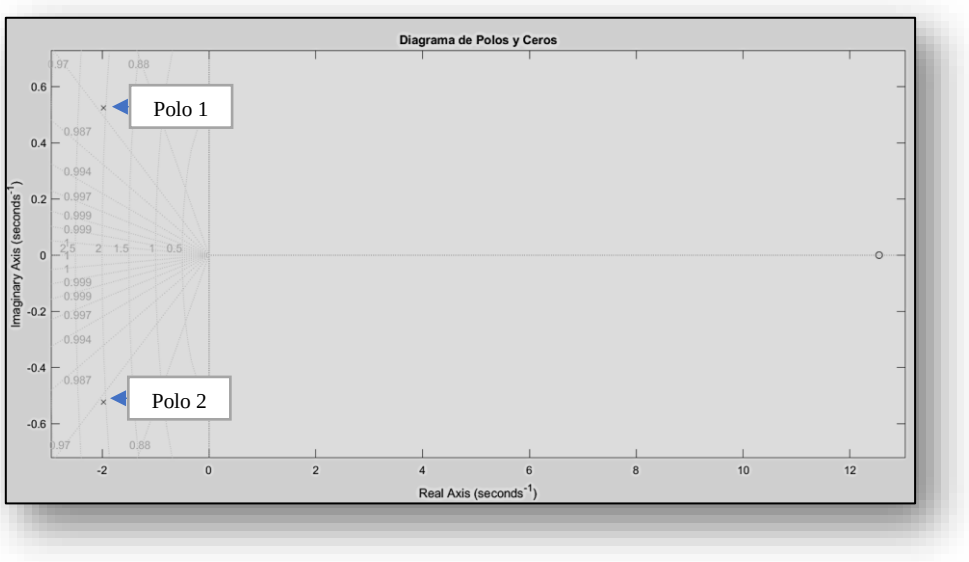


Figura 4.12: Diagrama de polos y ceros (caudal)

4.11.5 Criterio Routh Hurwitz

En la tabla 4, podemos identificar los datos correspondientes a la tabla de Routh-Hurwitz. En esta tabla, se observa que todos los valores en la primera columna son positivos y no se identifica ningún cambio de signo. Por lo tanto, podemos afirmar que el sistema es estable.

Tabla 3: Datos obtenidos bajo el criterio de Routh Hurwitz Para Caudal

Tabla de Routh-Hurwitz	
10.000	0.0011
0.0550	0
0.0011	0

4.11.6 Función de transferencia presión

Para la identificación de la función de transferencia de la presión, se tomaron en cuenta 282 datos del comportamiento de la salida del sensor de presión a lo largo del tiempo. Primero, exportamos todos los datos recopilados a MATLAB y llamamos a la función de identificación de sistemas (System Identification). Durante este proceso, cargamos los datos de entrada y salida al sistema, trabajando nuevamente con 2 polos y un cero para que nuestra función sea de segundo orden.

Tras realizar este proceso, se obtuvo una estimación de la función de transferencia del 84.8%, lo que representa una mejora en comparación con la estimación anterior del caudal, que fue de 76.13%. En la figura 4.13, se puede observar la gráfica de la estimación de nuestra función, la cual tiene un error de predicción total de 0.151703. Con esta estimación, procederemos a trabajar.

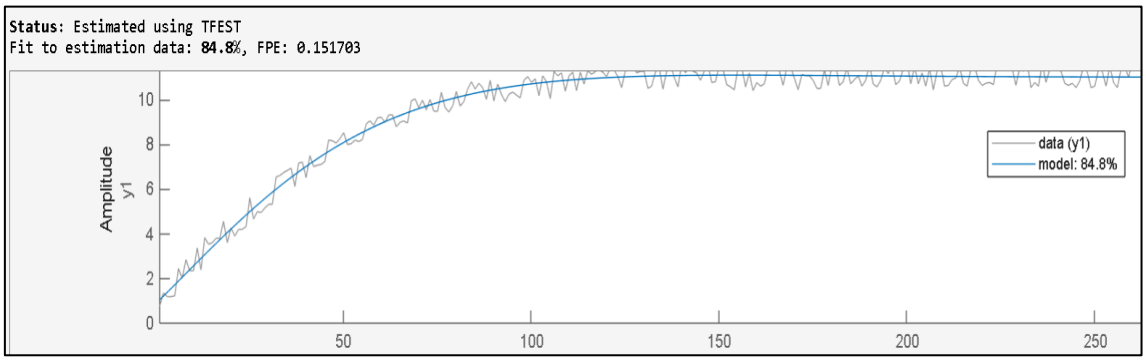


Figura 4.13: Líneas de comportamiento del caudal y la apertura de la válvula (Presión).

4.11.7 Función de transferencia obtenida

La función de transferencia mostrada en la figura 4.14 es el resultado obtenido al introducir nuestros parámetros de entrada y salida, además de nuestros 2 polos y un cero. Esta función es de segundo orden y se encuentra en el dominio de Laplace, lo que indica que es continua. Posteriormente, se llevará a cabo un estudio sobre su estabilidad.

```
From input "u1" to output "y1":
  0.003151 s + 0.0001558
--------------------------
s^2 + 0.05498 s + 0.001062
```

Figura 4.14: Función de transferencia (presión).

4.11.8 Criterio de polos y ceros para lazo de caudal

Para la función del lazo de control de presión se puede observar en la figura 4.15 que efectivamente como en el anterior caso existen 2 polos los cuales se encuentran ubicados en el semiplano izquierdo por lo que se puede afirmar que esta función de transferencia es estable.

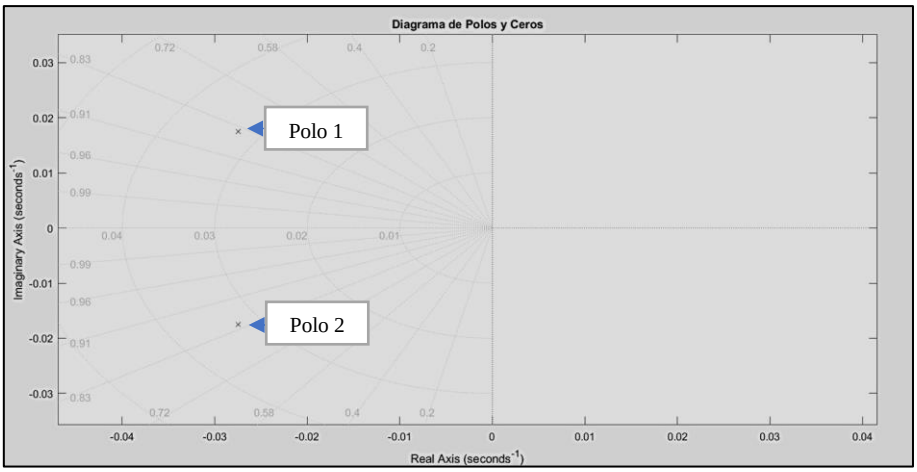


Figura 4.15: Diagrama de polos y ceros para Presión.

4.11.9 Criterio Routh-Hurwitz

Para determinar la estabilidad mediante el método antes mencionado, es fundamental mirar la primera columna de la tabla 5. Si todos los números presentes en dicha columna son positivos y no existe un cambio de signo, se puede afirmar que el sistema es estable. Como se puede observar en la tabla número 5, no hay ningún cambio de signo en los elementos de la columna, lo que confirma la estabilidad del sistema.

Tabla 4: Criterio de Routh-Hurwitz aplicado para la variable de presión

Tabla de Routh-Hurwitz	
1.0000	0.0000
0.0398	0
0.0000	0

4.11.10 Función de Transferencia de Temperatura

Acorde a la función de transferencia obtenida de la variable de temperatura, se tomó en cuenta un porcentaje de voltaje del 90%. Con esta información, se recolectaron datos sobre la apertura del actuador eléctrico modulante y se obtuvieron las respuestas de temperatura a lo largo del tiempo, logrando alrededor de tres mil datos.

Posteriormente, se exportaron los datos a MATLAB para procesarlos. En este paso, se llamó a la función de identificación de sistemas (System Identification), donde se cargaron los datos. Al igual que en los modelos de caudal y presión, se introdujeron 2 polos y 1 cero para obtener una función de transferencia de segundo orden. Esto resultó en un modelo con una estimación del 68%, lo cual consideramos positivo, ya que cualquier estimación superior al 65% es aceptable.

En la figura 4.16 se puede comparar los datos aplicados en MATLAB.

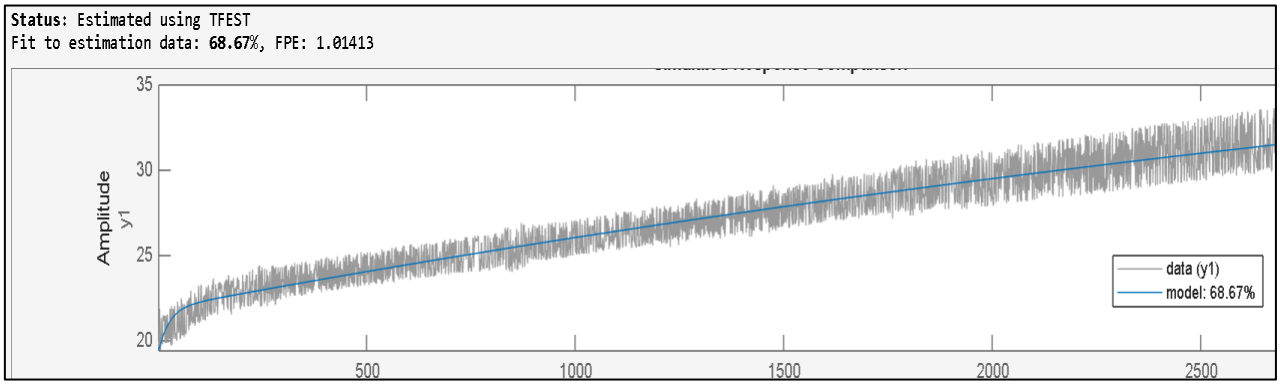


Figura 4.16: Comportamiento de la función de transferencia de la variable (Temperatura)

4.11.11 Función de transferencia obtenida

En la figura 4.17, se puede observar una función de transferencia de segundo orden subamortiguado. Esto se debe a que los datos utilizados para construir esta función provienen del lazo de control de temperatura. Como resultado, se espera que presente una evolución lenta y sin oscilaciones significativas.

```
From input "u1" to output "y1":
  0.009593 s + 3.904e-06
--------------------------
s^2 + 0.03975 s + 7.732e-06
```

Figura 4.17: función de transferencia de segundo orden aplicado para la variable (temperatura)

4.11.12 Criterio de polos y ceros para lazo de Temperatura

En la figura 4.18, podemos observar el diagrama de polos y ceros del lazo de temperatura. Se destaca que los polos se encuentran en el semiplano izquierdo, al igual que en los casos anteriores. Por lo tanto, podemos afirmar que la función mencionada es estable.

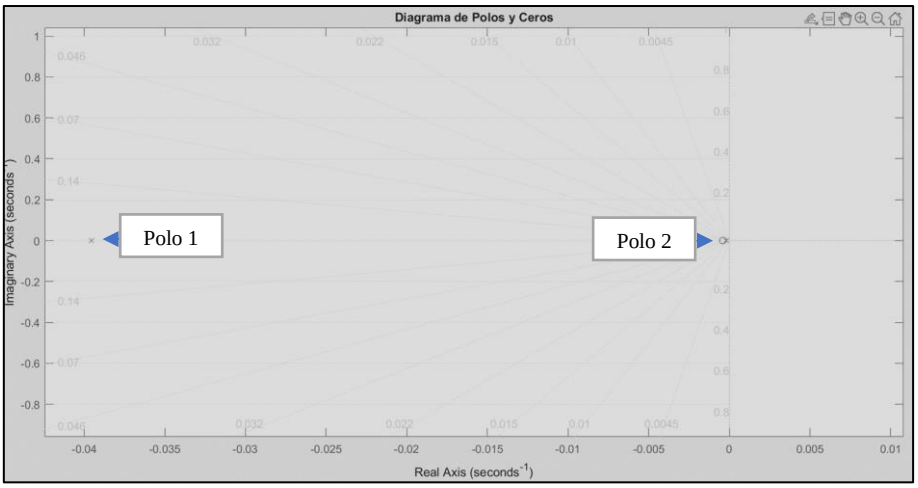


Figura 4.18: Líneas de comportamiento del caudal y la apertura de la válvula (Temperatura).

4.11.13 Criterio Routh-Hurwitz

En la tabla 6, que presenta el análisis de Routh-Hurwitz para el caso de temperatura, se puede destacar que todos los números en la primera columna tienen el mismo signo. Aunque un cambio de signo podría indicar inestabilidad, la ausencia de signos diferentes nos permite afirmar que la función es estable.

Tabla 5: datos aplicados bajo el criterio de Routh-Hurwitz para (Temperatura)

Tabla de Routh-Hurwitz	
1.0000	0.0000
0.0398	0
0.0000	0

4.11.14 Sincronización de controladores PID.

El diagrama de flujo de la figura 4.19 se describe el proceso de ajuste del controlador PID utilizando el método de Ziegler y Nichols de manera estructurada y lógica. Inicia con la definición de la función de transferencia, seguida de la obtención de la respuesta al escalón. Luego, se calcula la derivada numérica para determinar la pendiente máxima. Si no se encuentra está pendiente, se recalcula la derivada hasta obtener un valor válido. A continuación, se determina la constante de tiempo T y el tiempo de retardo L, verificando que T>LT. Si esta condición no se cumple, se vuelve a recalcular la derivada hasta obtener valores adecuados. Una vez validados, se calculan los parámetros del controlador PID (Kp,Ki,Kd) y se muestran los resultados en pantalla. Finalmente, el proceso concluye con

la visualización de la respuesta al escalón y la tangente utilizada en los cálculos, asegurando que el ajuste PID se realice de manera efectiva y precisa.

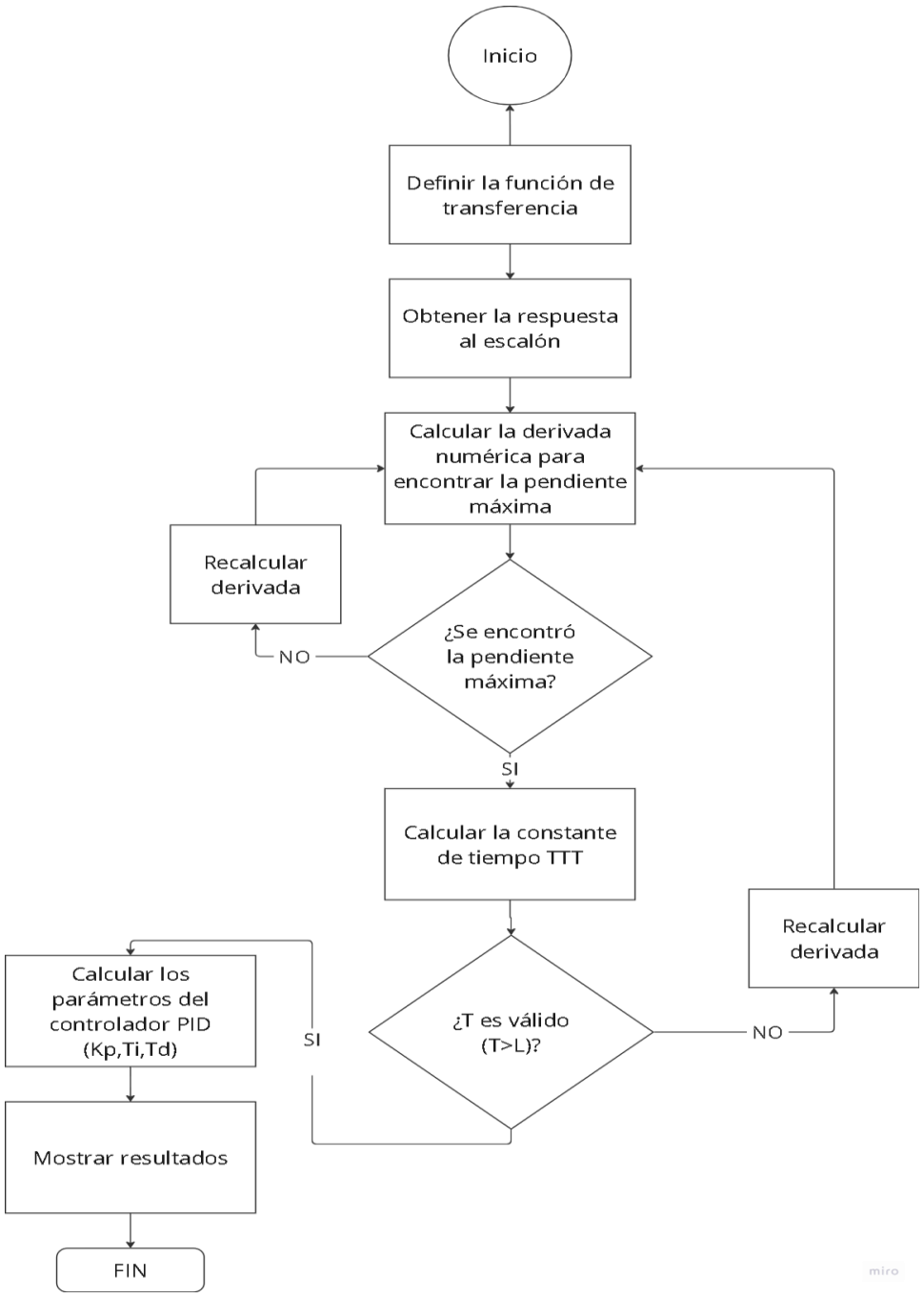


Figura 4.19: flujograma para sintonización los lazos de control.

4.11.15 Resultados de sintonización de lazos de control

En la tabla 7, podemos observar los valores de Kp, Ki y Kd para los lazos de control de caudal, temperatura y presión. Estos parámetros serán integrados posteriormente a controladores reales, lo que permitirá verificar su respuesta ante perturbaciones y cambios en el Set Point.

Tabla 6: Datos de las tres variables de la función de transferencia sintonizada.

Resultados de las variables caudal, presión y temperatura sintonizada			
Tipo de lazo	Lazo de caudal	Lazo de presión	Lazo de temperatura
Ki	0.3	0.4	5
Kp	0.14	0.18	2.3
Kd	0.12	0.13	1.2

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Pruebas de comportamiento de los algoritmos de lazos de control

Para verificar el comportamiento de los tres lazos de control, utilizaremos los valores de Kp, Ki y Kd que fueron previamente sintonizados. Esto nos permitirá observar cómo los sistemas se estabilizan a pesar de las perturbaciones que se introducirán. Además, se realizarán cambios en el Set Point, lo que nos permitirá verificar los tiempos de respuesta ante los cambios en los parámetros establecidos al principio, teniendo en cuenta también los limites en los que los lazos pueden trabajar.

5.2 Verificación del comportamiento del algoritmo en el lazo de control (caudal)

En la figura 5.1, se puede observar el comportamiento inicial del lazo de control del caudal. Al principio, se presenta una subida brusca debido a que el agua pasa rápidamente, creando un gran impulso. Sin embargo, después de un tiempo, el sistema logra estabilizarse sin problemas, lo que verifica que las constantes están bien calculadas.

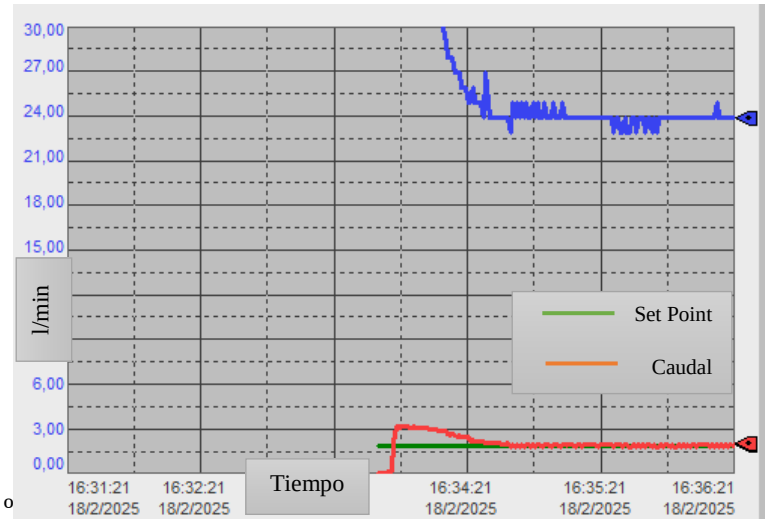


Figura 5.1: Comportamiento del lazo de control de caudal sintonizado

5.2.1 Parámetros del sistema caudal

En la tabla 8, se pueden observar los parámetros de la función de transferencia. Primero, la frecuencia natural es de aproximadamente 5.23 rad/s, lo que indica que el sistema responde rápidamente a los cambios en la entrada. El factor de amortiguamiento es menor que 1, lo que significa que el sistema es ligeramente subamortiguado; esto implica que, antes de estabilizarse, experimentará oscilaciones, aunque estas serán mínimas. Además, el tiempo de establecimiento es de 0.81 s y el sobreimpulso es de solo 0.02%, lo cual es despreciable e indica que el caudal se estabilizará sin sobrepasar el valor establecido.

Tabla 7: Datos adquiridos de la función de transferencia del caudal.

Datos de la Variable presión	
Frecuencia natural (wn)	5.2355 rad/s
Factor de amortiguamiento (ζ)	0.93765
Tiempo de establecimiento (Ts)	0.81483 s
Sobreimpulso (Mp)	0.020872%
Tiempo de subida (Tr)	0.26322 s

5.2.2 Lazo de control de Presión

En la figura 5.2, se puede observar el comportamiento inicial y la posterior estabilización del lazo de control de presión. A diferencia de las curvas del lazo de caudal, la subida de presión es más lenta y gradual, ya que la presión se demora más en acumularse hasta alcanzar un nivel donde el controlador pueda actuar y comenzar a estabilizarse. Además,

la bajada y el establecimiento son igual de suaves, sin presentar sobreimpulsos significativos.

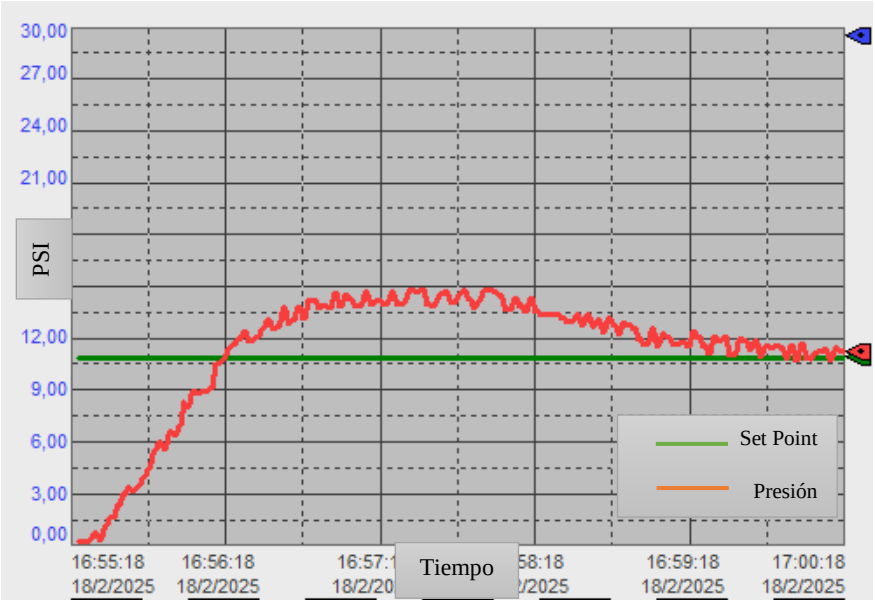


Figura 5.2: Comportamiento del lazo de control de presión sintonizado

5.2.3 Parámetros del sistema de presión.

En la tabla 9, se pueden observar los parámetros de la función de transferencia del lazo de control de presión. La frecuencia natural es de aproximadamente 0.032588 rad/s, lo que indica que tiene una respuesta un poco más lenta en comparación con el lazo de caudal. El factor de amortiguamiento es de 0.84355, lo que indica que se trata de un sistema subamortiguado. Además, el tiempo de establecimiento es de 145 segundos, y el sobreimpulso alcanza el 0.71%. Estos parámetros ayudan a evitar picos en el lazo de control, contribuyendo a una respuesta más estable.

Tabla 8: Datos de la variable presión.

Datos adquiridos para la variable presión	
Frecuencia natural (wn)	0.032588 rad/s
Factor de amortiguamiento (ζ)	0.84355
Tiempo de establecimiento (Ts)	145.5075 s
Sobreimpulso (Mp)	0.71934%
Tiempo de subida (Tr)	43.5862 s

5.2.4 Lazo de control de Temperatura

En la figura 5.3, se puede observar el comportamiento del lazo de control de temperatura una vez sintonizado el sistema. En este caso, se nota que el lazo se demora considerablemente en estabilizarse, lo cual se debe a que el cambio de temperatura es muy lento, principalmente por la existencia de inercia en el sistema. A pesar de esta lentitud, al final, el lazo de control logra estabilizarse con el transcurso del tiempo existiendo pocos Sobreimpulso.

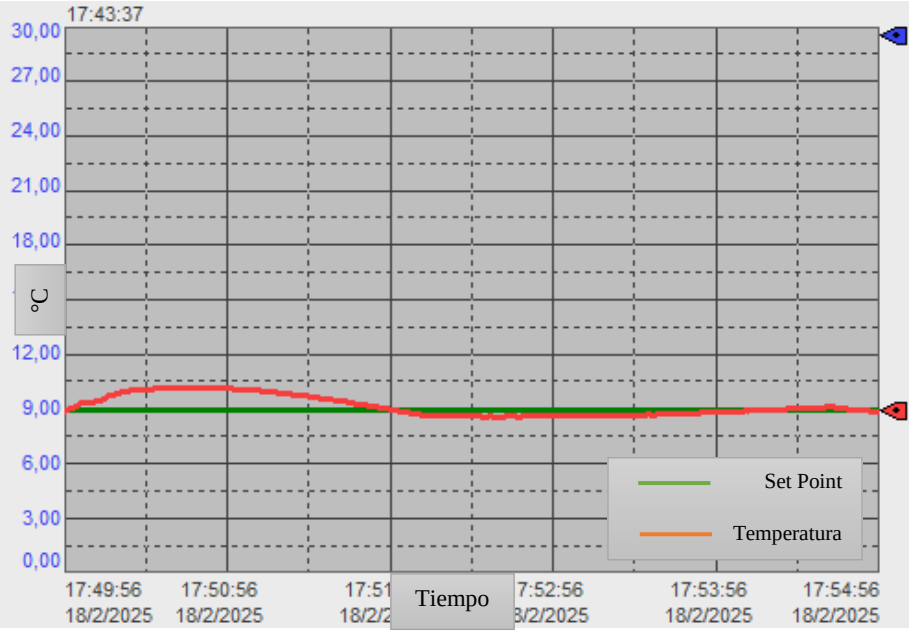


Figura 5.3: Parámetros de la función de transferencia de la temperatura.

5.2.5 Parámetros del sistema temperatura

En la tabla 10, se pueden observar los parámetros calculados para la función de transferencia del lazo de control de temperatura. La frecuencia natural es de 0.044721 rad/s, lo cual es relativamente lento, lo que es típico en sistemas de control de temperatura. El factor de amortiguamiento es de 0.55902, indicando que el sistema es subamortiguado; esto significa que el sistema experimentará algunas oscilaciones antes de alcanzar su valor final. El tiempo de establecimiento es de 160 s, un periodo prolongado debido a la capacidad del material para almacenar calor. Finalmente, el sobreimpulso es del 12%, y el tiempo de subida es de 34.62 s.

Tabla 9: Valores de la variable de temperatura.

Valores de la función de transferencia	
Frecuencia natural (wn)	0.044721 rad/s
Factor de amortiguamiento (ζ)	0.55902
Tiempo de establecimiento (Ts)	160 s
Sobreimpulso (Mp)	12.0265 %
Tiempo de subida (Tr)	34.6242 s

5.2.6 Comportamiento del sistema ante perturbaciones

Las perturbaciones que se realizarán en los tres lazos de control tienen como objetivo determinar la confiabilidad de cada sistema y su capacidad de reacción ante un cambio brusco en la operación normal. A través de estas pruebas, se podrá observar el comportamiento de cada uno de los lazos de control en las gráficas del HMI (Interfaz Hombre-Máquina) y, posteriormente, se evaluará su reacción ante estas perturbaciones. Esto permitirá obtener información valiosa sobre la estabilidad y respuesta dinámica de cada lazo de control.

5.2.7 Perturbación en el lazo de control caudal

Para esta prueba, se enciende el lazo de control e inserta los parámetros Kp, Ki y Kd. Una vez que el sistema se estabiliza, se abre parcialmente la válvula V5, lo que provoca que el flujo se divida entre las dos válvulas. Esta división en el caudal implica que el flujo que pasaba por el lazo principal ya no será el mismo, lo que obliga al sistema a experimentar una disminución en el caudal, con esto el lazo debería volverse a estabilizar. En la figura 5.4, se puede observar cómo está configurado este sistema de lazo de control de caudal.

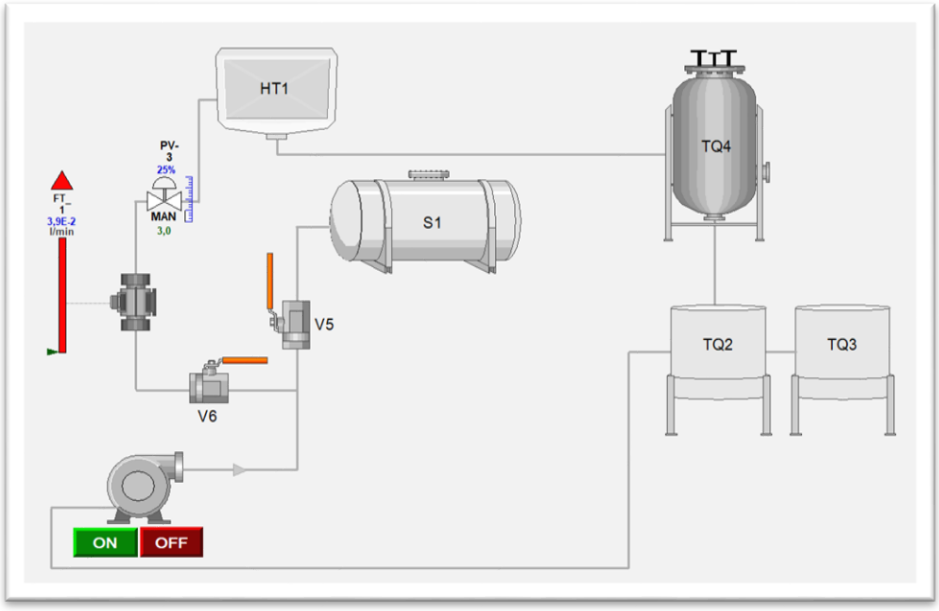


Figura 5.4: Diagrama de conexiones del lazo se control de caudal

- **Respuesta del sistema ante esta perturbación.**

Después de estos cambios realizados en el lazo de control se espera que el actuador eléctrico modular actúe abriéndose más para recuperar ese caudal perdido estabilizándose nuevamente. Como se observa en la figura 5.5, el sistema responde de manera eficiente ante esta perturbación, recuperando rápidamente el caudal y estabilizándolo nuevamente. Esto demuestra la efectividad del lazo de control en situaciones de cambio brusco.

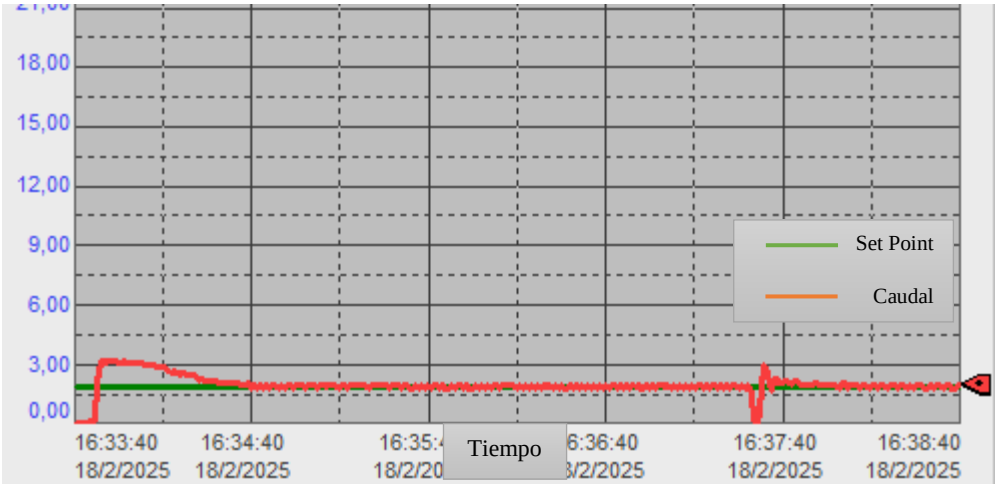


Figura 5.5: Comportamiento del lazo de control de caudal ante una perturbación.

5.2.8 Perturbación en el lazo de control presión

Para observar el comportamiento del lazo de control de presión ante una perturbación, se comenzará encendiendo el lazo de control de temperatura bajo condiciones normales y se esperará a que se estabilice en su estado estable. Una vez alcanzada la estabilidad, se

procederá a abrir parcialmente la válvula V4 como se puede observar en la figura 5.6 con esto se puede evaluar el cómo reacciona el sistema ante este cambio en las condiciones normales de funcionamiento del lazo de control.

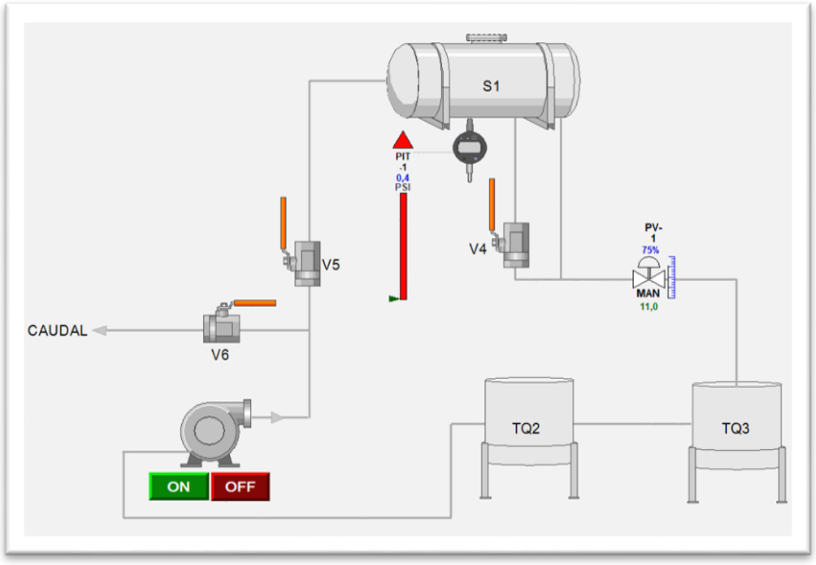


Figura 5.6: Diagrama de conexiones del lazo se control de presión

- **Respuesta del sistema ante esta perturbación.**

En la figura 5.7, se puede observar que, al realizar esta maniobra, el sistema experimenta una caída en un breve período, pero luego se recupera cuando el actuador eléctrico regulador se cierra para mantener la presión en el sistema. Esta validación de la respuesta indica que, ante perturbaciones, nuestro algoritmo funciona de manera efectiva.

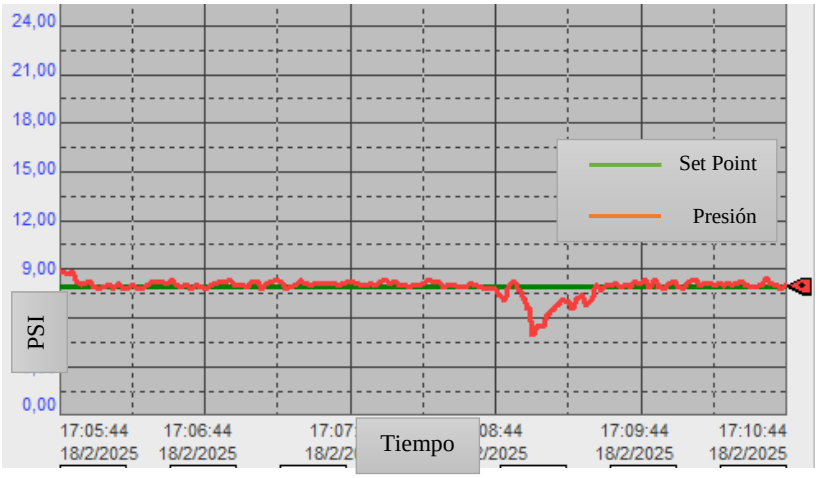


Figura 5.7: Comportamiento del lazo de control de presión ante una perturbación

5.2.9 Perturbación en el lazo de control temperatura

Para verificar el funcionamiento del lazo de control de temperatura, primero se espera a que el sistema se estabilice. Una vez estabilizado, se introduce una perturbación, que consiste en un cambio brusco de temperatura. En este caso, se añade agua fría al tanque TQ2, lo que provoca que el cambio de temperatura se transmita directamente al lazo de control asi como se puede observar en la figura 5.8. De esta manera, se puede observar cómo reacciona el sistema y cómo logra estabilizarse nuevamente.

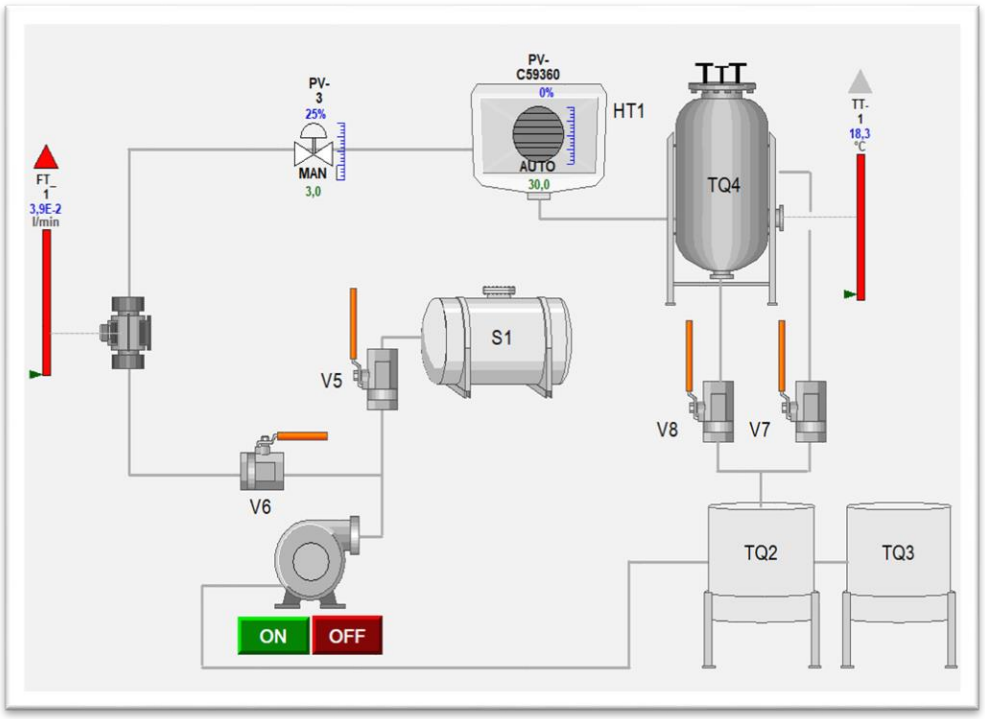


Figura 5.8: Diagrama de conexiones del lazo se control de temperatura

- **Respuesta del sistema ante esta perturbación.**

En la figura número 5.9, se puede observar el comportamiento del lazo de control de temperatura al bajar unos grados la temperatura. El sistema se recupera gradualmente, como se esperaba; aunque demora un poco, logra estabilizarse nuevamente. Esto indica que el algoritmo introducido es el adecuado, ya que permite al sistema recuperar su estado ante estas repentinas perturbaciones que pueden presentarse

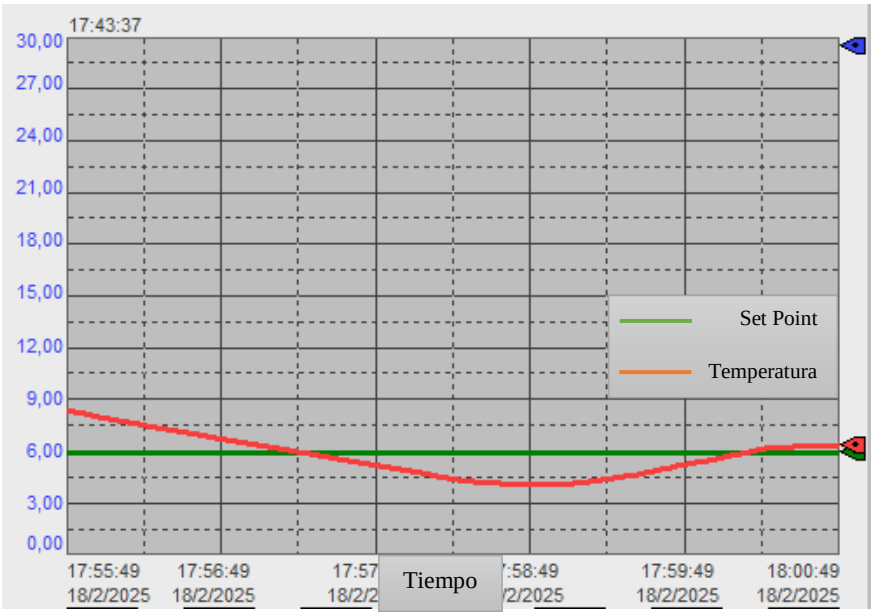


Figura 5.9: Comportamiento del lazo de control de temperatura ante una perturbación

5.2.10 Comportamiento del sistema ante cambio del SET POINT

Para verificar que el algoritmo PID funcione adecuadamente, es fundamental evaluar cómo actúa ante cambios en el Set Point. Se realizarán pruebas en las que se modificarán los valores del Set Point:

Caudal: Los límites de operación son de 0 a 3.5 l/min. Se cambiará este parámetro dentro de este intervalo.

Presión: Los límites de operación son de 0 a 20 PSI. También se modificará este parámetro dentro de estos límites.

Temperatura: El lazo de control de temperatura puede trabajar entre 0 y 40 °C. Este Set Point se cambiará dentro de este rango.

El objetivo de estas pruebas es identificar la resiliencia del sistema ante posibles cambios en los escenarios de trabajo, asegurando que el algoritmo PID mantenga un rendimiento adecuado en cada situación.

5.2.11 Cambio del SET POINT en lazo de control de caudal

En este caso, se tiene un Set Point inicial de 2, y se realizará un cambio a un valor de 3. Como se puede observar en la figura 5.10, el sistema se adapta con facilidad a este cambio repentino. Esto demuestra que nuestro algoritmo PID es adecuado para este sistema, ya que actuó de manera eficiente ante la modificación del Set Point. La respuesta rápida y efectiva del sistema resalta la efectividad del control en situaciones dinámicas.

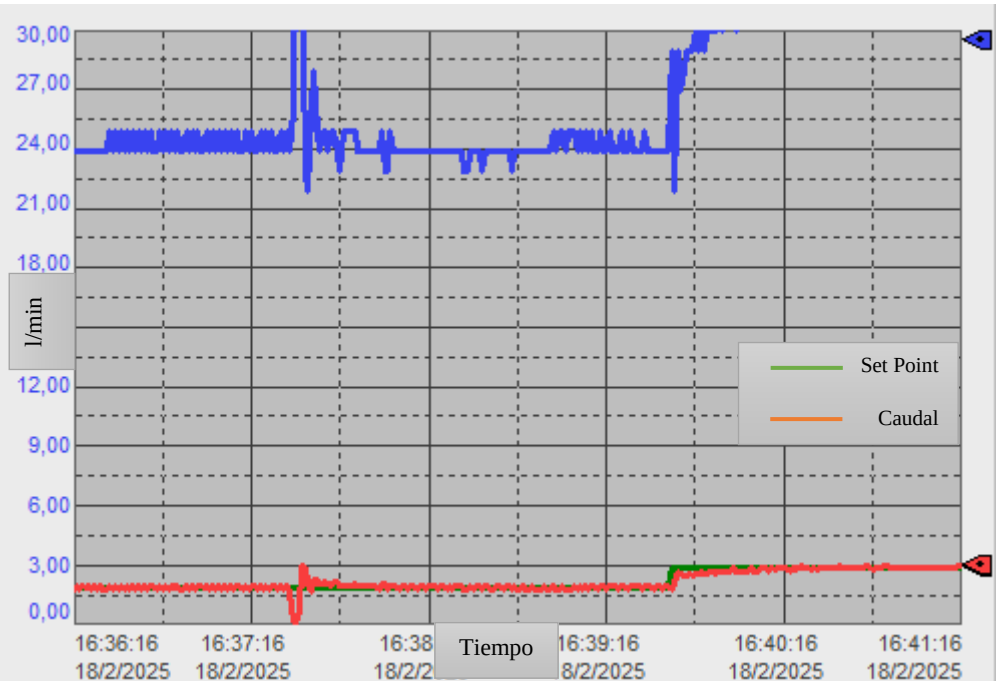


Figura 5.10: Comportamiento del lazo de control de caudal ante un cambio en el Set Point.

5.2.12 Cambio del SET POINT en lazo de control de presión

Para el caso de la presión, comenzamos con un Set Point de 10 PSI. Para verificar la eficiencia del controlador PID, realizaremos un cambio a un valor de 8 PSI. Como se observa en la figura 5.11, el sistema se adapta efectivamente a este cambio. Esto indica que el controlador PID es adecuado para este tipo de lazo de control, demostrando su capacidad para manejar ajustes en el Set Point de manera eficaz.

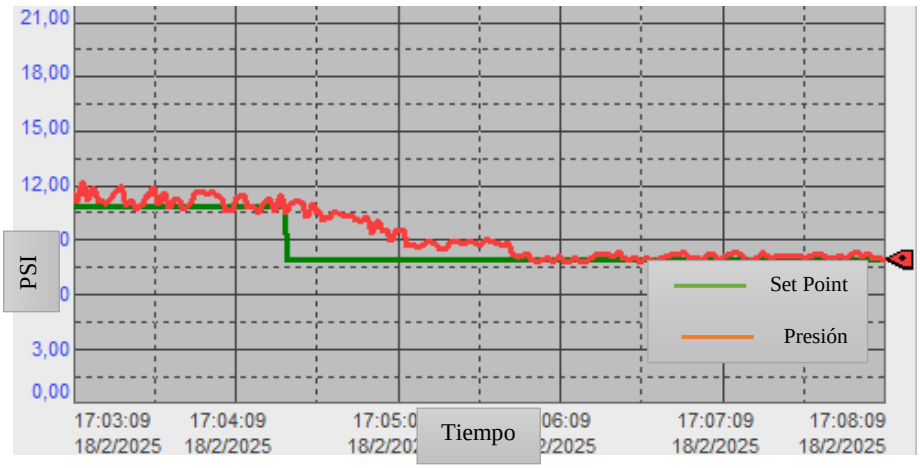


Figura 5.11: Comportamiento del lazo de control de presión ante un cambio en el Set Point.

5.2.13 Cambio del SET POINT en lazo de control de temperatura

Para este caso, comenzamos con un Set Point inicial de 25 °C. Para verificar la efectividad de este tipo de lazos de control, aumentaremos este valor a 30 °C. Como se puede observar en la figura 5.12, el controlador PID actúa de manera eficiente, mostrando una mayor

resiliencia en este lazo. Esto permite afirmar que los parámetros con los que trabajamos son adecuados, ya que el sistema se adapta rápidamente al cambio en el Set Point.

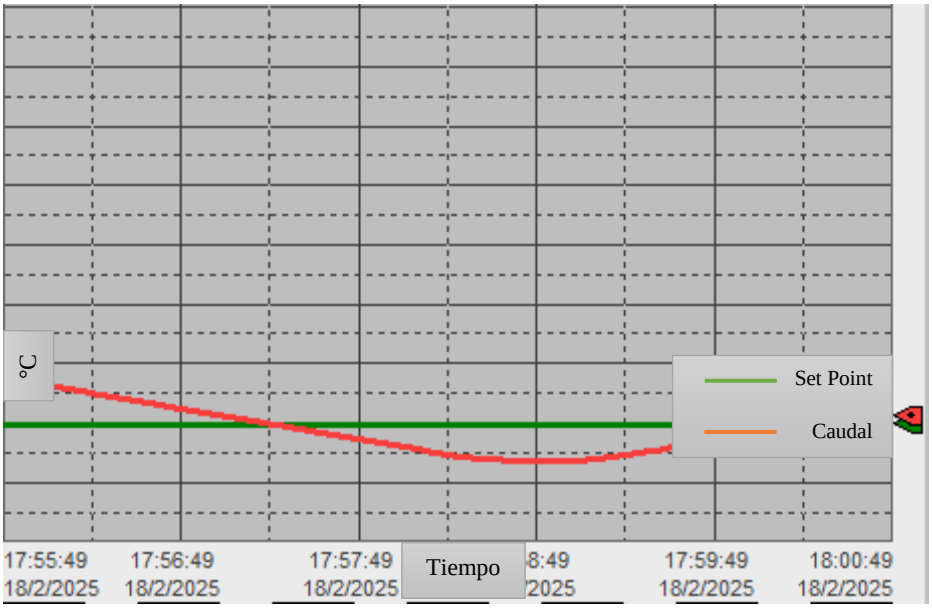


Figura 5.12 Cambio de Set-Point en la variable de temperatura

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. Se verificó las tecnologías utilizadas para el control de variables como presión, caudal y temperatura. Donde sensores como el LD 301, constituye un transmisor de caudal y presión inteligente, que permite que su señal de salida, concuerde con un algoritmo PID, su implementación optimiza la precisión y la estabilidad en los sistemas de medición y regulación a sistemas de control en la industria.
2. Se obtuvieron funciones de transferencia de las variables de control, (caudal, presión y temperatura). Las cuales son obtenidas a partir de perturbaciones de escalón a la entrada del sistema y con las respuestas logradas se selecciona los datos para obtener los modelos con el System Identification de software Matlab. Las funciones de transferencias son de segundo orden de un ajuste superiores al 63%.
3. Al integrar un control PID, se consideró el criterio de Ziegler Nichols y en el ajuste se obtienen los parámetros de Kp, Ki, y Kd para cada caso mencionado, posteriormente se integró a los controladores reales, lo que permitió ver su respuesta ante perturbaciones y cambios en el Set-Point con errores inferiores al 2%, tiempo de asentamiento que no superan los 160 segundos y los sobre impulsos son despreciables.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda analizar nuevos estudios existentes, sobre los sistemas de control aplicados en fluidos enfocados como control adaptativo o difuso ya que permitirá evaluar nuevas tendencias tecnológicas.
2. Se recomienda validar modelos matemáticos, en base a simulaciones y contrastar con datos experimentales, con software especializado en dinámica de fluidos (CFD) que permite captar respuestas que se ajustan a la realidad.
3. Se recomienda indagar otros métodos de sintonización tales como el margen de ganancia y fase y realizar pruebas en distintos escenarios operativos.
4. Para validación del sistema es recomendables realizar varias comparaciones entre estado automático y manual e interpretar el comportamiento de control del sistema al integrar los parámetros de las varíales antes mencionadas.

7. REFERENCIAS

[1] "Códigos UNESCO."

[2] L. F. Lozano-Valencia, L. F. Rodríguez-García, and D. Giraldo-Buitrago, "Diseño, Implementación y Validación de un Controlador PID Autosintonizado Design, Implementation and Validation of a Self-Tuning PID Controller," 2012.

[3] "Introducción al análisis e implementación de sistemas de control automático".

[4] D. H. Doris Sáez, "EL 42D Control de Sistemas."

[5] "Ogata-4-edicion-pdf".

[6] "Diagramas en Bloques."

[7] V. M. Alfaro, "Sintonización de controladores por ubicación de polos y ceros," 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266344737

[8] "2196-Artículo-7131-1-10-20200110".

[9] V. M. Alfaro Ruíz, "ACTUALIZACIÓN DEL MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES DE ZIEGLER Y NICHOLS," *Revista Ingeniería*, vol. 15, no. 1–2, Jul. 2011, doi: 10.15517/ring.v15i1-2.7739.

[10] "Estabilidad Criterio de Routh-Hurwitz."

[11] Ricardo. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control : conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab*. Prentice Hall, 2010.

[12] "ELT 3932 AUTOMATISMOS INDUSTRIALES LABORATORIO No. 4 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN RSLOGIX 500 ALLEN BRADLEY." [Online]. Available: www.ab.com/micrologix.

[13] "SensyTemp TSP311, TSP321, TSP331 Sensores de temperatura."

[14] "OKY3430-0: MEDIDOR DE FLUJO DE AGUA YF-S201." [Online]. Available: http://www.agelectronica.com