

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Rediseño e implementación de Sistema de control de caudal de un tanque para el Laboratorio de Control Automático”.

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

Presentado por:

Luis Antonio Muentes Coello

José Antonio Chilán Vargas

GUAYAQUIL – ECUADOR

Noviembre 2022

## DEDICATORIA

### Luis Antonio Muentes Coello

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar la situación en la que nos encontremos. A mi padre, que, a pesar de nuestra distancia, siempre está dispuesto a ayudar a mí y a mis hermanos siempre que lo necesitemos, y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que con conquistar este sueño y aspiración de mi vida se llenara de orgullo. A mi tía Mercedes, a quien quiero como a una madre, por creer y compartir momentos significativos conmigo y por alimentar todo este tiempo mis ganas de ser un profesional.

### José Antonio Chilan Vargas

Esto es un arduo trabajo de Antonio y Adelina. El ejemplo de Laura, sin ellos esto no fuera posible.

## AGRADECIMIENTOS

Luis Antonio Muentes Coello

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial mi Madre y mi Padre que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

A mi novia Kerly, que, a través de sus consejos, amor y paciencia, me ayudó a concluir esta meta tan anhelada. En el camino encuentras personas que iluminan tu vida, pero sin duda alguna tu eres la luz que más ilumina la mía.

Asimismo, agradezco infinitamente a mis Hermanos, tíos, tías que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que puedo llegar a ser. Ojalá algún día yo me convierta en su fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino y conquisten sus sueños.

De igual forma, agradezco a mi tutor de Tesis Msc. Carlos Salazar, que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, se logró culminar el presente trabajo.

José Antonio Chilan Vargas

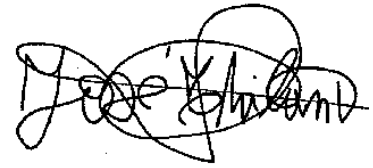
Gracias a todas las personas que formaron parte durante mi vida académica, mi grupo de amigos "Los Vpc" sin ustedes todo esto hubiese sido mucho más difícil, a Julio Y Xavier, por la oportunidad del crecimiento laboral y académico. A la persona que con su abrazo cuando más lo necesite estuvo ahí, no hace falta poner tu nombre.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y exploración, nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Luis Muentes Coello y José Chilán Vargas damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Luis Muentes Coello

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized 'J' and 'V' with a horizontal line through them, and other cursive elements.

José Chilán Vargas

## EVALUADORES

.....  
**M.sc. Efrén Vinicio Herrera Muentes**

PROFESOR DE LA MATERIA

  
.....  
**M.sc. Carlos Alberto Salazar López**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Actualmente la adopción de automatización de procesos es una estrategia clave en el mundo de la industria, dado a que aumentan la cantidad y calidad de los productos, reducir los costos de producción y obtener innovación de productos. Dado a que hoy en día es un aspecto muy importante, los estudiantes deben familiarizarse con el diseño e implementación de sistemas de control automático desde sus centros de estudio.

El presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema de control automático para una planta de caudal del laboratorio de Sistemas de Control de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), evaluando tres criterios que permitirán la validación de dicho sistema. La evaluación del sistema de control se realiza sobre cuatro escenarios, los cuales permiten obtener un gráfico de salida caudal vs tiempo, para determinar el tiempo de estabilización del sistema, la precisión y la estabilidad, mediante la actuación de un equipo autómatas, PLC, operando en conjunto con la herramienta computacional MATLAB®.

El trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos. El Capítulo 1 describe el principal objetivo del proyecto de titulación, así como su justificación y conceptos teóricos relacionados al diseño del sistema de control de la planta de caudal. El Capítulo 2 describe la metodología utilizada para el diseño e implementación del sistema de control, así como la identificación de la planta. El Capítulo 3 muestra los resultados obtenidos del sistema de control de la planta mediante cuatro escenarios de evaluación. Finalmente, el Capítulo 4 detalla las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto.

**Palabras claves:** sistema de control. Planta de caudal, diseño, implementación.

## **ABSTRACT**

Currently the adoption of process automation is a key strategy in the world of industry, since it increases the quantity and quality of products, reduce production costs and obtain product innovation. Since nowadays it is a very important aspect, students must become familiar with the design and implementation of automatic control systems from their study centers.

This project proposes the design and implementation of an automatic control system for a flow plant of the Control Systems Laboratory of the Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), evaluating three criteria that will allow the validation of the system. The evaluation of the control system is performed on four scenarios, which allow obtaining a flow vs. time output graph, to determine the system stabilization time, accuracy, and stability, through the performance of an automaton equipment, PLC, operating in conjunction with the MATLAB® computational tool.

The work is divided into four chapters. Chapter 1 describes the main objective of the degree project, as well as its justification and theoretical concepts related to the design of the flow plant control system. Chapter 2 describes the methodology used for the design and implementation of the control system, as well as the identification of the plant. Chapter 3 shows the results obtained from the plant control system through four evaluation scenarios. Finally, Chapter 4 details the conclusions and recommendations of this project.

**Key Words:** control system, flow plant, design, implementation.



# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ABREVIATURAS .....	vi
SIMBOLOGÍA.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
CAPÍTULO 1 .....	i
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS .....	2
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
1.4 ALCANCE .....	3
1.5 ESTADO DEL ARTE .....	3
1.5.1 TRABAJOS PRECEDENTES .....	3
1.5.2 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO .....	4
1.5.3 REQUERIMIENTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE CONTROL .....	5
1.5.4 CONTROL PID .....	7
1.5.5 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) LOGO V8 .....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2 METODOLOGÍA .....	9
2.1 DISEÑO DE TABLERO ELÉCTRICO PARA SISTEMA DE CONTROL.....	9
2.1.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE CONTROL.....	10

2.1.2	SISTEMA ELÉCTRICO DE FUERZA.....	11
2.1.3	PROGRAMACIÓN DE PLC LOGO V8.....	12
2.2	IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA .....	16
2.2.1	CURVA CARACTERÍSTICA .....	16
2.2.2	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN .....	17
2.2.3	RELACIÓN VOLTAJE-CAUDAL .....	18
2.2.4	PRUEBAS DE LA PLANTA.....	19
2.2.5	DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	20
2.2.6	ACONDICIONAMIENTO DE LOS DATOS.....	21
2.2.7	FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA.....	21
2.3	CONTROLADOR DE LA PLANTA .....	23
2.4	CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	25
CAPÍTULO 3.....		26
3	EVALUACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL	26
3.1	CASO DE ESTUDIO .....	26
3.2	RESULTADOS OBTENIDOS .....	27
3.2.1	CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 1 .....	27
3.2.2	CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 2 .....	29
3.2.3	CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 3 .....	30
3.2.4	CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 4 .....	31
3.3	DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	32
CAPÍTULO 4.....		34
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
4.1	CONCLUSIONES.....	34
4.2	RECOMENDACIONES .....	35
BIBLIOGRAFIA .....		36

ANEXOS .....	38
ANEXO A. ESPECIFICACIONES GENERALES DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA	38
ANEXO B. CONSTRUCCIÓN DEL TABLERO PARA EL CONTROL DE LA PLANTA DE CAUDAL .....	40

## **ABREVIATURAS**

PLC: Programmable Logic Controller

ESPOL: Escuela Superior Politécnica del Litoral

## **SIMBOLOGÍA**

L/min:	Litros por minuto
V:	Voltaje
s:	Segundos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de bloques de un sistema retroalimentado o automático [13].	5
Figura 1.2 Tipos de estabilidad en un sistema de control [15].	6
Figura 1.3 Diferencias entre exactitud y precisión [17].	6
Figura 2.1 Diagrama esquemático de sistema de control para la Planta de Caudal.	10
Figura 2.2 Motor eléctrico de la planta de control de caudal.	11
Figura 2.3 Diagrama esquemático del sistema de fuerza de la Planta de Caudal.	11
Figura 2.4 Sistema de control en PLC LOGO v8 SIEMENS para planta de control de caudal.	12
Figura 2.5 Sección de la programación para los botones de marcha y paro.	12
Figura 2.6 Sección de la programación para el modo automático	13
Figura 2.7 Sección de la programación para el modo manual.	13
Figura 2.8 Sección de la programación para el modo fallas.	14
Figura 2.9 Sección de la programación para las salidas digitales.	14
Figura 2.10 Sección de la programación para control remoto.	15
Figura 2.11 Sección de la programación para las entradas y salidas analógicas.	15
Figura 2.12 Curva característica de la planta de caudal, siendo la entrada el voltaje del variador y la salida la señal voltaje del caudalímetro.	17
Figura 2.13 Punto de operación de la curva característica de la planta de caudal.	18
Figura 2.14 Aproximación lineal para la planta de caudal (sistema no lineal)	18
Figura 2.15 Instrucciones para elección de polinomio característico a través de mínimos cuadrados.	19
Figura 2.16 Modelo para la identificación de la planta, prueba de voltaje de operación con variaciones.	19
Figura 2.17 Sistema de lazo abierto de la planta de caudal.	20
Figura 2.18 Salida de voltaje del caudalímetro ante la respuesta de un escalón. Voltaje vs tiempo en segundos.	21
Figura 2.19 Salida del caudalímetro con filtrado (señal azul) y sin filtro (rojo). a) Comparación de la señal durante todo el período de pruebas, y b) Comparación de la señal durante dos períodos.	21
Figura 2.20 Intervalo de señal de salida elegida en la herramienta "System Identification"	22
Figura 2.21 Selección de tramos de señal para identificación de planta.	22

Figura 2.22 Resultados obtenidos en la identificación de la planta.....	23
Figura 2.23 Valor de $K_i$ para el controlador I de la planta de caudal que cumple con las características deseadas.....	24
Figura 2.24 Características de la planta implementadas en sisotool. ....	24
Figura 3.1 Diagrama de bloques de planta de caudal con sistema de control implementado.....	26
Figura 3.2 Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 1.....	28
Figura 3.3 Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 1. ....	28
Figura 3.4 Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 2.....	29
Figura 3.5 Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 2. ....	29
Figura 3.6 Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 3.....	30
Figura 3.7 Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 3. ....	30
Figura 3.8 Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 4.....	31
Figura 3.9 Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 4. ....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Entradas y salidas del PLC logo v8. ....	10
Tabla 2.2 Valores de constantes para controlador de planta de caudal.....	25
Tabla 3.1 Pruebas realizadas en la planta de caudal con controlador I. ....	27
Tabla 3.2 Resultados obtenidos de las pruebas al sistema de control de la planta de caudal .....	32



# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo describe uno de los problemas que actualmente existe en el laboratorio de Sistemas de Control de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), en el campus Gustavo Galindo. Este laboratorio cuenta con una variedad de plantas con su sistema de control, pero este proyecto se centrará especialmente en la planta de caudal, presentará un nuevo diseño para su automatización y se analizarán los resultados de su implementación, por lo que a lo largo de este capítulo se encontrarán los objetivos, la justificación y el alcance de este proyecto, así como la investigación del estado del arte en la que se presentarán trabajos similares y conceptos básicos acerca de los Sistemas de Control Automático.

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Un laboratorio es un lugar equipado para fomentar la enseñanza y la investigación mediante experimentos llamados “prácticas de laboratorio”, brindando así al estudiante la posibilidad de entender cómo se construye el conocimiento científico. Varios estudios resaltan la importancia de los laboratorios y sus prácticas para el proceso de enseñanza-aprendizaje, tanto desde el conocimiento científico escolar hasta el de pregrado, comprobando que incluso permite un impacto positivo en el interés y la actitud del alumno, ya que le muestra una antesala a la realidad de la asignatura que está desarrollando [1]–[3].

Considerando la importancia de los laboratorios y sus instrumentos, la problemática del presente proyecto se enfoca a uno de los laboratorios de ESPOL. Actualmente la planta de caudal del Laboratorio de Control Automático se encuentra inhabilitada debido a la falta de uso presencial de los laboratorios durante la etapa de emergencia sanitaria por COVID-19. Ahora que las prácticas de laboratorio volvieron a ser presenciales, se requieren de equipos para el desarrollo de prácticas de control como herramientas de enseñanza con el objeto de afianzar los conocimientos adquiridos durante el proceso de aprendizaje.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los laboratorios tienen como fin potenciar lo aprendido de manera teórica por el estudiante, así como contribuir al desarrollo de habilidades y destrezas para los trabajos experimentales. Al proporcionar la experimentación y el descubrimiento permiten que el alumno pueda aprender de sus propios errores, evitando así el concepto de tener únicamente resultados correctos o solo datos procedentes de los textos académicos utilizados en clase, lo cual causa que los experimentos sean necesarios durante el desarrollo profesional de los estudiantes [4], [5].

Por lo antes descrito, es necesario habilitar la planta de caudal del Laboratorio de Control Automático, ya que permitirá desarrollar en el estudiante la motivación e interés en la materia *Sistemas de Control*, además del desarrollo de ciertas habilidades científicas al realizar experimentos mediante software y hardware. Esta solución asegura el bienestar de los alumnos durante su proceso de aprendizaje al permitir expandir sus conocimientos, además de responder a una necesidad de los estudiantes, de ahí que se pretenda la implementación del presente proyecto.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Repotenciar la planta de control de caudal del Laboratorio de Sistemas de Control utilizando un PLC LOGO V8 para su uso en prácticas de pregrado y posgrado.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Construir el tablero eléctrico de la Planta de Caudal con las protecciones adecuadas para la implementación del sistema de control.
- Obtener el modelo matemático de la Planta de Caudal utilizando teoría de control.
- Diseñar el sistema de control de la Planta de Caudal mediante el PLC Logo v8 de SIEMENS para su funcionamiento en lazo abierto (manual) y lazo cerrado (automático).

- Evaluar el desempeño del sistema de control al implementar el PLC en la Planta de Caudal mediante los requerimientos básicos de los sistemas de control.

#### **1.4 ALCANCE**

Diseñar el sistema de control automático de la planta de caudal y su implementación mediante una modificación en el tablero eléctrico para la parte eléctrica de control y fuerza.

El sistema de control se llevará a cabo mediante la herramienta PLC LOGO V8 de la marca SIEMENS, además de implementar las protecciones adecuadas en el tablero para el funcionamiento de la planta. El diseño incluye el nuevo plano eléctrico de la planta, su modelo matemático y la programación del PLC. Los resultados obtenidos del presente proyecto permitirán que el Laboratorio de Sistemas de Control cuente con una planta adicional para las prácticas de los estudiantes de pregrado y postgrado; además de promover costumbres como la investigación, así como la resolución de problemas a los estudiantes de la institución.

#### **1.5 ESTADO DEL ARTE**

Esta sección presenta trabajos precedentes relacionados al diseño y/o implementación de sistemas de control en plantas de caudal, así como la descripción de conceptos básicos relacionados a los sistemas de control automático. La exploración del estado del arte en los aspectos mencionados permitirá establecer las bases para la metodología que se presentará en el Capítulo 2.

##### **1.5.1 TRABAJOS PRECEDENTES**

Uno de los proyectos relacionados a la identificación, así como al diseño de una planta de caudal de líquido es el que muestra [6], el cual realiza un estudio que permite el modelado de la planta de forma matemática y determinar un controlador PID adecuado para el uso del sistema a través de la herramienta SISOTOOL de MATLAB®. Otro artículo como [7] muestra la construcción de un módulo didáctico para el control de nivel y caudal de agua implementando un algoritmo de control, un controlador lógico

programable (PLC), sistemas SCADA y los instrumentos para el sistema de control y fuerza, se crea un controlador PID para la planta el cual es validado a través de diferentes pruebas con varias perturbaciones.

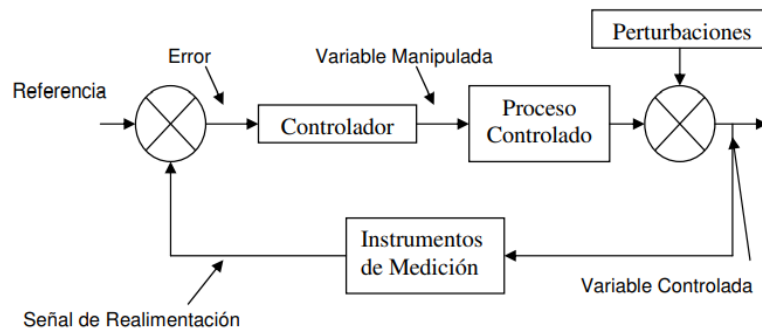
Proyectos como [8] presentan únicamente el desarrollo del sistema de control de caudal y presión, pero se ejecuta a través de un PLC, además de la implementación de un control que utiliza la lógica difusa para mejorar su funcionamiento. De modo parecido [9] presenta el desarrollo de un sistema de control para una planta de nivel y su implementación, pero en vez de utilizar un PLC se utiliza un paquete de comunicación que permite la interacción entre un Arduino y la herramienta Simulink de MATLAB® para realizar un control en tiempo real que permita la calibración de la planta.

En base lo revisado de los trabajos precedentes, se puede inferir que el control por caudal para implementar en el laboratorio de Sistemas de Control se puede llevar a cabo mediante Arduino o PLC, además de utilizar herramientas como SIMULINK para el diseño del control PID.

### **1.5.2 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO**

El sistema de control de lazo cerrado o mejor conocido como sistema automático (retroalimentado), es aquel en el que la acción de control depende de la salida. Esto es posible debido a que utiliza un sensor que permite la comparación de la respuesta real de salida con la respuesta de referencia (entrada) configurada en el sistema, la diferencia entre ambas señales es denominada *error del sistema* y es mediante la cual el controlador aplica las acciones correctivas sobre el proceso [10], [12].

La Figura 1.2 muestra el diagrama de control de un sistema de lazo cerrado, como se puede observar a partir de la salida se obtiene una variable controlada que regresa (o retroalimenta) a la señal de entrada, la cual siempre es la señal de referencia, la diferencia de ambas permite determinar el error del sistema y tomar las medidas correctivas mediante el controlador.



**Figura 1.1** Diagrama de bloques de un sistema retroalimentado o automático [13].

### 1.5.3 REQUERIMIENTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control debe contar con al menos 3 características, denominadas las 3 premisas básicas del control: 1) Estabilidad, 2) Precisión, y 3) Rapidez de respuesta. El ingeniero de diseño debe realizar un sistema de control que cumpla con todos estos requerimientos satisfactoriamente para decir que la planta es un sistema que está controlado, lo cual en muchas ocasiones representa un reto, ya que estas restricciones del controlador llegan a ser incompatibles entre sí [10], [14].

*La estabilidad* en un sistema de control es de suma importancia, elementalmente transmite la idea de que, si se tiene una señal acotada a la entrada del sistema, la señal de salida también debe tener una señal del mismo tipo, es decir, que no debe tener oscilaciones persistentes ni una gran magnitud en la señal. Matemáticamente cuando se ha modelado la planta, esto quiere decir que todas las raíces de la ecuación característica se encuentran en la parte izquierda del plano complejo (parte real negativa). La Figura 1.3 ilustra un sistema estable, críticamente estable y uno inestable [10], [15].

Por otro lado, *la precisión* en un sistema de control es medido por la capacidad de producir resultados con un error dentro de un límite aceptable (con un error menor al 5%). La precisión está directamente ligada al error del sistema de control, pues es a partir de esta que se puede terminar si un

controlador es preciso o no. Aunque idealmente el error buscado en los sistemas de control es cero, es decir que sea exacto, pero en muchas ocasiones basta con que se pueda generar la misma señal de salida en diferentes ocasiones con una misma señal de entrada; sin embargo, la precisión está realmente definida por la aplicación del sistema de control, ya que a mayor exactitud mayor es el costo de implementación. La figura 1.4 permite tener una diferencia clara entre exactitud y precisión, lo cual permite al ingeniero de diseño un controlador según las necesidades de aplicación [10], [16], [17].

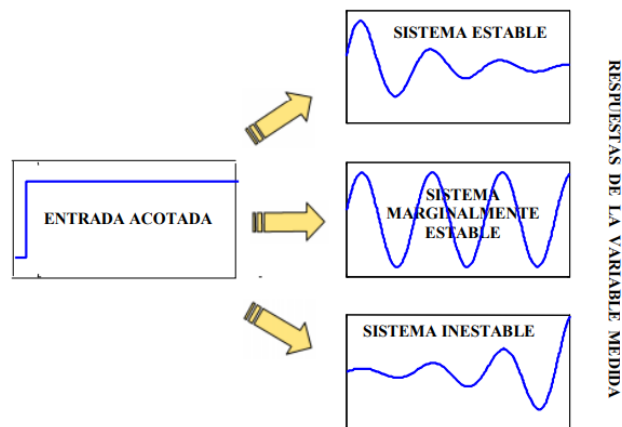


Figura 1.2 Tipos de estabilidad en un sistema de control [15].

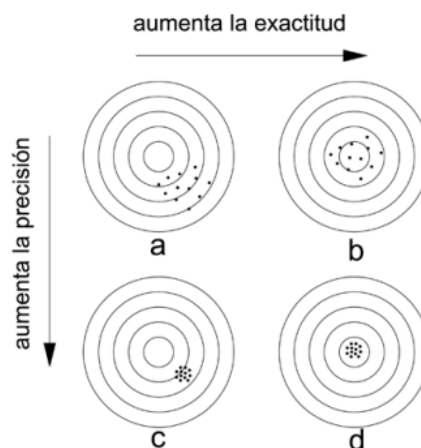


Figura 1.3 Diferencias entre exactitud y precisión [17].

Finalmente, la *rapidez de respuesta* o velocidad de respuesta en un sistema de control está dada por el tiempo en el que ejecuta su función, este debe funcionar dentro de un tiempo aceptable ante una señal de entrada; este tiempo dependerá de la planta en estudio, usualmente se espera que los

sistemas de nivel tengan una reacción relativamente rápida (menos de 200 segundos): mientras que, hay otras plantas que cuentan con una respuesta más lenta como las plantas de temperatura. Esta característica puede observarse tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia [10], [16].

#### 1.5.4 CONTROL PID

Un controlador PID obtiene su nombre porque incluye tres acciones: 1) Proporcional (P), 2) Integral (I), y 3) Derivativa (D). Las combinaciones que pueden obtenerse de las tres acciones son PI, PD y PID o la actuación individual de un controlador P o I. A pesar de los cambios tecnológicos este tipo de controlador es el mayormente implementado actualmente, representando más del 95% de los lazos de control de la industria debido a funciones importante como la retroalimentación para rechazar perturbaciones, una alta precisión debido a la acción integral y la capacidad de predecir el futuro por la acción derivativa [18], [19].

La Ecuación 1.1 muestra el esquema básico de un controlador PID, en donde se puede observar cada una de sus componentes y las constantes representativas de cada acción del controlador.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.1)$$

La configuración del diagrama de bloques dependerá del uso, ya que este puede tener al menos tres estructuras: 1) No interactivo, 2) Interactivo, o 3) Paralelo, siendo la más conocida la No interactiva [21].

#### 1.5.5 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) LOGO V8

El controlador lógico programable, también conocido por sus siglas en inglés *Programmable Logic Controller (PLC)*, es un dispositivo electrónico que permite guardar instrucciones en una memoria, la cual permite la

ejecución de acciones lógicas, secuencias y cálculos para un sistema de control de maquinaria y procesos [22], [23].

Actualmente los PLC son usado con bastante frecuencia en la automatización de la industria, especialmente para el de máquinas o procesos. En el caso del LOGO V8, este cuenta con 8 entradas de las cuales dependiendo del modelo 4 pueden ser analógicas, y con 4 salidas digitales tipo relé; el especial interés de este proyecto son las salidas analógicas, lo cual requerirá un módulo de expansión para poder utilizarse, ya que ningún modelo cuenta de manera predeterminada con este tipo de salida.

El modelo por utilizarse será el 12/24 RCE que cuenta con una alimentación de 12/24 VDC, la cual es proporcionada por el variador de frecuencia. La selección también se ha realizado de esta manera debido a que los módulos de expansión para señales de salidas analógicas solo funcionan a con voltaje DC teniendo como valor nominal el máximo valor soportado por el PLC, lo cual causa que sea de más relevancia utilizar este equipo.



# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA

El siguiente capítulo describe la metodología aplicada en el diseño de la planta de control de caudal, en el presente se realiza la identificación de la planta, su caracterización y el diseño eléctrico. La metodología ha sido establecida tal como se describe en los siguientes párrafos.

La base para poner en funcionamiento la planta de control de caudal es la que se examina en la sección 2.1: el diseño del tablero eléctrico, el cual se diferencia claramente por la sección de fuerza y control que se describen en las secciones 2.1.1 y 2.1.2. Ambas partes del tablero requieren un diseño con protecciones adecuadas, las cuales se definen en base a las características de los equipos conectados a la planta de control de caudal. Dentro de esta misma sección existe el dispositivo que permitirá el control de la planta en lazo abierto (manual) o en lazo cerrado (automático), este control es efectuado por el PLC Logo v8 de SIEMENS que cuenta con un algoritmo cargado que permite dicho control y se explica de manera detallada en la sección 2.1.3.

Una vez definida la parte eléctrica de la planta de control de caudal, se debe realizar su identificación tal como se analiza en la sección 2.2. Finalmente, en esta sección con la planta puesta en marcha se deben definir los criterios que permitan evaluar el comportamiento del control implementado para analizar los resultados obtenidos en el Capítulo 3, esto se analiza en la sección 2.3.

### 2.1 DISEÑO DE TABLERO ELÉCTRICO PARA SISTEMA DE CONTROL

El tablero de control es un componente importante para poder definir el control de la planta de control de caudal, este sistema se puede dividir en dos secciones: 1) sistema eléctrico de control, y 2) sistema eléctrico de fuerza.

Las siguientes secciones definen cada uno de estos sistemas, sin embargo, se explica con más detalle una parte del sistema de control que es la programación del PLC LOGO V8 de SIEMENS, la cual es fundamental para realizar los lazos de control de la planta de caudal.

## 2.1.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE CONTROL

La parte de control estará energizada a 24V DC, estará dada por el PLC LOGO v8 de SIEMENS junto con un módulo de expansión para entradas analógicas.

El sistema de control estará interconectado también con un variador de frecuencia asíncrono de marca SCHNEIDER ELECTRIC modelo Altivar 312 y un caudalímetro con un check de retención incluido SBG246 de la marca IFM. Las especificaciones generales de estos equipos se encuentran en el anexo A.

Los lazos de control, abierto o cerrado, estarán dados por el controlador lógico programable. Las conexiones con los equipos que forman parte de este mismo sistema de control se detallan en la Figura 2.1, mientras que la Tabla 2.1 describe las entradas y salidas del PLC Logo V8.

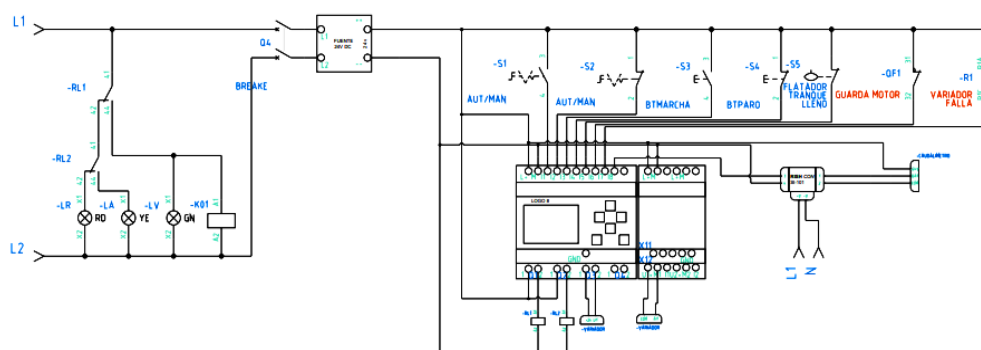


Figura 2.1 Diagrama esquemático de sistema de control para la Planta de Caudal.

Tabla 2.1 Entradas y salidas del PLC logo v8.

Señal	Tipo de Señal	Señal en PLC	Abreviatura
Modo Automático	Digital	Entrada	I1
Modo Manual			I2
Botón de Marcha			I3
Botón de Paro			I4
Flotador			I5
Falla de guardamotor			I6
Falla del variador			I7
Caudalímetro	Analógica		I8
Arranque del variador (Run)	Digital	Salida	Q1
Caudalímetro	Analógica		U1+M1

## 2.1.2 SISTEMA ELÉCTRICO DE FUERZA

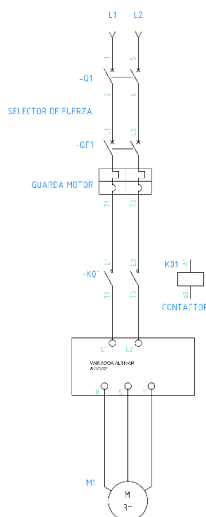
La sección eléctrica de fuerza estará dada a un nivel de tensión de 240 V AC, el cual es proporcionado desde la red eléctrica del laboratorio.

El motor que permite el recorrido del líquido vital en la planta es de marca WEG código NXDP-2, con una potencia nominal de 0.5 HP a un nivel de alimentación de 220 V. La Figura 2.2 da más detalles sobre el motor.



**Figura 2.2** Motor eléctrico de la planta de control de caudal.

La Figura 2.3 permite comprender la conexión del sistema eléctrico de fuerza para el funcionamiento del motor. Inicialmente este se encuentra habilitado (on) o fuera de servicio (off) por la acción de un selector de dos posiciones, posteriormente este se encuentra protegido por un guardamotor y es accionado por un contactor el cual permitirá su encendido mediante el variador de frecuencia.



**Figura 2.3** Diagrama esquemático del sistema de fuerza de la Planta de Caudal.

## 2.1.3 PROGRAMACIÓN DE PLC LOGO V8

El programa cargado en el dispositivo autómatas se muestra en la Figura 2.4, el cual es un control PI para la planta de caudal.

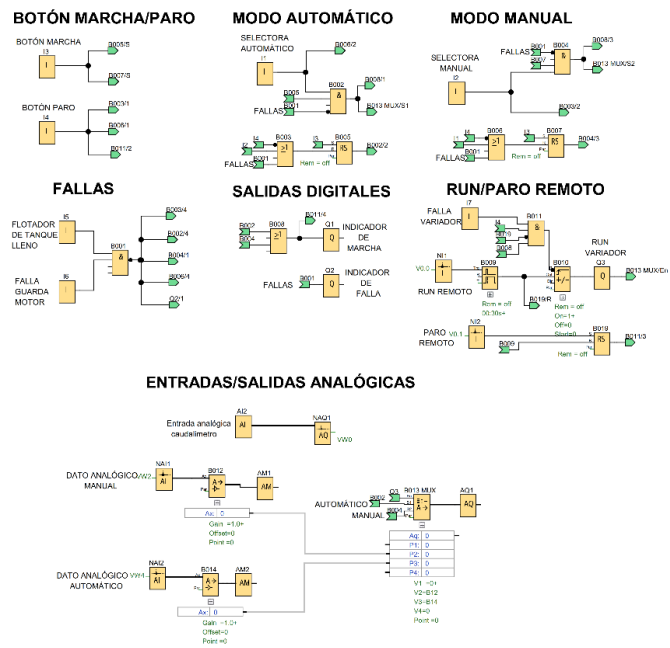


Figura 2.4 Sistema de control en PLC LOGO v8 SIEMENS para planta de control de caudal.

Como se observó, la programación del logo se encuentra dividida en al menos 7 secciones, las cuales se describirán a continuación:

1. **Botones marcha y paro:** Son las señales eléctricas que se reciben de las botoneras de marcha (entrada 3) y de la botonera de paro (entrada 4). Los botones son los que permiten el funcionamiento del sistema eléctrico, su encendido o apagado.

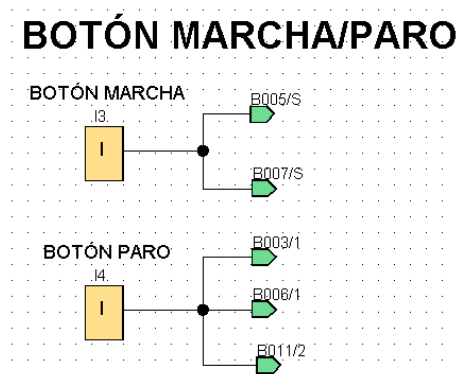


Figura 2.5 Sección de la programación para los botones de marcha y paro.

2. **Modo automático:** Es una de las señales eléctricas del selector de tres posiciones (entrada 1), esta permite que el sistema funcione en lazo cerrado. La condición para poder funcionar en este modo es que no exista ninguna falla, el variador se encuentre encendido y no se encuentre encendido el botón de paro. El modo automático es mutuamente excluyente del modo manual, por lo que no funciona si se usa el modo automático.

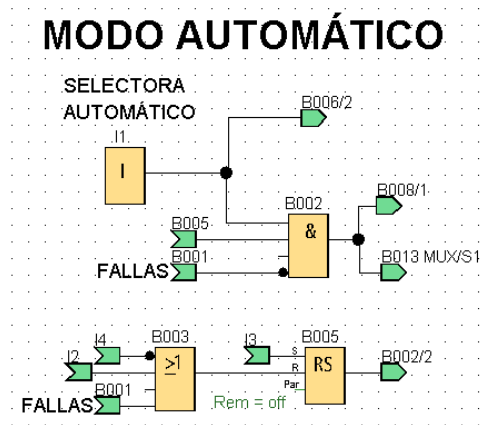


Figura 2.6 Sección de la programación para el modo automático

3. **Modo manual:** Es una de las señales eléctricas del selector de tres posiciones (entrada 2), esta permite que el sistema funcione en lazo cerrado. Al igual que en la sección anterior, para su funcionamiento no debe existir ninguna falla, el variador debe estar encendido, el botón de paro no debe estar encendido y es un sistema mutuamente excluyente del modo automático.

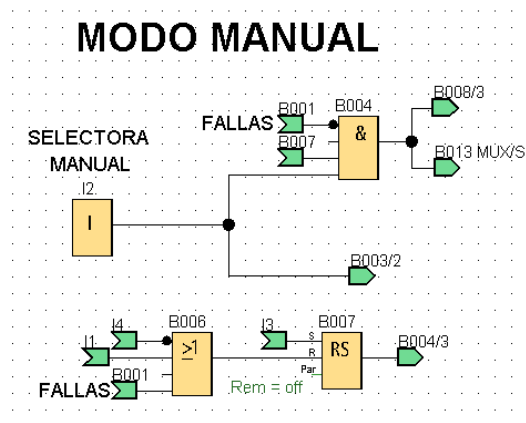


Figura 2.7 Sección de la programación para el modo manual.

4. **Fallas:** Cuenta con las señales eléctricas del flotador (entrada 5) y la del guardamotor (entrada 6). La boya eléctrica permite la apertura del sistema eléctrico de la bomba (apagado) cuando el tanque se encuentra lleno, evitando que este se rebose; mientras que, si ocurre una falla interna en la bomba el guardamotor actuará apagando la bomba, enviando una señal de falla.

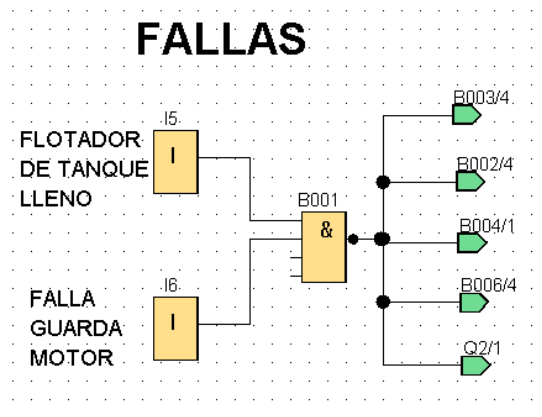


Figura 2.8 Sección de la programación para el modo fallas.

5. **Salidas digitales:** Las salidas digitales están conectadas a indicadores luminosos que permitirán determinar si el sistema se encuentra en marcha (Q1), en caso de que se encuentre funcionando en modo automático o manual; así como, a un indicador de falla (Q2) en caso de que se enciendan las señales del flotador o del guardamotor.

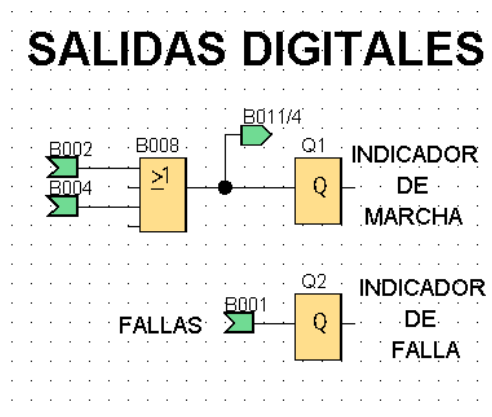


Figura 2.9 Sección de la programación para las salidas digitales.

6. **Run/Paro Remoto:** Estas señales de accionamiento son dadas mediante una señal de red para el accionamiento del variador. El encendido del variador (Q3) está condicionado por varias señales, una de ellas es que no debe existir falla en el variador (entrada 7), otra que el botón físico de paro no debe estar encendido, así como también que no se debe haber enviado mediante la red ninguna señal de paro remoto. Ninguna señal funciona con redundancias, es decir, si el sistema se encuentra encendido por el botón de marcha, las señal remota enviada por la red para el encendido no causarían ningún efecto en el sistema; lo mismo ocurre con la señal de paro remoto.

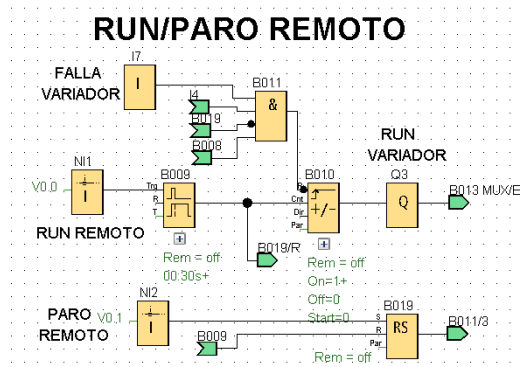


Figura 2.10 Sección de la programación para control remoto.

7. **Entradas/Salidas Analógicas:** Las señales analógica de entrada es la del caudalímetro (entrada 8), mediante una señal de red -comunicación OP- se puede obtener el valor que mide el equipo. En esta sección mediante señales de red se pueden obtener los datos analógicos del modo manual y automático.

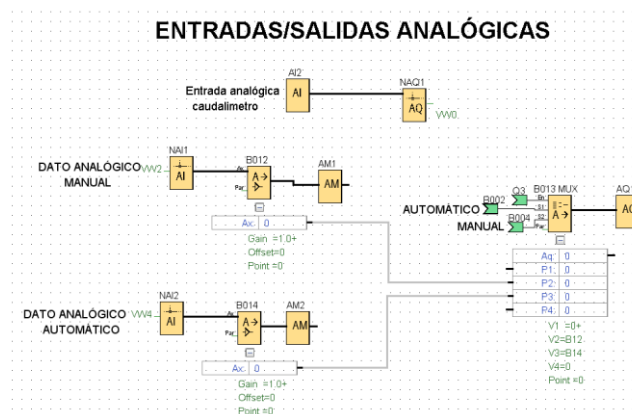


Figura 2.11 Sección de la programación para las entradas y salidas analógicas.

## **2.2 IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA**

El diseño eléctrico de la parte de fuerza y control descritos en la sección 2.1, permiten la identificación de la planta que se describe en esta sección, la cual consiste en obtener la curva característica del sistema, selección del punto de operación, prueba ante una señal escalón, diseño del experimento y acondicionamiento de los datos.

### **2.2.1 CURVA CARACTERÍSTICA**

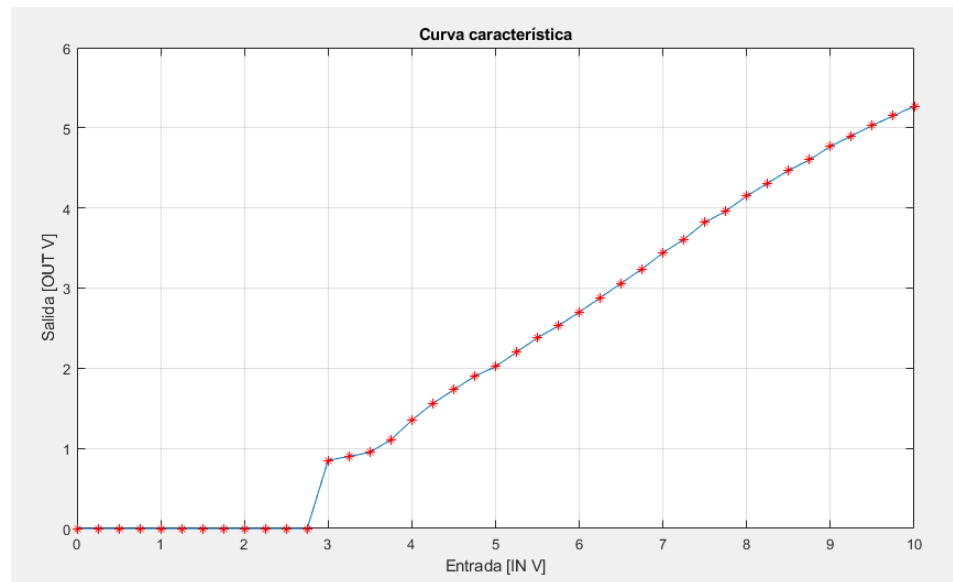
La curva característica se realiza a partir de los datos obtenidos en el modo manual. Se realizan pruebas de la señal de entrada, voltaje en variador, para obtener diferentes valores de las señales de salida y formar la curva característica.

La obtención de una curva característica que permita la selección adecuada de un punto de operación se realiza con pruebas que tenga una varianza muy pequeña. En el caso del presente proyecto se ha decidido realizar pruebas con una varianza de 0.25 V, que van desde voltaje mínimo hasta el máximo que recibe el variador en su entrada, 0 y 10 V respectivamente.

Las señales de salida obtenidas por la programación y los equipos de medición son tres: 1) La frecuencia del variador, 2) El voltaje de salida del caudalímetro, y 3) El caudal medido por el caudalímetro.

Mediante la herramienta computacional MATLAB® se realiza el procesamiento de los datos obtenidos en las señales de entrada y salida. La curva característica será el gráfico del voltaje de entrada recibido por el variador (eje x) y el voltaje de entrada de salida del caudalímetro (eje y), de este modo se podrá definir un punto de operación adecuado para el sistema.





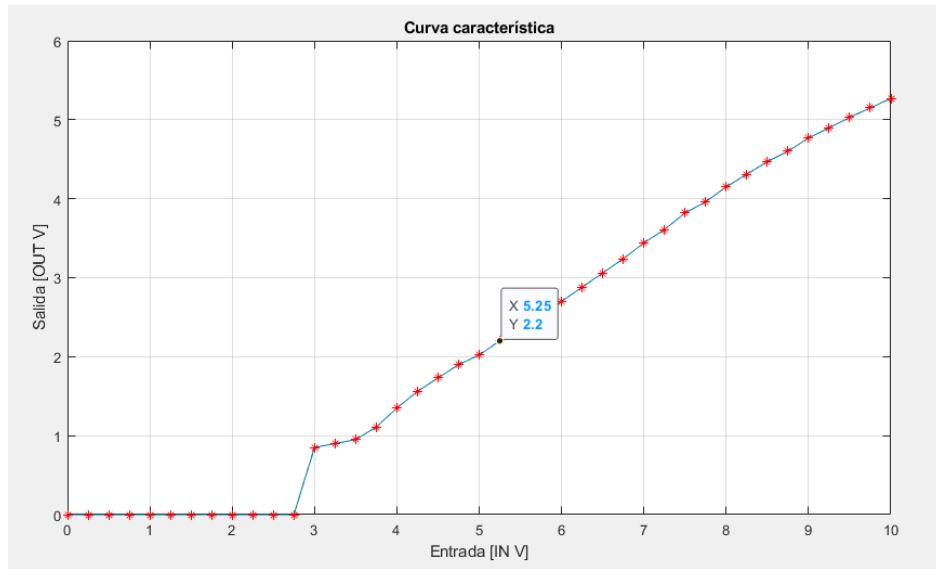
**Figura 2.12** Curva característica de la planta de caudal, siendo la entrada el voltaje del variador y la salida la señal voltaje del caudalímetro.

### 2.2.2 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN

La selección del punto de operación se obtiene a partir de la linealización del sistema, ya que se busca un valor de la curva que tenga una tasa de variación 0 con respecto al tiempo, es decir, un punto de equilibrio.

Además, cabe recalcar que las aproximaciones lineales de un sistema no lineal solo son útiles en la vecindad del punto de operación, por lo que la selección del punto debe llevarse a cabo en una sección lineal de la curva característica del sistema.

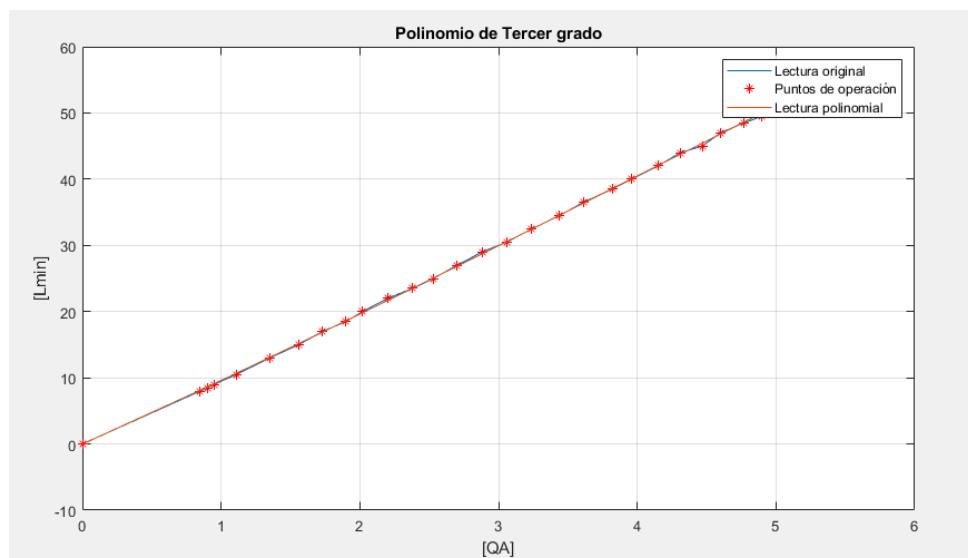
En el caso del presente trabajo de titulación, el punto de operación seleccionado fue un voltaje de entrada  $V_{in}$ : 6.25 V y un voltaje de salida  $V_{out}$ : 2.88V. El punto fue seleccionado, ya que en la vecindad de dicho punto se encuentran puntos de equilibrio, ya que tienen un comportamiento lineal con respecto al resto de la curva característica; esto permitirá la creación de un controlador para un sistema estable.



**Figura 2.13** Punto de operación de la curva característica de la planta de caudal.

### 2.2.3 RELACIÓN VOLTAJE-CAUDAL

Debido a que el funcionamiento del caudalímetro se define en L/min y no en voltaje, se debe realizar la obtención de un polinomio característico mediante interpolación que permita relacionar su voltaje de salida y su caudal. La interpolación se debe realizar de diferentes grados, en este caso se evalúan un polinomio lineal, uno cuadrático y uno cúbico, obteniendo que la mejor aproximación es el polinomio de grado 3.



**Figura 2.14** Aproximación lineal para la planta de caudal (sistema no lineal)

La elección de la mejor aproximación se puede realizar de dos formas: mediante forma empírica y de forma técnica. De forma empírica se realiza al observar los resultados obtenidos de cada interpolación como los que se muestran en la Figura 2.14, en este caso, de forma empírica el polinomio característico es de grado 3. Por otro lado, de forma técnica se puede obtener mediante el criterio de los mínimos cuadrados, su implementación en MATLAB® se realiza tal como se muestra en la Figura 2.15.

### Instrucciones Matlab

**YI = Interp1(X,Y,XI,metodo)** Interpola entre puntos X,Y; X vector de valores x, Y vector de valores y, XI valor a interpolar,  
**YI** resultado de la interpolación en XI, **método**:  
 'nearest' - redondeo al valor más cercano  
 'linear' - interpolación lineal  
 'spline' - interpolación segmentaria cubica Spline  
 'cubic' - aproxima a un polinomio cúbico

**YI = spline(X,Y,XI)** Evalúa XI  
**P = spline(X,Y)** Devuelve los coeficientes de los polinomios en formato "pp"  
**[X,coef,npol,nterm,dim] = unmkpp(P)** Recupera información de los polinomios  
**YI = ppval(P,XI)** Evalúa polinomios "pp" en un punto

**[coef,P] = polyfit(X,Y,N)** Ajusta X,Y con un polinomio de grado N, ( por mínimos cuadrados), **coef** son los coeficientes del polinomio y P es el polinomio "pp" para ser evaluado con ppval

Figura 2.15 Instrucciones para elección de polinomio característico a través de mínimos cuadrados.

## 2.2.4 PRUEBAS DE LA PLANTA

Las pruebas de la planta se realizan con el sistema de control mostrado en la figura, el cual ha sido configurado con un voltaje de referencia de 5 V con una varianza de 0.5 V, es decir, el sistema opera con valores que se encuentran entre 5.5 V y 4.5 V.

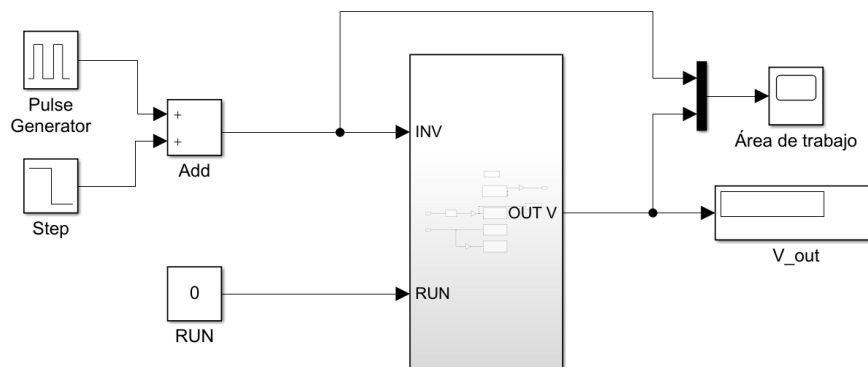


Figura 2.16 Modelo para la identificación de la planta, prueba de voltaje de operación con variaciones.

La selección de la frecuencia del tren de pulsos fue dada a través de las pruebas realizadas en la planta a partir del tiempo de estabilización. Dado que el tiempo de estabilización durante las pruebas fue de aproximadamente 0.66 s, la selección de la frecuencia del tren de pulsos debía ser al menos el inverso de este tiempo, ya que caso contrario no se podría capturar la dinámica de la planta debido a que tendría otra perturbación antes de que logre estabilizarse, lo cual no es práctico para la identificación. El período implementado para este tren de pulsos fue ajustado a un valor 2 segundos para poder capturar completamente la dinámica del sistema.

### 2.2.5 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

La Figura 2.16 muestra el modelo del experimento para la identificación de la planta, este cuenta con un bloque STEP y un tren de pulsos, ambos bloques son los que permiten que el voltaje de referencia sea 5 V y varíe 0.5V respectivamente. Posteriormente a los bloques, se encuentra el subsistema que está enlazado con la planta, el cual muestra los componentes detallados en la Figura 2.16.

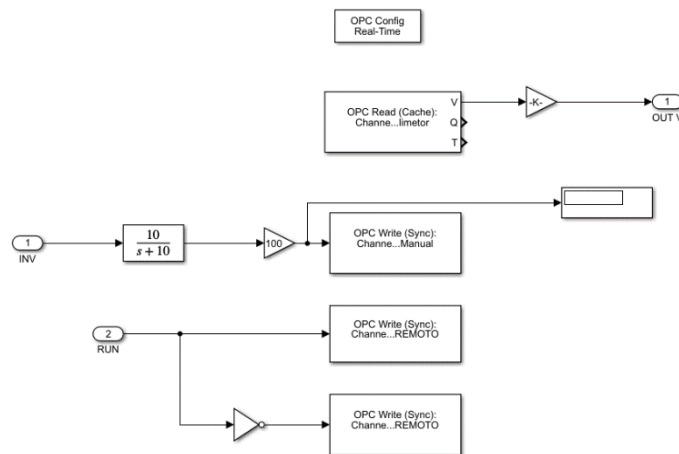
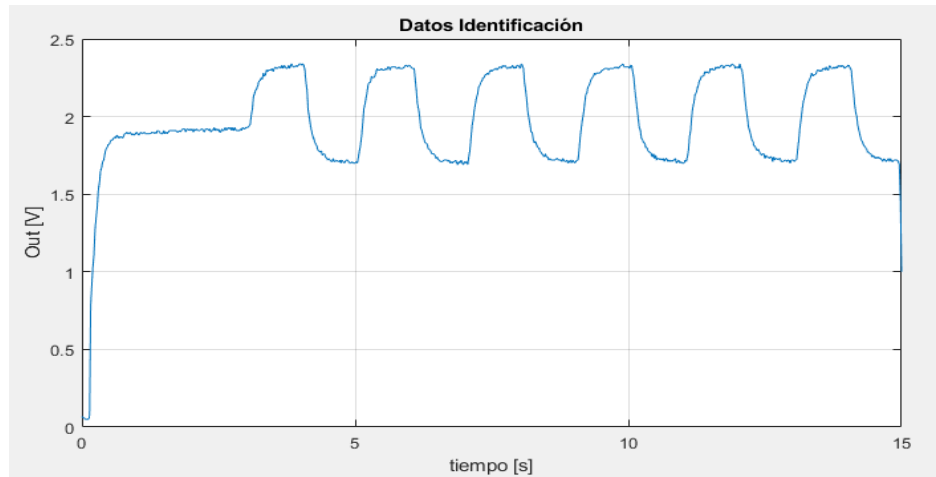


Figura 2.17 Sistema de lazo abierto de la planta de caudal.

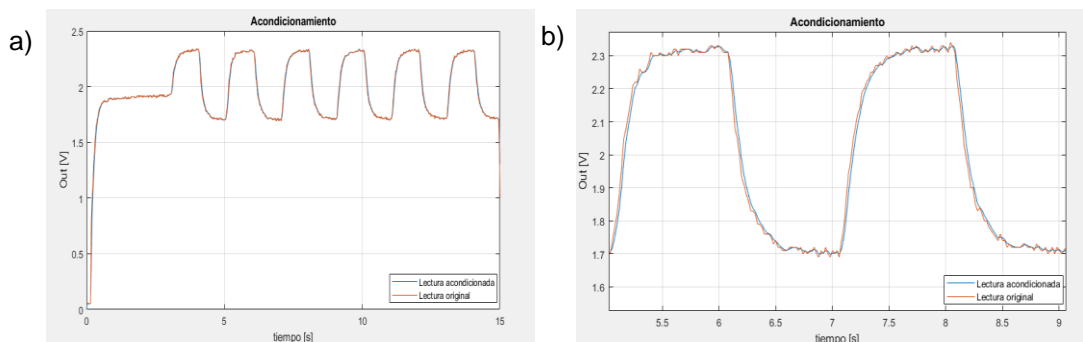
Finalmente, se muestran el osciloscopio que tiene la respuesta del sistema ante la entrada escalón, la cual se ve que a medida que el voltaje varía, también cuenta con una variación.



**Figura 2.18** Salida de voltaje del caudalímetro ante la respuesta de un escalón. Voltaje vs tiempo en segundos.

## 2.2.6 ACONDICIONAMIENTO DE LOS DATOS

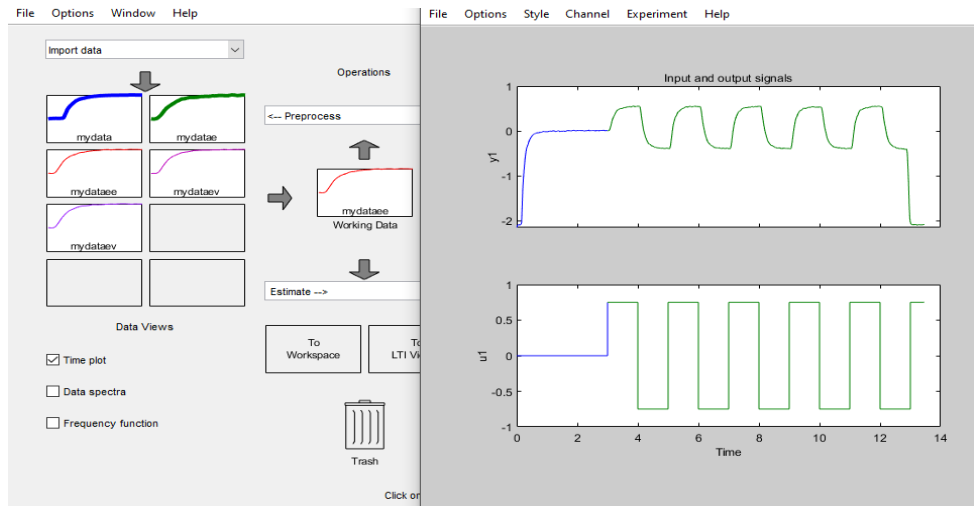
El acondicionamiento de los datos se realiza mediante un filtrado de los resultados obtenidos, ya que estos tienen mucho ruido. Con la ayuda de unas líneas de código en un algoritmo se obtienen los resultados mostrados en la Figura 2.19, en las cuales existen dos señales, una sin el filtrado (roja) y una con el filtrado (azul).



**Figura 2.19** Salida del caudalímetro con filtrado (señal azul) y sin filtro (rojo). a) Comparación de la señal durante todo el período de pruebas, y b) Comparación de la señal durante dos períodos.

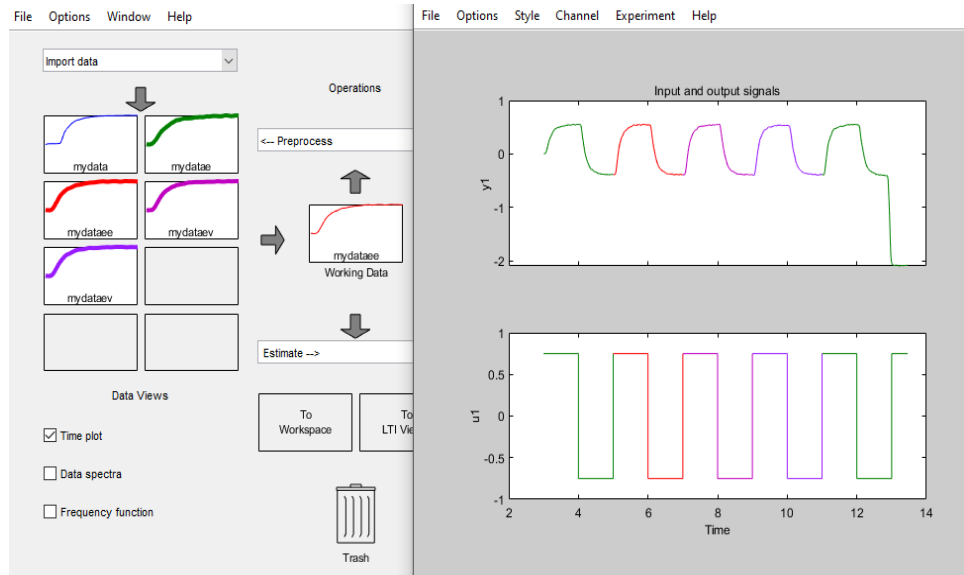
## 2.2.7 FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA

Mediante la herramienta “System Identification” se obtiene la función de transferencia de la planta de caudal, para aquello se debe elegir de la señal de salida solo el intervalo donde ocurren las variaciones de voltaje, tal como se muestra la Figura 2.20.



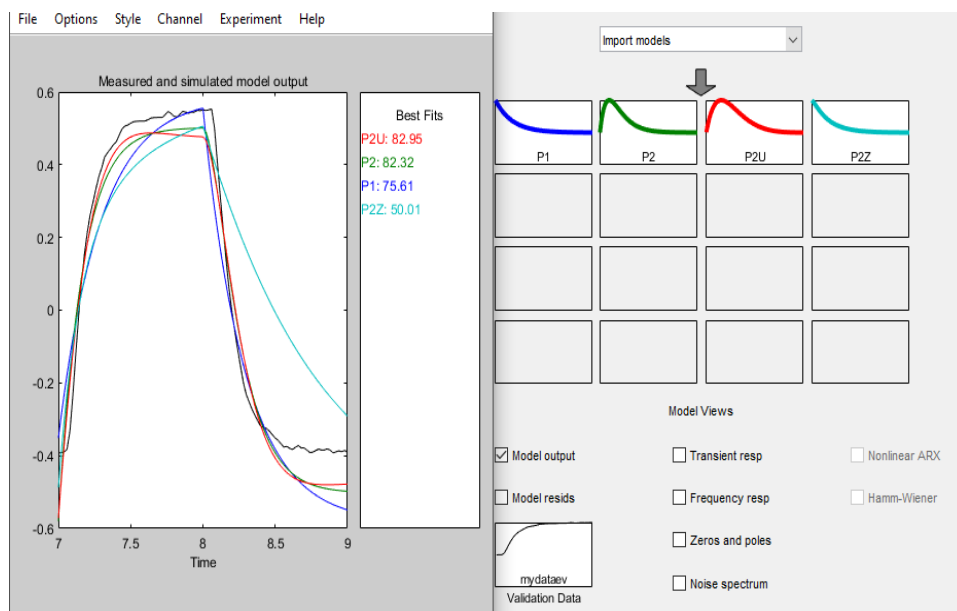
**Figura 2.20** Intervalo de señal de salida elegida en la herramienta “System Identification”

Posteriormente se seleccionan los períodos que sean los más suaves en la señal de salida para poder tener una mejor identificación de la planta, esto se muestra en la Figura 2.21.



**Figura 2.21** Selección de tramos de señal para identificación de planta.

Con las señales seleccionadas se puede elegir el tipo de función de transferencia que se quiere estimar, la opción más adecuada siempre será la que tenga una mayor proximidad con la salida del sistema. En este caso, se han estimado tres funciones de transferencia: 1) un polo, 2) dos polos, 3) dos polos conjugados y 4) un cero con dos polos.



**Figura 2.22** Resultados obtenidos en la identificación de la planta.

Una vez realizado el procedimiento con la herramienta Sisotool, se procede a obtener la función de transferencia de la planta, eligiendo la que mejor represente el comportamiento de esta. La función de transferencia elegida es la que se muestra en la ecuación 2.1.

$$F(s) = \frac{38.165}{(s + 7.561)(s + 7.534)} \quad (2.1)$$

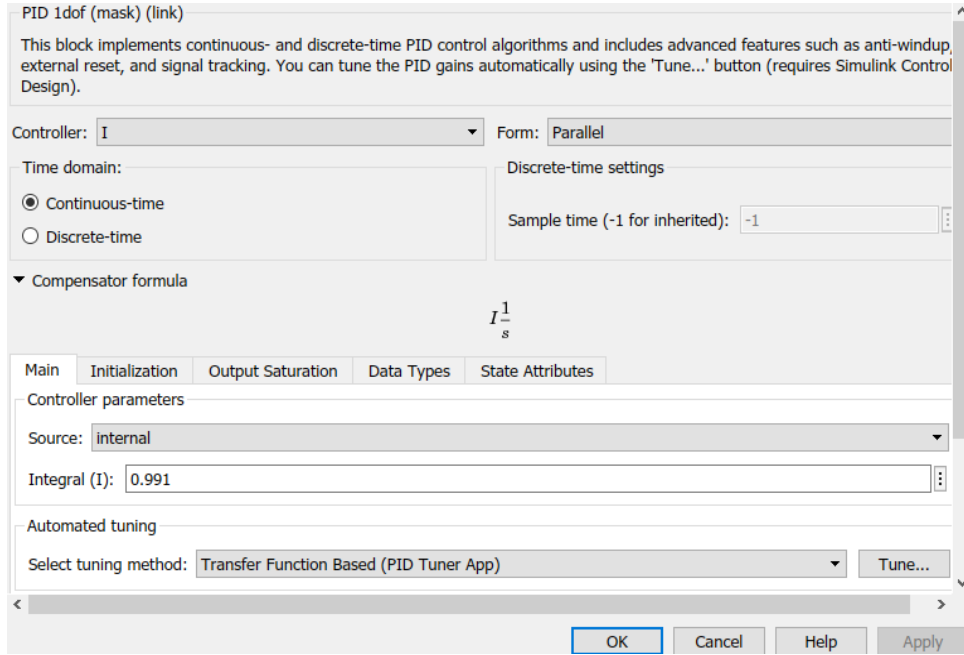
### 2.3 CONTROLADOR DE LA PLANTA

El controlador de la planta de caudal fue diseñado considerando al menos dos características deseadas en su función de transferencia:

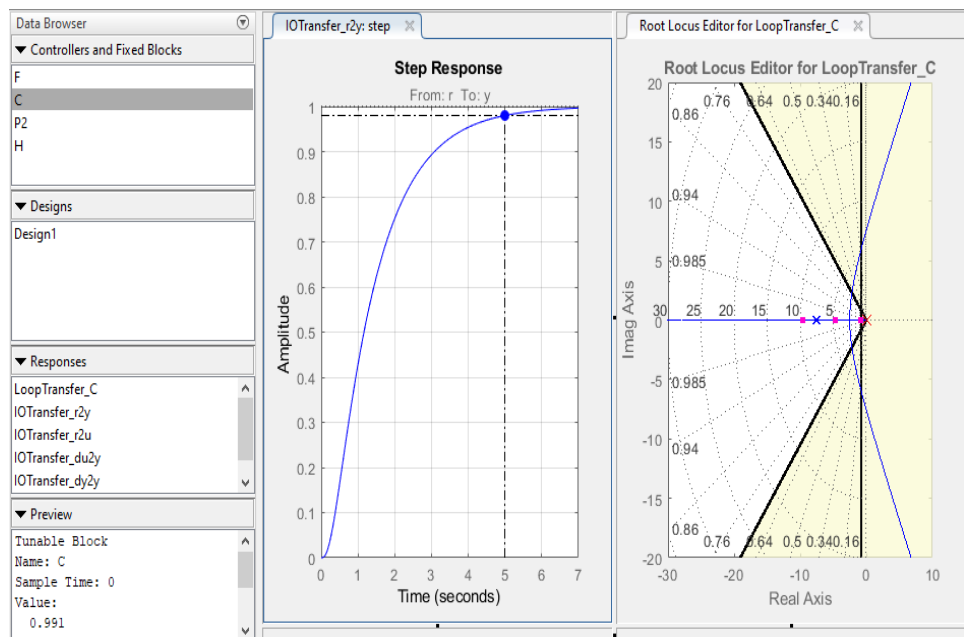
1. No exista un sobrenivel porcentual (overshoot)
2. Tiempo de estabilización considerable

En el caso de la primera característica, esta es necesaria debido a que la planta será empleada de forma didáctica para la enseñanza no es adecuado que exista un overshoot, pues al existirlo causa que el tanque se llene muy rápido y este se apague debido a la boya mecánica con la que cuenta. Por otro lado, el tiempo de estabilización debe ser considerable porque se desea apreciar la dinámica de la planta, de tal modo que se pueda observar cómo varía con el tiempo la respuesta hasta el valor configurado (seteado).

Debido a estas características el controlador del sistema será una función de transferencia I, la cual será obtenida a través del programa sisotool y permitirán obtener el valor de  $K_i$ .



**Figura 2.23** Valor de  $K_i$  para el controlador I de la planta de caudal que cumple con las características deseadas.



**Figura 2.24** Características de la planta implementadas en sisotool.



La Tabla 2.2 describe lo mostrado en la Figura 2.23, acerca de la constante integral para el controlador elegido.

**Tabla 2.2** Valor de la constante para el controlador de la planta de caudal.

Constante	Ki
Valor	0.991

## 2.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Los criterios que se emplearán para evaluar el sistema de control son los requerimientos generales establecidos para todas las plantas, tal como se encuentran descritos en la sección 1.5.4, los cuales son los siguientes:

- Estabilidad
- Precisión
- Rapidez de respuesta

En el caso de la rapidez de respuesta, como esta planta será utilizada para fines didácticos se espera que el tiempo de estabilización sea de al menos 5 segundos.

A continuación, el capítulo 3 describe los resultados obtenidos al implementar el controlador de la planta de caudal mediante cuatro pruebas diferentes, las cuales permitirá determinar si este cumple con los criterios descritos en esta sección.

# CAPÍTULO 3

## 3 EVALUACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL

El presente capítulo realiza un análisis del sistema de control implementado en la planta de caudal con la implementación física -circuitos de control/fuerza en tablero eléctrico-, y la implementación digital -programación del logo, identificación de planta y control I-. Los resultados de la planta de caudal son procesados por la herramienta computacional MATLAB® mediante la cual se obtiene la gráfica de salida de caudal versus tiempo.

La evaluación del sistema de control de la planta se lleva a cabo mediante un caso de estudio que depende de las señales de referencia definidas, de tal modo que se pueda observar el comportamiento dinámico del controlador.

### 3.1 CASO DE ESTUDIO

La Figura 3.1 muestra el controlador del sistema y el diagrama de bloques del esquema final. El sistema tendrá dos modos de operación: manual y automático.

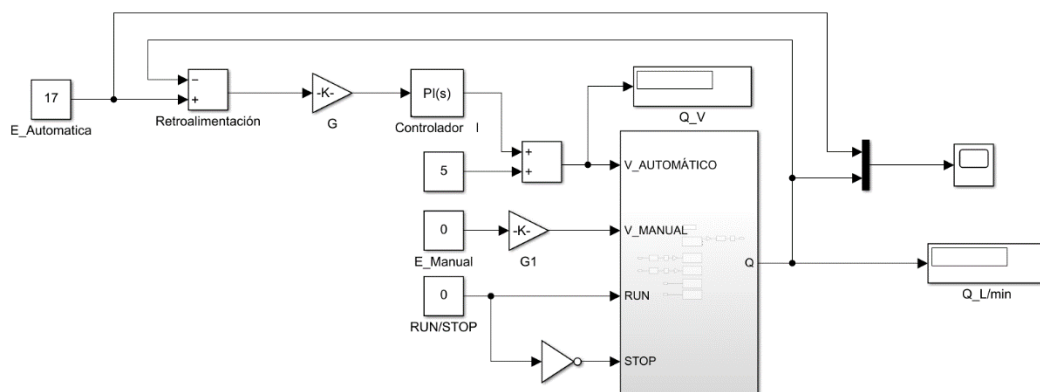


Figura 3.1 Diagrama de bloques de planta de caudal con sistema de control implementado.

En el modo de operación manual se ingresa un valor de caudal deseado en voltaje, esta operación se realiza en lazo abierto y opera de 0 a 10 V, la cual permite obtener a la salida las señales como el voltaje de salida del variador y el caudal. En el modo automático se tiene que ajustar el valor de  $E_{automática}$  el cual es el caudal de referencia (opera de 0 a 54.5 L/min) a través de una retroalimentación

obtiene el error del sistema que es transformado a voltaje a través de la función inversa del polinomio característico y finalmente es sumada con el punto de operación elegido para el sistema -que para este caso de estudio fue de 5.25 voltios-, obteniendo el voltaje enviado al variador y por ende obteniendo una salida de caudal tal como se muestra en la sección 3.2.

El caso de estudio entonces estará definido solo para el caso de modo automático, dado a que el modo manual solo se utiliza para la identificación de la planta además de no contar con el controlador I, que es lo que se desea evaluar en la presente sección. Las señales definidas para el modo automático son las siguientes para las cuatro pruebas definidas como casos de estudio:

**Tabla 3.1** Pruebas realizadas en la planta de caudal con controlador I.

Caso de Estudio	Caudal de referencia (E_automática) [L/min]	Voltaje de operación [V]
Prueba 1	27	5.25
Prueba 2	15.5	
Prueba 3	23	
Prueba 4	11	

## 3.2 RESULTADOS OBTENIDOS

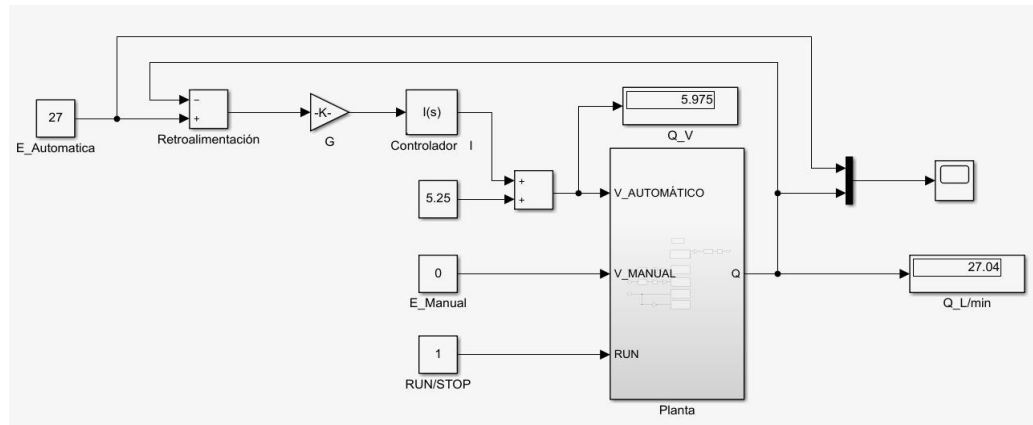
La presente sección presenta los resultados obtenidos en la planta de caudal con la implementación del sistema de control, las gráficas presentadas serán las de caudal vs tiempo, de tal modo que se puede observar el comportamiento del sistema.

### 3.2.1 CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 1

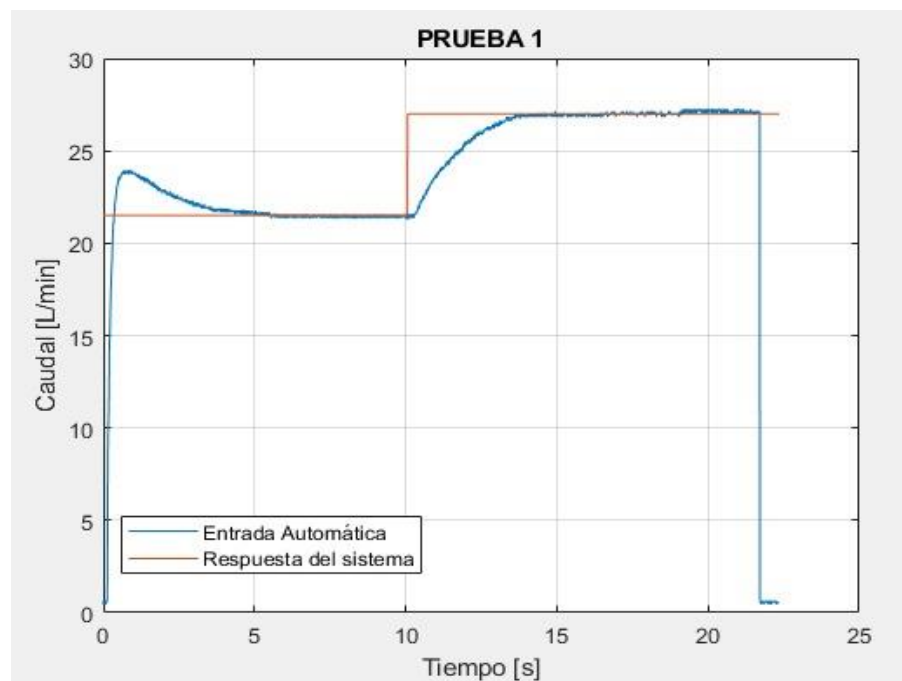
La Figura 3.1 muestra el diagrama de bloques de la planta, en el cual se puede observar que el valor de caudal de referencia ajustado para este escenario es de 27 L/min, mientras que el voltaje de operación es de 5 voltios.

La Figura 3.2 muestra el resultado de esta prueba, tal como se puede observar en esta figura y en el resto de las pruebas los primeros 10 segundos es la estabilización del sistema en los 21.5 L/min que es su punto

de operación, posteriormente se observa el comportamiento del sistema ante una señal de referencia de 27 L/min.



**Figura 3.2** Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 1.



**Figura 3.3** Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 1.

Como se puede observar el tiempo de estabilización de la planta es de alrededor de 5 segundos, con un valor eficaz de caudal de 27.04 L/min cuando la señal se estabiliza. Tal como se muestra en la figura el sistema es estable durante la prueba.

### 3.2.2 CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 2

La Figura 3.4 muestra el diagrama de bloques de la planta, para esta ocasión el sistema se establece que el caudal de referencia tenga un valor de 15.5 L/min, con un voltaje de operación de 5.25 V.

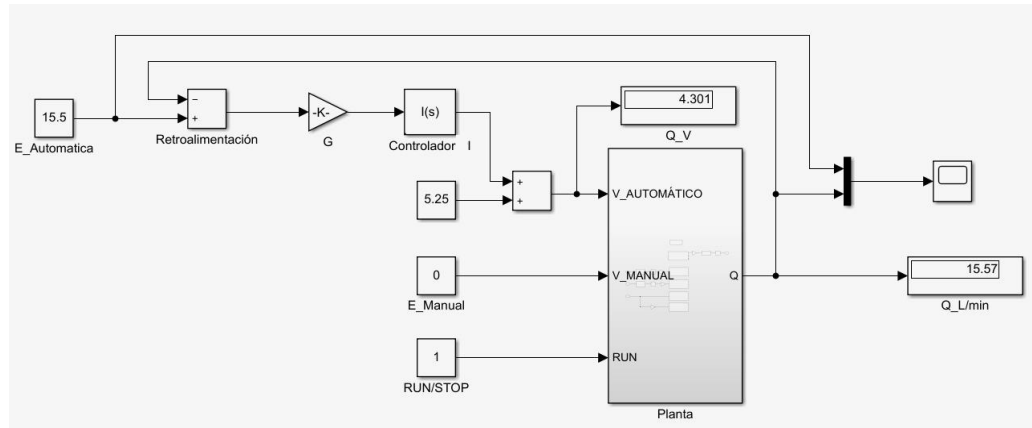


Figura 3.4 Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 2.

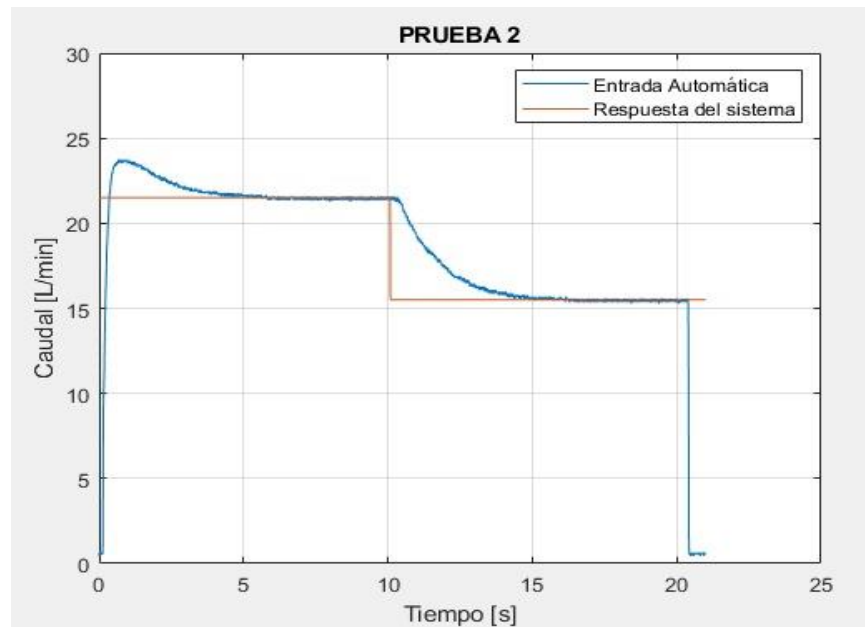


Figura 3.5 Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 2.

La Figura 3.5 muestra la señal de salida, inicialmente luego de estabilizarse en 21.5 L/min se ejecuta la prueba de escalón a 15.5 L/min, en esta se puede observar que la planta se estabiliza después de 5 segundos, el sistema es estable durante la prueba y el diagrama esquemático muestra que tiene una salida eficaz de 15.7 L/min.

### 3.2.3 CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 3

La Figura 3.6 muestra las condiciones bajo la que se ejecuta la prueba 3 como caso de estudio, en la cual el valor de caudal de referencia es de 23 L/min con un voltaje de operación de 5.25 V.

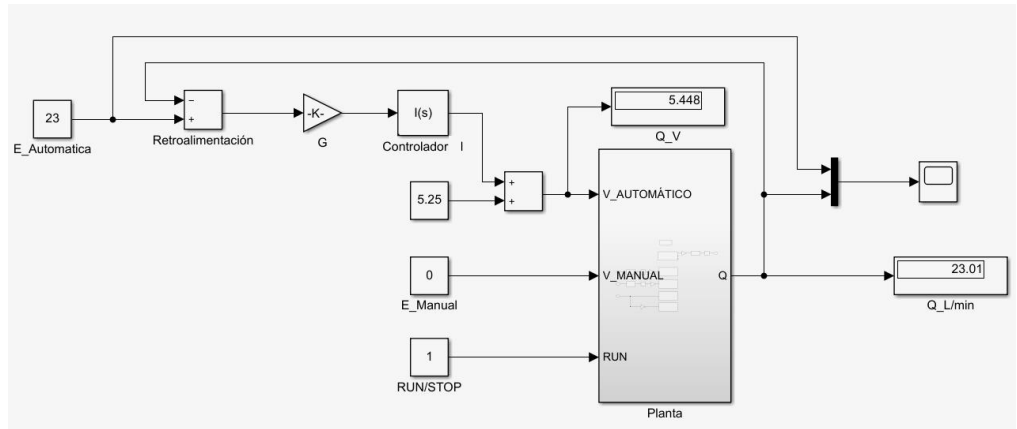


Figura 3.6 Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 3.

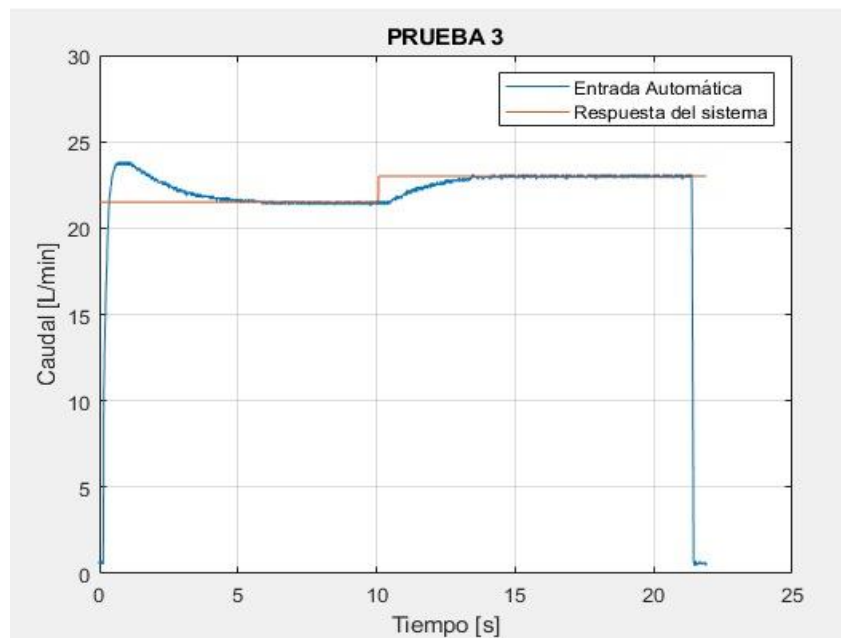


Figura 3.7 Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 3.

La Figura 3.7 muestra la señal de salida, luego de estabilizarse en 21.5 L/min, la señal crece hasta el valor configurado el cual es de 23.01 L/min con un tiempo de estabilización de 5 segundos, la señal de salida sigue siendo estable durante todo el tiempo de la prueba.

### 3.2.4 CASO DE ESTUDIO: PRUEBA 4

El diagrama esquemático mostrado en la Figura 3.8 muestra que el caudal de referencia es de 11 L/min, con un voltaje de operación de 5.25 V.

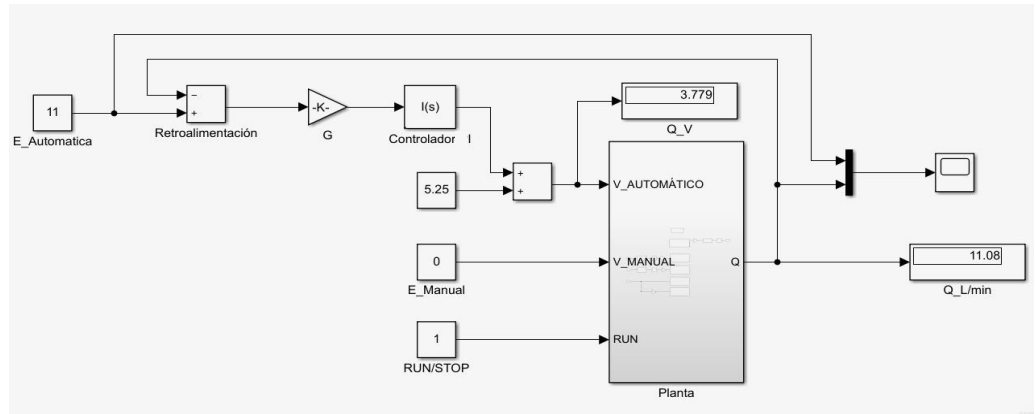


Figura 3.8 Diagrama de bloques con señales ajustadas para el modo automático: prueba 4.

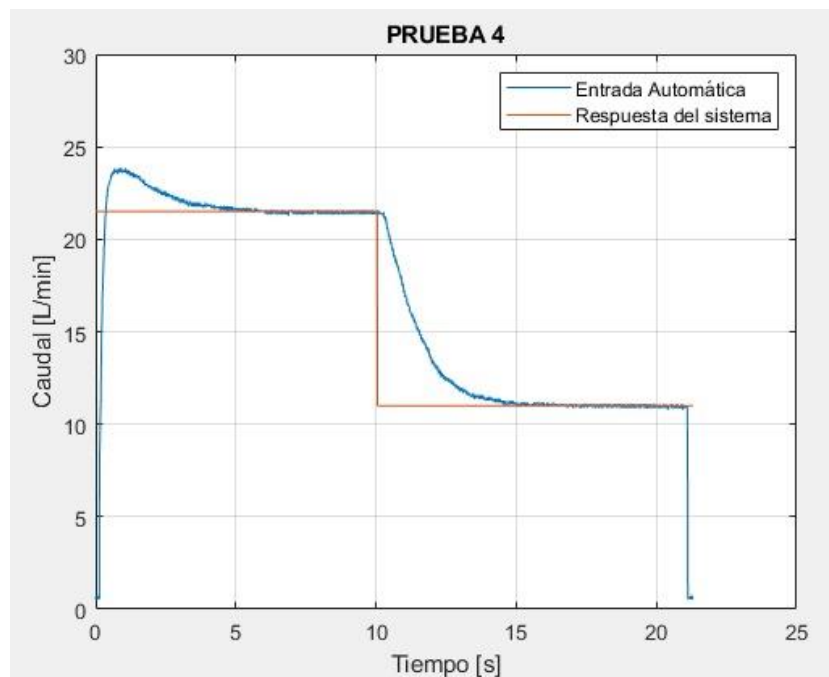


Figura 3.9 Gráfica caudal vs tiempo, escenario de prueba 4.

La Figura 3.9 muestra la señal de salida, luego de estabilizarse en 21.5 L/min, la señal crece hasta el valor configurado el cual es de 23.01 L/min con un tiempo de estabilización de 5 segundos, la señal de salida sigue siendo estable durante todo el tiempo de la prueba

### 3.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Las cuatro pruebas realizadas como caso de estudio son evaluadas con los criterios definidos en la sección 2.4, los cuales se encuentran detallados en la Tabla 3.2 la cual muestra que todos los escenarios cumplen con lo establecido.

**Tabla 3.2** Resultados obtenidos de las pruebas al sistema de control de la planta de caudal

Caso de Estudio	Caudal de referencia (E_automática) [L/min]	Caudal obtenido en la salida [L/min]	Error [%]	¿Tiempo de estabilización de al menos 5 segundos?	¿El sistema es estable durante la prueba?
Prueba 1	27.00	27.04	0.15	Sí	Sí
Prueba 2	15.50	15.57	0.45	Sí	Sí
Prueba 3	23.00	23.01	0.04	Sí	Sí
Prueba 4	11.00	11.08	0.73	Sí	Sí

La tabla 3.2 muestra que durante las cuatro pruebas se tuvo un error entre la señal de caudal de salida y la señal de referencia ajustada, el mínimo error es del 0.15% y el mayor error es del 0.73%. Los errores mostrados en esta columna son menores al 5%, lo cual indica que el resultado que se obtiene es significativo, e indica que el controlador está diseñado para poder obtener un caudal idéntico al solicitado por la señal de referencia. Por otro lado, esto también destaca que cumple uno de los criterios de evaluación, el cual es que el sistema de control tenga precisión; esto ocurre tanto para valores que se encuentran encima y abajo del valor de operación inicial el cual es de 21.5 L/min.

De mismo modo los cuatro escenarios muestran que el controlador diseñado para la planta de caudal cumple con el requerimiento del tiempo de estabilización, pues todas las cuatro pruebas tienen al menos una ventana de 5 segundos, lo cual forma parte del diseño debido a que la planta será utilizada con fines didácticos en el laboratorio de Sistemas de Control, para la familiarización de los estudiantes.

Por otro lado, la señal de salida de la planta de caudal muestra que el sistema es estable durante las pruebas realizadas a la planta para los casos de estudio, esto corrobora lo mostrado por la herramienta Sisotool de Simulink en la Figura 2.16,



donde se puede observar que las raíces del sistema de control se encuentran en la parte izquierda del plano, lo cual en la teoría indica que el controlador permitirá que el sistema sea estable; pero los resultados obtenidos en las diferentes figuras de la sección 3.2 corroboran que en la práctica esto es así.

En base a lo analizado durante las pruebas a la planta de caudal se puede inferir que el controlador cumple con la evaluación de los tres requerimientos propuestos en la sección 2.4, ya que el controlador I es *preciso*, tiene un *tiempo de estabilización* con un intervalo de al menos 5 segundos y es *estable* durante la operación de la planta, lo cual permite validar el diseño del sistema de control. Dado a que en este capítulo se evaluó y validó el diseño del controlador I este puede ser usado en el laboratorio de Sistemas de Control de ESPOL, para familiarizar al estudiante con la planta de caudal y el diseño de controladores mediante herramientas computacionales.

# CAPÍTULO 4

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Se evaluó el desempeño del sistema de control implementado mediante el equipo LOGO V8 en conjunto con la herramienta computacional MATLAB®, mediante cuatro pruebas diferentes validando que el modelo cumple con los requerimientos solicitados para un buen sistema de control, lo cual causa que el sistema implementado sea válido para su uso en el laboratorio.
- El sistema de control I tiene una señal de salida con un error menor al 1% respecto a la señal de referencia de entrada, lo cual implica que las respuestas obtenidas en las gráficas caudal vs tiempo son muy precisas, haciendo que el funcionamiento del controlador sea confiable.
- Se diseñó el sistema eléctrico de fuerza y control de la planta de caudal para su funcionamiento de lazo abierto y en lazo cerrado, correspondiendo al modo manual y automático, respectivamente. En el diseño el modo manual solo es útil para obtener datos de la planta para su identificación y para el posterior diseño del sistema de control; mientras que, el modo automático es el que permite la evaluación del controlador I.
- Se obtuvo el modelo matemático de la planta, el cual fue denominado polinomio característico. Dicho polinomio fue útil para el diseño del modo automático, pues mediante interpolación se puede obtener una relación entre tensión y caudal, de tal modo que se pueda realizar una evaluación de resultados confiable.
- Con el presente proyecto se repotencia la planta de caudal en el laboratorio de Sistemas de Control de ESPOL, permitiendo que los equipos existentes se adapten cada vez más a los requerimientos de los estudiantes de pregrado de ESPOL. A su vez, que genera interés en los estudiantes por la investigación.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- El presente proyecto ha realizado la implementación de un solo sistema de control que cumple con los tres requerimientos a evaluar; sin embargo, en proyectos futuros se pueden realizar el diseño de diferentes sistemas de control y evaluar su implementación en la planta.
- Debido a que la planta de caudal está funcionando con un punto de operación menor a la mitad de su capacidad total, 21.5 L/min de 54.5 L/min, se debe agrandar el tanque para poder utilizar el sistema de control a niveles de caudal mayores a 30 L/min. Al agrandar el tanque se puede trabajar con mayores niveles de caudal y validar el diseño para la capacidad total de la bomba.
- Habilitar el sensor de nivel del tanque para poder mejorar el funcionamiento de la planta, de tal modo que se pueda generar un control multivariable, ya que el sistema de control implementado en la planta ya no solo tendría como variable el caudal generado por la bomba a través del variador, sino también el nivel de agua en el tanque.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. L. P. Tapia, D. C. Mamani, L. C. C. Huacani, D. W. D. L. C. Paredes, y M. J. Mamani, "Importancia del trabajo en el laboratorio en los procesos de enseñanza – aprendizaje en ingeniería", *Nawparisun - Rev. Investig. Científica*, vol. 3, núm. 1, Art. núm. 1, oct. 2020, doi: 10.47190/nric.v3i1.125.
- [2] E. A. Reyes Aguilera, "Prácticas de laboratorio: la antesala de la realidad", *Rev. Multi-Ens.*, vol. 6, núm. 11, ene. 2020, doi: 10.5377/multiensayos.v6i11.9290.
- [3] E. A. Espinoza Ríos, K. D. González López, y L. T. Hernández Ramírez, "Las prácticas de laboratorio: una estrategia didáctica en la construcción de conocimiento científico escolar", *Entramado*, vol. 12, núm. 1, pp. 266–281, 2016, doi: 10.18041/entramado.2016v12n1.23125.
- [4] G. Lugo, "Ingeniería: La importancia de los laboratorios", *Construcción y Tecnología*, núm. 223, pp. 20–22, 2006.
- [5] A. M. López Rúa y Ó. E. Tamayo Alzate, "Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las Ciencias Naturales", *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (Colombia)*, vol. 8, núm. 1, pp. 145–166, 2012.
- [6] J. L. Viscarra Zambrano y A. J. Avilés Cedeño, "Identificación y diseño del controlador para un sistema de regulación de caudal de líquido". Escuela Politécnica Superior del Litoral, 2011. [En línea]. Disponible en: [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19003/1/paper\\_viscarraviles.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19003/1/paper_viscarraviles.pdf)
- [7] R. Andrade Cedeño, "Módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua, mediante sistema SCADA, PLC y algoritmo PID", *RIEMAT*, vol. 4, núm. 2, pp. 50–63, 2019.
- [8] D. I. G. Rojas, "Desarrollo de un sistema de control de caudal y presión para un sistema de producción modular", Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21430/GuerreroRojasDianabeth2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] J. M. López Aguilar, "Diseño, construcción y control de una planta de llenado y vaciado de tanques", Trabajo de fin de grado de Ingeniería Electrónica Industrial, Escuela Superior Politécnica de JAÉN, Córdoba, España, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/14338/1/memoria%20final.pdf>
- [10] M. A. Perez, A. Perez Hidalgo, y E. Perez Berenguer, "Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo". Universidad Nacional de San Juan, 2007. [En línea]. Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf>
- [11] R. Ramos Lara, "Sistemas Digitales de Control en tiempo discreto". Universidad Politécnica de Catalunya, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/6123/TEMA6.pdf>
- [12] R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicación y simulación con MATLAB*, Primera. México: Pearson Education International, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://lcr.uns.edu.ar/fcr/images/Introduccion%20a%20Los%20Sistemas%20de%20Control.pdf>
- [13] S. E. Toledo Chojolán, "Diseño de controladores PID en tiempo discreto, y análisis de respuesta utilizando herramientas computacionales", Trabajo de grado para optar

- al título de Ingeniero Electrónica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2007. [En línea]. Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0202\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0202_EO.pdf)
- [14] V. Gómez Garay, “Acciones básicas de Control”. Universidad Nacional de San Juan, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/accionesdecontrol.pdf>
- [15] Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), “Automatización y Control de Procesos - Estabilidad de los sistemas en lazo cerrado”. Universidad Nacional de Tucuman, 2015. [En línea]. Disponible en: [https://catedras.facet.unt.edu.ar/aycp/wp-content/uploads/sites/88/2015/03/Estabilidad\\_Routh\\_new.pdf](https://catedras.facet.unt.edu.ar/aycp/wp-content/uploads/sites/88/2015/03/Estabilidad_Routh_new.pdf)
- [16] Facultad de Ingeniería (FI), “Teoría de Control: Controladores”. Universidad Nacional de Mar del Plata - UNMdP, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/control4c7/APUNTES/clase%206%20-%20Controladores.pdf>
- [17] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control (DIEEC), “Sistemas de Control y Proceso Adaptativo. Diseño y métodos y estrategias de control”. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 2015. [En línea]. Disponible en: [http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion\\_de\\_referencia\\_ISE7\\_1\\_2.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE7_1_2.pdf)
- [18] V. Mazzone, “Controladores PID”. Universidad Nacional de Quilmes, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [19] F. Morilla García, “El controlador PID”. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/El%20controlador%20PID.pdf>
- [20] Facultad de Ingeniería (FI), “Teoría de Control: Controlador PID”. Universidad Nacional de Mar del Plata - UNMdP, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/control4c7/APUNTES/clase%206%20-%20Controladores.pdf>
- [21] D. Chuk, “Los sistemas de primer orden y los controladores PID”. Universidad Nacional de San Juan, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/accionesdecontrol.pdf>
- [22] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control (DIEEC), “Controladores Industriales Inteligentes”. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 2014. [En línea]. Disponible en: [http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion\\_de\\_referencia\\_ISE6\\_1\\_1.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf)
- [23] H. Matrínez, “Módulo didáctico para prácticas de laboratorio con controladores lógicos programables”, Trabajo en opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería en Manufactura con Especialidad en Automatización, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/9535/1/1080214939.pdf>
- [24] Escuela Universitaria de Oficios, “Controlador Lógico Programable (PLC)”. Universidad Nacional de la Plata, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://yold.unlp.edu.ar/frontend/media/34/33734/5ec0cdabf060392904acb56348c3b8a9.pdf>

## ANEXOS

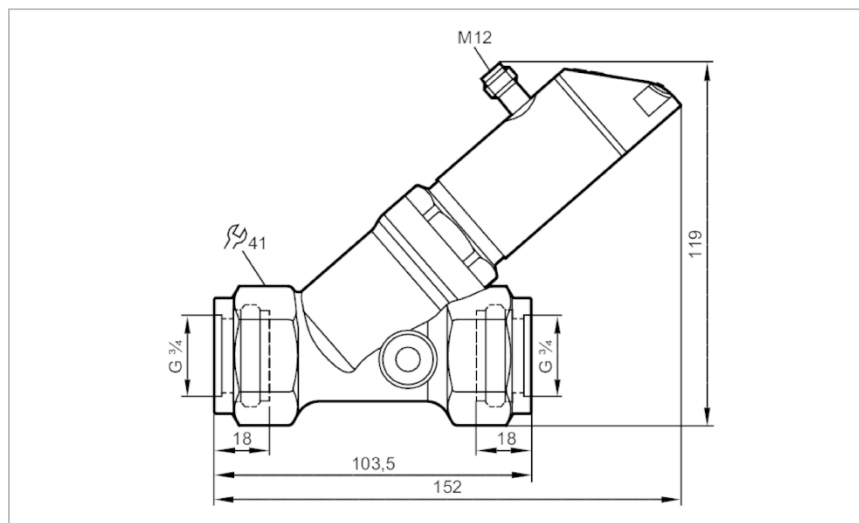
### ANEXO A. ESPECIFICACIONES GENERALES DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA

#### Caudalímetro con check de retención incluido

##### SBG246

Flow meter with integrated check valve and display

SBG34IF0FRKG



Product characteristics	
Number of inputs and outputs	Number of digital outputs: 2; Number of analog outputs: 1
Measuring range	2...100 l/min      0.12...6 m³/h
Process connection	threaded connection G 3/4
Application	
System	gold-plated contacts
Application	for industrial applications
Media	water; glycol solutions; Coolants; oil
Note on media	oil 1 with viscosity: 10 mm²/s (40 °C) oil 2 with viscosity: 46 mm²/s (40 °C)
Medium temperature [°C]	-10...100
Pressure rating [bar]	25
Pressure rating [Mpa]	2.5
MAWP (for applications according to CRN) [bar]	25
Electrical data	
Operating voltage [V]	18...30 DC; (according to EN 50178 SELV/PELV)
Current consumption [mA]	< 50
Protection class	III
Reverse polarity protection	yes
Power-on delay time [s]	< 3

Selection guide

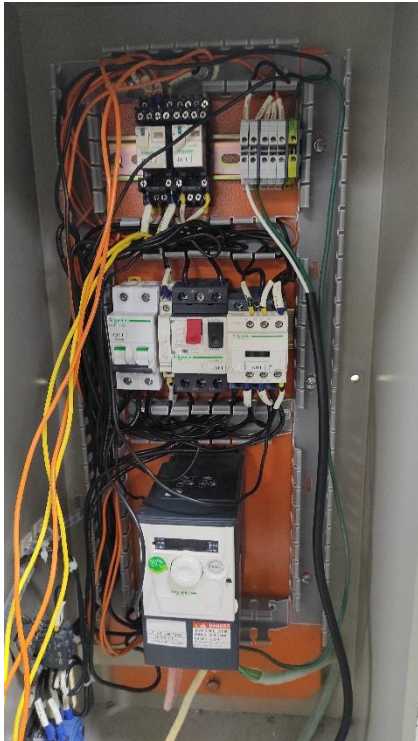
IP 20 or IP 21 variable speed drives for asynchronous and synchronous motors

Type of machine	Simple machines		Pumps and fans (building HVAC) (1)	
				
<b>Power range for 50...60 Hz (kW) line supply</b>	<b>0.18...4</b>	<b>0.18...15</b>	<b>0.75...75</b>	
Single-phase 100...120 V (kW)	0.18...0.75	–	–	
Single-phase 200...240 V (kW)	0.18...2.2	0.18...2.2	–	
Three-phase 200...230 V (kW)	–	–	–	
Three-phase 200...240 V (kW)	0.18...4	0.18...15	0.75...30	
Three-phase 380...480 V (kW)	–	–	0.75...75	
Three-phase 380...500 V (kW)	–	0.37...15	–	
Three-phase 500...600 V (kW)	–	–	–	
Three-phase 525...600 V (kW)	–	0.75...15	–	
Three-phase 500...690 V (kW)	–	–	–	
<b>Degree of protection</b>	IP 20	IP 21		
<b>Type of cooling</b>	Heatsink			
<b>Drive</b>	Output frequency	0.1...400 Hz	0.1...500 Hz	0.5...200 Hz
Type of control	Asynchronous motor	Standard (voltage/frequency) Performance (sensorless flux vector control) Pump/fan (Kn <sup>2</sup> quadratic ratio)	Standard (voltage/frequency) Performance (sensorless flux vector control) Energy saving ratio	Sensorless flux vector control Voltage/frequency ratio (2 points) Energy saving ratio
	Synchronous motor	–	–	–
Transient overtorque	150...170% of the nominal motor torque	170...200% of the nominal motor torque	120% of the nominal motor torque	–
<b>Functions</b>				
Number of functions	40	50	50	
Number of preset speeds	8	16	7	
Number of I/O				
Analog inputs	1	3	2	
Logic inputs	4	6	3	
Analog outputs	1	1	1	
Logic outputs	1	–	–	
Relay outputs	1	2	2	
<b>Communication</b>	Integrated	Modbus	Modbus and CANopen	Modbus, METASYS N2, APOGEE FLN, BACnet
Available as an option	–	–	CANopen Daisy Chain, DeviceNet, PROFIBUS DP, Modbus TCP, Fipio	LonWorks
<b>Cards (available as an option)</b>	–			
<b>Dialogue tools</b>	IP 54 or IP 65 remote terminal	IP 54 or IP 65 remote terminal IP 54 remote graphic display terminal	IP 54 or IP 65 remote graphic display terminal	
<b>Configuration tools</b>	Setup software Configuration tools	SoMove Simple Loader, Multi-Loader	PCSoft for ATV 212 Multi-Loader	
<b>Standards and certifications</b>	IEC 61800-5-1 IEC 61800-3 (environments 1 and 2, categories C1 to C3, cat. C1 with option for ATV 212)			
	CE, UL, CSA, C-Tick, NOM, GOST	CE, UL, CSA, DNV, C-Tick, NOM, GOST	EN 55011: Group 1, class A and class B with option card.	CE, UL, CSA, C-Tick, NOM
<b>References</b>	<b>ATV 12</b>	<b>ATV 312</b>	<b>ATV 212</b>	
<b>Catalogues</b>	"Altivar 12 variable speed drives"	Page 26	"Altivar 212 variable speed drives"	

(1) Heating, Ventilation and Air Conditioning

## ANEXO B. CONSTRUCCIÓN DEL TABLERO PARA EL CONTROL DE LA PLANTA DE CAUDAL

ANTES



DESPUÉS

