

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Título del trabajo

Evaluación del control del flujo de una válvula en un sistema hidráulico con  
fines académicos

INGE-3028

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Melany Valeria Sánchez García

Kevin Damián Morocho Porras

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

A mi abuela Miriam, quien transformó cada semestre en una oración y cada dificultad en un acto silencioso de fe.

A ella, que confió en la Virgen de Guadalupe

incluso cuando mis fuerzas flaqueaban, que me sostuvo desde la distancia con rezos constantes, manos entrelazadas y un amor que nunca dudó.

En cada logro hay una de sus plegarias cumplidas;

por ello, este triunfo también es suyo.

*Melany Valeria Sánchez García*

## Dedicatoria

---

El presente proyecto lo dedico, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza necesaria para culminar esta etapa académica. A mi madre, Esther Porras, por su apoyo incondicional y sacrificio constante, y a mi hermano, Cristhian Morocho, por su compañía y motivación. De manera especial, dedico este trabajo a la memoria de mi padre, Enrique Morocho, quien desde el cielo continúa guiando mis pasos. Asimismo, agradezco a Michael, Jorge, Yandry, Ricardo, Josías, Luis, Robert, Carlos, Viviana, Loren y Denisse, amigos quienes me acompañaron durante mi vida académica y contribuyeron con su amistad y apoyo a la consecución de este trabajo.

***Kevin Damián Morocho Porras***

## Agradecimientos

---

A mi novio,

El que hizo de los números un lenguaje amable y de la espera, un acto de fe. Gracias por quedarte afuera de cada examen y por secar mis lágrimas con paciencia, Creí en mí porque tú lo hiciste primero.

A mi mamá,

mi raíz más profunda. Gracias por darlo todo sin nombrar el cansancio, por exigirme porque sabías que podía, por confiar incluso cuando yo caía. En cada paso hubo una parte de ti empujándome hacia adelante.

A mi hermano,

por las madrugadas sostenidas con café,

A Lizbeth y Danilo,

porque cuando dudé del camino me prestaron el suyo,

Y a mi hermana Paula,

por recordarme que nunca estuve sola.

*Melany Valeria Sánchez García*

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento al Ing. Jorge Pozo, quien además de ser un gran amigo, brindó un valioso apoyo durante la ejecución de este trabajo, aportando ideas y propuestas. Asimismo, agradezco su orientación y acompañamiento académico a lo largo de materias como Transporte de Momentum, Dinámica y Control de Procesos, las cuales fueron esenciales para la formación técnica que permitió la realización de este proyecto

***Kevin Damián Morocho Porras***

## Declaración Expresa

---

Nosotros Sánchez García Melany Valeria y Morocho Porras Kevin Damián acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de Octubre del 2025.

Melany Valeria Sánchez

García

Kevin Damián Morocho

Porras

## Evaluadores

---

---

**María Verónica Ordoñez Pazmiño MSc.**

Profesor de Materia

---

**David Enrique Matamoros**

**Camposano**

Tutor de proyecto

## Índice general

Índice general.....	8
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción .....	2
1.2 Descripción del Problema .....	3
1.3 Justificación del Problema .....	4
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	5
1.5 Marco Teórico.....	5
Definición de sistema hidráulico .....	5
<b>Modelado computacional en sistemas hidráulicos: EPANET como herramienta de simulación .....</b>	<b>15</b>
<b>1. EPANET: modelación hidráulica y calidad del agua en redes de distribución .....</b>	<b>15</b>
<b>Motor a pasos (“Stepper motor”) .....</b>	<b>16</b>
Aplicación industrial de las válvulas de control y relevancia de su estudio .....	17
Golpe de ariete .....	17
Capítulo 2.....	19
2.1 Enfoque Metodológico General.....	20
2.2 Diseño De Investigación.....	20
2.2.1 Primera fase: Análisis hidráulico y modelación base del sistema .....	21
2.2.2 Segunda fase: Diseño e implementación del sistema dinámico de control .....	26
Selección e integración de componentes hidráulicos.....	26
Selección e integración de componentes electrónicos .....	27
Programación del sistema de control digital.....	27
Calibración y verificación operativa .....	28

2.2.3	Tercera fase: Evaluación estática y dinámica del sistema automatizado.....	28
	Objetivo del experimento .....	28
	Procedimiento experimental .....	29
	Identificación del modelo .....	29
	Objetivo del experimento .....	30
	Procedimiento experimental .....	31
2.3	Técnicas De Recolección De Datos .....	32
2.4	Diseño Experimental Del Estado Estático (Apertura – Caudal-Cv).....	32
2.5	Método De Identificación Dinámica Del Sistema .....	33
2.6	Técnicas De Análisis.....	34
2.7	Recursos Utilizados .....	34
2.8	Consideraciones Éticas, Ambientales Y De Seguridad .....	34
2.9	Validación Y Reproducibilidad .....	35
Capítulo 3	.....	36
3.1	Consideraciones generales sobre el tratamiento de datos.....	37
3.1.2	Conversión de unidades y organización de la información experimental .....	37
3.2	Suavizado de señales experimentales.....	38
3.2.1	Técnica de suavizada empleada.....	38
3.2.2	Justificación del uso del suavizado .....	43
3.3	Identificación dinámica del sistema hidráulico.....	43
3.3.1	Ensayos de respuesta al escalón .....	43
3.3.2	Modelo dinámico empleado.....	44
3.3.3	Parámetros identificados y calidad del ajuste .....	44
3.4	Sintonización del controlador PID.....	47
3.4.1	Metodología de sintonización .....	47

3.4.2	Parámetros del controlador PID .....	48
3.5	Discusión global de los resultados dinámicos .....	48
<b>3.8</b>	<b>Curva de calibración entre el modelo hidráulico EPANET y el sistema experimental</b>	
	<b>58</b>	
3.9	Análisis económico del sistema hidráulico automatizado .....	64
3.9.1	introducción al análisis económico .....	64
3.9.2	Alcance del CAPEX considerado .....	64
3.9.3	Resumen del costo total de inversión .....	65
3.9.4	Discusión del costo de implementación.....	65
3.9.5	Análisis del costo energético y operacional del sistema hidráulico automatizado ...	66
3.9.6	Potencia eléctrica instalada del sistema .....	66
3.9.7	Consumo energético por sesión de laboratorio .....	67
3.9.8	Consumo energético acumulado y costo operativo .....	68
3.9.9	Discusión del costo energético y operativo .....	69
3.9.9.1	Comparación de costos y alcance funcional entre el sistema desarrollado y un equipo comercial .....	69
Capítulo 4	.....	72
4.1	Conclusiones y recomendaciones .....	73
Referencias	.....	76

## **Abreviaturas**

ANOVA Analysis of Variance

CAPEX Capital expenditure

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

FOPDT First Order Plus Dead Time

LOPU Laboratorio de Operaciones Unitarias

PID Proportional Integral Derivative

PLC Controlador Lógico Programable

PVC Policloruro de Vinilo

## **Simbología**

$C_v$	Coeficiente de válvula
$K$	Coeficiente de pérdida menor
$Q$	Caudal volumétrico
$\Delta P$	Caída de presión
$\tau$	Constante de tiempo
$\theta$	Tiempo muerto
$R^2$	Coeficiente de determinación

## Índice de figuras

Figura 1 <i>Dinámica de un sistema de nivel de líquidos</i> .....	13
Figura 2 <i>Configuración inicial del sistema</i> .....	21
Figura 3 <i>Curva de rendimiento de la bomba periférica Paolo PKM-60</i> .....	24
Figura 4 <i>Configuración mejorada del sistema</i> .....	24
Figura 5 <i>Simulación del sistema inicial en EPANET</i> .....	25
Figura 6 <i>Resultado de caudal obtenido en la simulación del sistema hidráulico</i> .....	26
Figura 7 <i>Suavizado de datos de flujo en la toma 1</i> .....	39
Figura 8 <i>Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 1</i> .....	39
Figura 9 <i>Suavizado de datos de flujo en la toma 2</i> .....	40
Figura 10 <i>Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 2</i> .....	40
Figura 11 <i>Suavizado de datos de flujo en la toma 3</i> .....	41
Figura 12 <i>Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 3</i> .....	41
Figura 13 <i>Suavizado de datos de flujo en la toma 4</i> .....	42
Figura 14 <i>Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 4</i> .....	42
Figura 15 <i>Ajuste de la función de transferencia en la toma 1</i> .....	45
Figura 16 <i>Ajuste de la función de transferencia en la toma 2</i> .....	46
Figura 17 <i>Ajuste de la función de transferencia en la toma 3</i> .....	46
Figura 18 <i>Ajuste de la función de transferencia en la toma 4</i> .....	47
Figura 19 <i>Respuesta del controlador a un set point de 9L/min</i> .....	49
Figura 20 <i>Respuesta del controlador a un set point de 9L/min (Apertura de válvula)</i> .....	49
Figura 21 <i>Ajustes de la relación entre el Cv vs Apertura de válvula</i> .....	53
Figura 22 <i>Relación entre K vs Apertura de la Válvula</i> .....	55
Figura 23 <i>Resultados del valor de K por su definición</i> .....	57
Figura 24 <i>Relación entre K y Cv</i> .....	58
Figura 25 <i>Simulación del sistema final en EPANET</i> .....	60
Figura 26 <i>Resultado de caudal obtenido en la simulación del sistema hidráulico</i> .....	61
Figura 27 <i>Curva de Calibración entre los datos experimentales y simulación EPANET (<math>\Delta P</math>)</i> .....	63

## Índice de tablas

Tabla 1. <i>Datos operacionales iniciales</i> .....	22
Tabla 2. <i>Accesorios del sistema</i> .....	22
Tabla 3. <i>Determinación de pérdidas menores</i> .....	25
Tabla 4. <i>Niveles del factor apertura de válvula</i> .....	33
Tabla 5. <i>Parámetros de las funciones de transferencia identificadas (modelo FOPDT)</i> .....	44
Tabla 6. <i>Parámetros del controlador PID obtenidos para cada toma</i> .....	48
Tabla 7. <i>Valores experimentales del coeficiente de válvula <math>C_v</math></i> .....	51
Tabla 8. <i>Ajuste de modelos para la relación <math>C_v</math>–Apertura de la Válvula</i> .....	51
Tabla 9. <i>Valores experimentales del coeficiente de pérdida <math>K</math></i> .....	54
Tabla 10. <i>Resultados del valor de <math>K</math> por su definición</i> .....	56
Tabla 11. <i>Lista de pérdidas menores del sistema final</i> .....	60
Tabla 12. <i>Variación del flujo respecto al Setting (<math>K</math>)</i> .....	61
Tabla 13. <i>Variación de la presión respecto al Setting (<math>K</math>)</i> .....	62
Tabla 14. <i>Resumen del CAPEX del sistema hidráulico automatizado</i> .....	65
Tabla 15. <i>Potencia eléctrica de los principales componentes del sistema</i> .....	67
Tabla 16. <i>Consumo energético por sesión de laboratorio</i> .....	68
Tabla 17. <i>Consumo energético y costo operativo estimado</i> .....	69
Tabla 18. <i>Características entre el sistema desarrollado por la tesis y el comercial</i> .....	70

## Resumen

Esta investigación se centra en el desarrollo de un mecanismo dinámico para regular el flujo en redes de tuberías, diseñado específicamente para fortalecer la formación técnica en ingeniería. La propuesta responde a la urgencia de mitigar las deficiencias formativas en automatización experimental, facilitando el estudio práctico de la relación entre el posicionamiento de válvulas y el comportamiento del caudal. En la fase de ejecución, se fabricó un prototipo operativo que incorporó una válvula de globo, transductores de presión, sensores de flujo, un actuador de precisión y una placa de control Arduino. El proceso metodológico abarcó el modelado hidráulico mediante el software EPANET 2.2, seguido por la programación de un algoritmo de control PID y la caracterización dinámica a través de pruebas de respuesta al escalón. Los hallazgos evidenciaron una correlación sólida con el modelo de primer orden con tiempo muerto, alcanzando coeficientes  $R^2$  por encima de 0.90 en la totalidad de los ensayos. Asimismo, se verificó un desempeño predominantemente lineal del obturador dentro de las condiciones de trabajo evaluadas<sup>6</sup>. Se establece que el equipo representa una solución pedagógica eficiente y rentable, con una inversión de USD 584,9 y un consumo de energía mínimo durante su uso.

**Palabras Clave:** Control PID, Identificación Dinámica, Respuesta Escalón, Automatización de Laboratorio, EPANET.

## Abstract

This research focuses on the development of a dynamic mechanism to regulate flow in piping networks, specifically designed to strengthen technical engineering education. The proposal addresses the urgent need to mitigate training deficiencies in experimental automation, facilitating the practical study of the relationship between valve positioning and flow rate behavior. During the execution phase, an operational prototype was manufactured, incorporating a globe valve, pressure transducers, flow sensors, a precision actuator, and an Arduino control board. The methodological process encompassed hydraulic modeling using EPANET 2.2 software, followed by the programming of a PID control algorithm and dynamic characterization through step response tests. The findings evidenced a solid correlation with the first-order plus dead time model, reaching  $R^2$  coefficients above 0.90 in all trials. Furthermore, a predominantly linear performance of the plug was verified within the evaluated working conditions. It is established that the equipment represents an efficient and cost-effective pedagogical solution, with an investment of USD 584,9 and minimal energy consumption during its use.

**Keywords:** PID Control, Dynamic Identification, Step Response, Laboratory Automation, EPANET.

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

En los sistemas hidráulicos, el control de flujo compone una de las bases más relevantes dentro de la formación de estudiantes de ingeniería, ya que permite entender y aplicar principios fundamentales de la automatización industrial y de la mecánica de fluidos.

En el contexto nacional, muchos laboratorios de hidráulica utilizan únicamente equipos analógicos los cuales dificultan la medición en tiempo real junto con la comprensión del comportamiento dinámico de variables importantes dentro de la materia tales como lo son el caudal, la presión y la apertura de válvulas. Esta posición genera una brecha de tipo formativa, pues, limita la posibilidad de que los estudiantes generen prácticas con sistemas automatizados los cuales permiten visualizar respuestas reales dentro de los procesos. Ante esta problemática, el presente proyecto plantea el diseño, construcción y evaluación dinámica de un sistema de control de flujo basado en la apertura de una válvula de globo, con fines académicos, como una herramienta didáctica orientada a actualizar la enseñanza experimental en el laboratorio de Dinámica y Control de Procesos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

En términos de alcance, el trabajo se orienta al desarrollo de un prototipo funcional capaz de medir y controlar el caudal mediante la apertura de una válvula de globo, integrando sensores de presión y caudal, un servomotor y un sistema digital de adquisición de datos.

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos: el Capítulo 1 presenta la introducción, descripción y justificación del problema; el Capítulo 2 se habla de la metodología empleada; el Capítulo 3 expone los resultados obtenidos con su respectivo análisis; el Capítulo 4 desarrolla las conclusiones y recomendaciones; y finalmente, las referencias bibliográficas recogen las fuentes académicas que sustentan la investigación.

## 1.2 Descripción del Problema

La relación entre la apertura de una válvula de globo y la variación del caudal en un sistema hidráulico se explica principalmente con teoría y mediciones básicas hechas con instrumentos analógicos. Sin embargo, estos métodos no representan con precisión el comportamiento real del sistema. Esto ocurre porque no se dispone de equipos adecuados que permitan a los estudiantes experimentar directamente este fenómeno (Abuowda, Noroozi, Dupac & Godfry, 2015). Como resultado, se limita la posibilidad de realizar prácticas que refuercen sus habilidades técnicas, dificultando la comprensión de la dinámica del flujo, la respuesta ante cambios en las condiciones de operación y la estabilidad del sistema y la interpretación de las variables involucradas en el proceso (Cengel & Cimbala, 2018).

En la vida real, se puede generar desperdicios significativos de recursos hídricos debido a la falta de control, asimismo, podría generarse un aumento innecesario en el consumo energético y ni hablar de las pérdidas operativas debido a sobrepresiones, variaciones bruscas del flujo y/o fugas (Perry & Green, 2008). Al mismo tiempo, aumentan los riesgos de seguridad para el personal y equipos involucrados, pues, un sistema que no cuentan un control automatizado impide respuestas ágiles ante imprevistos en condiciones hidráulicas (Idelchik, 2008).

Por lo anteriormente expuesto, es indispensable el diseño y construcción de sistema académico automatizado que englobe instrumentación confiable, sistemas de control, actuadores y recursos didácticos. Este equipo concederá la oportunidad de medición y registro en tiempo real de la relación existente entre apertura y caudal, favoreciendo la

calidad de la enseñanza gracias a la vinculación de la parte teórica con la experimental (Hossain, Phung, Kumar & Sultan, 2023).

### **1.3 Justificación del Problema**

El estudio de los sistemas hidráulicos es una pieza primordial para la formación de los estudiantes de ingeniería, debido a que permite entender la dinámica del transporte de fluidos (Cengel & Cimbala, 2018). Entre uno de sus dispositivos más notables se encuentran las válvulas de control ya que cumplen con la ocupación de regular el caudal respecto a una apertura (Bequette, 2003).

La causa raíz de la problemática radica en la ausencia de un sistema que permita medir y analizar en tiempo real la interacción entre el ángulo de apertura y el caudal. Sin dicho material, las practicas experimentales solo se pueden realizar por medio de aproximaciones, provocando una reducción en la precisión de los resultados y restringiendo la comprensión de los fenómenos hidráulicos (Doebelin & Manik, 2017).

Ante esta situación, se ejecuta el desarrollo de un sistema que logre una identificación dinámica integrando sensores de caudal y un servomotor para controlar la apertura de la válvula (Abuowda, Noroozi, Dupac & Godfry, 2015). En base a esto, será posible medir y obtener datos experimentales en tiempo real, beneficiando la caracterización del sistema y favoreciendo la enseñanza de los procesos de control en el área hidráulica y sistemas dinámicos (Hossain, Phung, Kumar & Sultan, 2023).

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Desarrollar un sistema dinámico de control de una válvula en un sistema de tuberías que permita la entrega regulada de caudal adecuado en función del grado de apertura de la válvula.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Analizar el sistema de tuberías propuesto sin el control dinámico de la válvula usando el software EPANET estableciendo el conjunto de parámetros básicos de funcionamiento del sistema en general.
2. Implementar el sistema dinámico de control de la válvula usando software y tecnología digital estableciendo las reglas de control necesarias para lograr un funcionamiento óptimo del sistema
3. Comparar las condiciones obtenidas en el laboratorio versus resultados obtenidos mediante simulación usando lenguajes de programación aprendidos en la carrera.

## **1.5 Marco Teórico**

### **Definición de sistema hidráulico**

En ingeniería actual, los sistemas hidráulicos conciben como una de las aplicaciones indispensables en mecánica de fluidos; se fundamenta en medida en que permite la transmisión y control de energía mediante un fluido incompresible.

En términos estructurales, un sistema hidráulico consta de bombas, válvulas, actuadores, depósitos, filtros y conductos, todos se conectan a fin de cumplir una función: transformar la energía mecánica en hidráulica y viceversa. De acuerdo con el manifiesto de

Salas (2020) afirma que, la bomba impulsa el fluido, la válvula regula su flujo, y el actuador transforma la presión en movimiento lineal o rotativo.

Actualmente, el estudio de sistemas hidráulicos no se limita al análisis empírico de funcionamiento, sino que sustenta la formulación matemática de principios físicos. Los presentes modelos permiten definir exactamente el comportamiento del fluido, el traspaso de energía y pérdidas que se generan en el sistema.

### **Modelos matemáticos asociados a sistema hidráulico**

El movimiento y presión del líquido dentro del sistema hidráulico se puede comprender mediante ecuaciones básicas asociadas a mecánica de fluidos, entre ellas se mencionan: Ecuación de Bernoulli, Ecuación de Continuidad y Ecuaciones de Pérdida de Carga o también conocida como de Darcy-Weisbach.

#### **1.1 Ecuación de Bernoulli: fundamento energético del sistema hidráulico**

De acuerdo con las premisas de Díaz & Posada (2025), uno de los modelos más indispensables en estudio los sistemas hidráulicos es Ecuación de Bernoulli, formulada por Daniel Bernoulli en 1738. La presente ecuación constituye el inicio de conservación de energía de fluido lineal. Esto quiere decir, que el fluido en movimiento mantiene constante sin que esto genere pérdidas por fricción.

En términos matemáticos, la ecuación se presentaría de la siguiente forma:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (1.1)$$

Donde:

- $P$  = presión del fluido (Pa)
- $\rho$  = densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  = velocidad (m/s)
- $g$  = gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

- $h$  = altura o energía potencial (m)

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + h_f \quad (1.2)$$

La ecuación encarga de definir la conexión que existe entre energía de presión, energía cinética y energía potencial gravitacional; en el estudio del sistema hidráulico, estos tipos de energía se transforman paulatinamente.

## 2. Ecuación de continuidad: conservación del flujo

Esta ecuación se basa en el principio de conservación de masa del sistema hidráulico. No obstante, el caudal volumétrico de parte del fluido incomprensible que transita a través de conducto cerrado debe permanecer de forma constante, tomando consideración que no se evidencien pérdidas o fugas.

La ecuación se estipula de la siguiente forma:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (1.3)$$

Donde:

- $A$  = área de la sección transversal del conducto (m<sup>2</sup>)
- $v$  = velocidad del fluido en esa sección (m/s)

## 3. Pérdidas de carga: ecuación de Darcy-Weisbach

En praxis, la comprobación de resistencias por fricción con las paredes del conducto se determina mediante circulación de fluido del sistema hidráulico, esta estipula pérdidas locales en válvulas, codos o uniones. En síntesis, las pérdidas, denominadas pérdidas de carga y constituyen energía evaporada en forma de calor.

La ecuación se centra en cuantificarlas a través de la siguiente expresión matemática:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1.4)$$

Su objetivo es medir energía que pierde y calcular potencia que la bomba debe operar para restaurar pérdidas generadas. Asimismo, el factor de fricción está relacionado al régimen del flujo, manifestándose mediante el número de Reynolds, un parámetro diseñado para identificar si el flujo es tipo laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1.5)$$

### **Componentes de un sistema hidráulico**

Un sistema hidráulico está compuesto por varios elementos que operan de forma conjunta para asegurar un flujo estable y controlado. Entre sus partes esenciales se encuentran:

#### **Bomba hidráulica**

La bomba actúa como núcleo del sistema. Su función radica en convertir energía mecánica en hidráulica, moviendo el fluido con presión necesaria para activar los actuadores. Existen diferentes tipos, como las bombas de engranajes, paletas o pistones, cada una con particularidades en términos de caudal, presión y eficacia volumétrica.

El rendimiento de la bomba depende de factores como: viscosidad del fluido, pérdidas por fricción y precisión del sellado interno.

#### **Tuberías y conductos**

Las tuberías hidráulicas constituyen los conductos que fluye el líquido a presión. Su diseño y fabricación garantizan la resistencia a presiones elevadas y minimizar pérdidas de energía, que se pueden determinar utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach:

#### **Válvulas de control y función dentro del sistema**

A través de concepción analítica y teórica Rashid et al., (2024), las válvulas de control son dispositivos estratégicos dentro del circuito hidráulico, permiten ajustar, detener o desviar el flujo del fluido. Su función no se limita al control del caudal, sino que también influye la presión, dirección y estabilidad operativa.

Desde perspectiva funcional, una válvula de control actúa como módulo de regulación dinámica, que responde a condiciones variables de presión y demanda energética.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G}} \quad (1.6)$$

Donde:

- $Q$  = caudal del fluido ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),
- $C_v$  = coeficiente de flujo de la válvula,
- $\Delta P$  = diferencia de presión entre entrada y salida (Pa),
- $G$  = gravedad específica del fluido.

### **Tipos de válvulas de control**

De acuerdo con Vilches (2024), el modelo y la elección de válvulas dependen del uso, la exactitud requerida y propiedades del líquido. En términos generales, el tipo de válvula de control se identifica por cómo altera el paso del líquido, la forma de su obturador y comportamiento de flujo (lineal, igual porcentual o apertura rápida). La elección de una válvula va arraigado a análisis técnico que toma consideración una serie de variables como el tipo de líquido, presión, viscosidad, temperatura, precisión específica y condiciones ambientales que se trabajará.

## **1. Tipos y funcionamiento**

Los principales tipos de válvulas de control utilizados en sistemas hidráulicos e industriales se detallan:

### **Válvula de globo:**

Su diseño, adecua con precisión el caudal al momento de mover un disco axialmente sobre un asiento fijo. Es ideal para procesos que requieran control constante y repetitivo, sin embargo, una desventaja recae en el diseño interno puede ocasionar afectaciones como pérdida de carga.

### **Válvula de mariposa:**

Este tipo de válvula adhiere un disco circular que gira sobre su propio eje, esto significa que regula el paso del líquido con ángulo de giro de 0° a 90°. Sus beneficios, es ligera y fácil de manipular, por tanto, se convierte en pieza fundamental para tubos que demanden mayor tamaño o flujos altos.

### **Válvula de bola:**

Caracterizada por una esfera con orificio que, rota de forma interna al cuerpo de la válvula, dando paso al flujo que transite o se bloquee completamente. Esta válvula posee un sellado

y se utiliza con mayor frecuencia en aplicaciones donde no se necesita con énfasis la precisión, pero, sí se requiere de respuesta rápida y un cierre seguro.

### **Válvula de compuerta:**

Destinada, abrir o cerrar el paso del flujo sin dar cabida a regulación intermedia. Sus características esenciales es disminuir la pérdida de carga al ceder un flujo directo, generalmente se aplica en tuberías.

### **Válvula de aguja:**

Su función es brindar control preciso del caudal. Hace uso de obturador cónico que regula con sensibilidad pequeñas variaciones producidas en el flujo, resultando idóneos instrumentos que dependan de precisión.

### **Válvula de diafragma:**

Encargada de controlar el flujo a través de membrana flexible que se acopla bajo presión. Es utilizado en líquidos corrosivos o sólidos que denoten alta pureza, como implica en los sectores farmacéuticos.

En contraste con otros diseños, la válvula de globo se centraliza en proporcionar una curva de control prácticamente lineal, facilitando su adición en sistemas automáticos de regulación proporcional.

Una válvula de globo se estructura mediante:

**Cuerpo:** posee material de acero inoxidable y su diseño suele ser esférico o angular.

**Asiento:** constituye una superficie fija que funciona como soporte del disco para cerrar el paso del fluido.

**Vástago y empaquetadura:** aseguran el movimiento controlado y sellado del conjunto.

**Dinámica de la válvula:** que define si es de tipo lineal o igual porcentual, etc.

Sin embargo, es importante resaltar la relevancia que implica el coeficiente de flujo dentro de la práctica en el ámbito hidráulico. Este coeficiente permite determinar las diversas carreras que mantiene un obturador y, en consecuencia, trazar la curva de esta, la cual se

encargará de denotar el valor del coeficiente del caudal que dispondrá la válvula, en esta medida se prevé conocer las condiciones óptimas para operar (David et al., 2022).

Generalmente, esta curva suele ser de tipo lineal o porcentual. En palabras teóricas, una curva se denomina isoporcentual cuando se atribuye un incremento en el porcentaje de carrera en conjunto a la carrera máxima, obteniendo como resultado un porcentaje de incremento similar en el coeficiente de caudal, cuya ecuación se representa de la siguiente forma:

$$C_{V,@vp} = C_{V,max}\alpha^{vp-1} \quad (1.7)$$

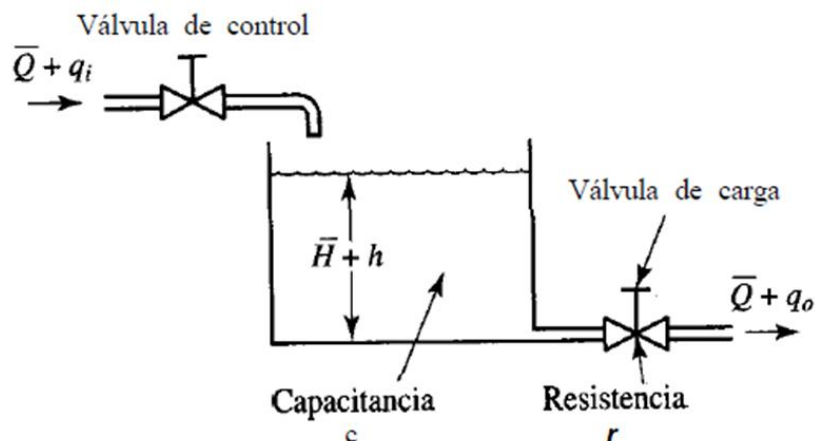
Por otra parte, una curva se considera lineal cuando puede graficarse como una línea recta inmersa en un diagrama rectangular del  $C_v$  o  $K_v$  en torno a la carrera nominal. Regularmente aplica en procesos lentos o que conlleven caídas de presión en la válvula que sean superiores al 40% de la instalación general. Entre otras palabras, la ecuación se contemplaría:

$$C_{V,@vp} = C_{V,max}vp \quad (1.8)$$

En continuidad a lo expuesto por Bojórquez et al., (2021), la dinámica de la válvula de control es considerada un aspecto clave para comprender en qué medida fluye el líquido mediante un sistema bajo presión. Esta dinámica se refiere a cómo cambia el flujo del líquido dependiendo de la posición de la compuerta o del vástago de la válvula, lo que influye en su capacidad para regular, su estabilidad y su eficiencia energética.

**Figura 1**

*Dinámica de un sistema de nivel de líquidos*



*Nota.* Diagrama correspondiente a un sistema hidráulico que simboliza el control de nivel en un tanque, enfatizando variables como el flujo, resistencia y capacitancia. Tomado de *Dinámica de un sistema de nivel de líquidos*, por Dademuchconnection, 2018.

El esquema presentado muestra un modelo de sistema hidráulico simple que ilustra cómo funciona un control de nivel a través de la interacción entre una válvula reguladora, la capacitancia del tanque y la resistencia hidráulica en la salida. En este sistema, el flujo que entra, representado por la suma de dos flujos, pasa por una válvula que ajusta la cantidad de líquido que entra al tanque. Este tanque sirve como un lugar temporal donde se almacena energía potencial, la cual se refleja en la altura del fluido, que cambia dependiendo de la cantidad de líquido que hay.

La variable en el sistema representa cuánto líquido puede retener el tanque por cada unidad de cambio en presión o nivel, igual a un capacitor eléctrico que guarda carga. Cuando el flujo de entrada se incrementa o se reduce, la superficie del fluido sube o baja, lo que altera la altura del líquido y, por ende, la presión en la parte baja del tanque. Esto muestra que el

sistema es dinámico, porque el nivel no cambia de inmediato a las alteraciones, sino que tiene un retraso debido a su capacidad para almacenar (Kortela, 2022).

Es necesario indicar que, el diagrama evidencia la interacción entre los tres elementos fundamentales de un proceso hidráulico regulado: entrada controlada, almacenamiento intermedio y descarga resistiva.

La dependencia de la dinámica de la válvula no solo se define por su geometría, sino también de las condiciones hidráulicas externas. Los factores que influyen en la respuesta dinámica se caracterizan por: presión diferencial, densidad y viscosidad del líquido, el diseño del obturados que se encargad de condicionar la linealidad de la respuesta y la fricción mecánica.

Si se atribuyen términos operativos, se entiende que esta dinámica se subdivide en tres modelos conceptuales: lineal, igual porcentual y apertura rápida.

El coeficiente de la válvula (denotado  $C_v$  en unidades anglosajonas o  $K_v$  en unidades métricas) cuantifica la capacidad de paso de una válvula bajo una determinada caída de presión y, por tanto, es la medida estándar utilizada para dimensionamiento y selección de válvulas. Conceptualmente,  $C_v$  representa el caudal que pasa por la válvula cuando existe una caída de presión normalizada. En sistema anglosajón ( $C_v$ ):

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}} \quad (1.9)$$

Donde  $Q$  ( $gpm$ ) es el caudal en galones por minuto y  $\Delta P$  ( $psi$ ) la caída de presión en psi. En el sistema métrico  $C_v$  se cambia por  $K_v$  y donde  $Q$  ( $m^3/h$ ) es el caudal en metros cúbicos por hora y  $\Delta P$  ( $bar$ ) la caída de presión en bar.

Aproximadamente se cumple la relación empírica:

$$K_v \approx 0.865 C_v \cdot K$$

Desde la mecánica de fluidos fundamental, para un fluido incompresible el caudal también puede expresarse por la ecuación de descarga (forma general):

$$Q = C_d A_{ef} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1.10)$$

En la siguiente operación se reconoce que  $C_d$  es el coeficiente de descarga adimensional,  $A_{ef}$  el área efectiva de paso de la válvula y densidad del fluido.

## **Modelado computacional en sistemas hidráulicos: EPANET como herramienta de simulación**

### **1. EPANET: modelación hidráulica y calidad del agua en redes de distribución**

En contexto de ingeniería hidráulica contemporánea, el software EPANET representa una herramientas robustas y accesibles para el análisis y simulación del comportamiento hidráulico y calidad del agua en redes de distribución presurizadas. EPANET fue concebido para estudiar dinámica del flujo, presión, demanda y concentración de contaminantes dentro de sistemas de tuberías interconectadas, tanques, bombas y válvulas (Ajaz & Ahmad, 2023).

EPANET modela ecuaciones fundamentales de continuidad y energía para cada nodo y tramo de la red, resolviendo un sistema no lineal de ecuaciones simultáneas mediante iteraciones numéricas. El principio hidráulico básico que gobierna el modelo se fundamenta en conservación de masa y energía, expresado matemáticamente:

$$\sum Q_i = 0 \text{ (Ecuación de continuidad)} \quad (1.11)$$

$$H_1 - H_2 = h_f + h_m \text{ (Ecuación de energía o Bernoulli modificada)} \quad (1.12)$$

Donde  $Q_i$  representa los caudales que ingresan y salen en un nodo,  $H_1$  y  $H_2$  son las cargas hidráulicas (niveles piezométricos) entre dos puntos,  $h_f$  corresponde a pérdidas por fricción, y  $h_m$  a pérdidas menores asociadas con válvulas, codos y accesorios. Estas pérdidas se calculan mediante la ecuación de Darcy–Weisbach o la de Hazen–Williams, dependiendo de la elección del usuario y condiciones del flujo:

A nivel metodológico, EPANET integra resultados numéricos con interfaces gráficas facilitando la visualización del comportamiento hidráulico en tiempo real, optimizando el proceso de toma de decisiones técnicas y económicas en proyectos de ingeniería civil, sanitaria y ambiental

### **Motor a pasos (“Stepper motor”)**

Es un tipo de motor eléctrico que transforma señales digitales en movimientos angulares exactos, lo que facilita el posicionamiento sin necesidad de sensor en varias situaciones (control abierto). Se caracteriza por desarrollar la capacidad de tener una resolución angular precisa y la simplicidad de control mediante microcontroladores o PLC, lo cual es útil para operar válvulas.

### **Servomotor**

De acuerdo con Céspedes & Gutiérrez (2021), un servomotor es un tipo de motor eléctrico de alta precisión, el cual está diseñado para manejar de manera exacta la posición, la velocidad y el torque de un eje en un sistema automático. A diferencia de los motores

normales que solo rotan al recibir energía, el servomotor funciona dentro de un sistema de control en lazo cerrado, lo que implica que recibe información constante sobre su movimiento a través de sensores como *encoders* o *resolvers*, y ajusta su funcionamiento de manera automática alcanzando con una gran precisión el objetivo deseado.

### **Aplicación industrial de las válvulas de control y relevancia de su estudio**

Las válvulas de control son elementos fundamentales de procesos industriales, como lo son plantas de tratamiento de aguas, industria química, refinerías, sistemas de procesamiento de alimentos, redes de distribución de fluidos y sistema de generación de energía. En este contexto, las válvulas permiten regular de manera adecuada y precisa variables como caudal, presión, nivel y temperatura lo que garantiza la seguridad, la eficiencia energética y la estabilidad operativa de los procesos. (Seborg et al., 2011).

El estudio de las válvulas de control en el ámbito académico es fundamentalmente relevante ya que su comportamiento real suele diferir de las condiciones ideales que se encuentran en el catálogo, presentando no linealidad, dependencia del punto de operación y efectos del estado dinámico que se asocian al actuador. Entender estas características permiten al estudiante relacionar los conocimientos teóricos de control automático con las perturbaciones reales, como la pérdida de carga, la dinámica del flujo o las interacciones válvula-proceso (Fox et al., 2015).

### **Golpe de ariete**

El golpe de ariete tiene su origen cuando existen variaciones bruscas de la velocidad del fluido el cual está asociado a aperturas o cerradas rápidas de las válvulas. En el sistema implementado, la válvula de control representa un elemento crítico en la generación de este

fenómeno físico, por lo que se operación debe ejecutarse de forma progresiva para evitar flujos hidráulicos severos (Chaudhry, 2014).

Es recomendable evitar un manejo brusco de apertura y cierre, especialmente si la válvula tiende a tener un comportamiento de apertura rápida, debido que está presente incrementos elevados de caudal a un bajo porcentaje de apertura, esto puede intensificar las sobrepresiones dentro de la línea de tubería. (Fox et al., 2020). Por otro lado, la sintonización del controlador PID debe ser conservadora para limar acciones agresivas que puedan provocar movimientos rápidos del actuador y aumenta las ondas de presión (Seborg et al., 2017).

Mantener aperturas mínimas durante la operación y si está en disponible comprar para el sistema dispositivos de amortiguamiento hidráulico que permitan reducir la magnitud del golpe de ariete y de esta forma mejorar la seguridad y estabilidad del sistema.

## **Capítulo 2**

## **2.1 Enfoque Metodológico General**

La metodología del proyecto a presentar se conforma por medio de un enfoque aplicativo, analítico y experimental, el cual se encuentra orientado al diseño, construcción y la evaluación dinámica de un sistema de control de flujo en relación de la apertura de válvula de control que en este caso es una válvula de globo. Lo que busca el trabajo de investigación es integrar el modelado hidráulico, adquisición de datos, simulación computacional, instrumentación digital y un análisis comparativo el cual presente una secuencia lógica y metodológica que se encuentra presente en proyectos de ingeniería similares.

El proceso se ejecuta por etapas en forma progresiva que permiten avanzar desde una evaluación diagnóstica inicial hasta la implementación de un prototipo y la validación de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio frente a las simulaciones computacionales.

De forma adicional, el enfoque metodológico se implementó por medio de dos rutas de análisis:

Primero, para el estudio del sistema estático se realizó un diseño experimental aplicado a la relación de la apertura de válvula-caudal-Cv.

Segundo, en el caso del estudio del sistema dinámico se ejecutó mediante técnicas de identificación de sistemas, por el hecho que las respuestas son transitorias y dependen del tiempo impidiendo el uso de un diseño experimental tradicional.

## **2.2 Diseño De Investigación**

El diseño metodológico se lleva a cabo en tres fases principales, orientadas a cumplir cada uno de los objetivos específicos del proyecto:

### 2.2.1 Primera fase: Análisis hidráulico y modelación base del sistema

- Levantamiento del sistema existente:
  - a. Identificación de la configuración inicial del prototipo del Laboratorio de Dinámica y Control de Procesos (caudal, presión, bomba, tuberías, accesorios y válvulas).
  - b. Medición preliminar de caudal y presión.
  - c. Identificación de puntos en donde se presentan pérdidas excesivas, fluctuaciones o inestabilidad del sistema.
  - d. Valoración de la capacidad del sistema existente para la integración sensores y actuadores adecuados.

**Figura 2**

*Configuración inicial del sistema*



**Tabla 1.***Datos operacionales iniciales*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Caudal</b>	4	L/min
<b>Presión</b>	1	Atm

**Tabla 2.***Accesorios del sistema*

<b>Accesorio</b>	<b>Unidad</b>
<b>Codo 90 1 in</b>	6
<b>Codo 90 1.5 in</b>	1
<b>Unión universal</b>	3
<b>T flujo brusco</b>	1
<b>T flujo linear</b>	1
<b>Válvula de bola</b>	1
<b>Entrada abrupta</b>	1
<b>Reductores graduales</b>	2
<b>Expansor gradual</b>	1

Durante la ejecución de las primeras pruebas, se observó que existía una diferencia importante entre el caudal entregado y el esperado. Según las indicaciones del fabricante, la bomba debe suministrar un caudal nominal de 40 L/min, este valor corresponde en el caso cuando la bomba trabaja a un nivel de altura igual a cero. En un sistema real como en el que se desarrolló el experimento, en el cual existen pérdidas de carga por efecto de la fricción, accesorios y el mismo circuito, el valor del caudal operativo se encontraría en un rango menor. En la evaluación inicial se logró obtener un caudal de 4 L/min, dicho valor también se vio afectado por un defecto presente en la bomba y por una configuración de tuberías que

provocaba mayores pérdidas. Después de la realización de las correcciones de dichos elementos, el sistema alcanzó valores cercanos al rango operativo esperado para dicha bomba en las condiciones reales de instalación.

Tras descubrir esta diferencia, se llevó un examen técnico detallado con el objetivo de identificar las posibles causas de esta insuficiencia en el equipo de bombeo. Posterior al chequeo se evidenció un daño crítico en el condensador del motor eléctrico, cuyo mal funcionamiento impactaba de forma directa la potencia de arranque y el funcionamiento continuo de la bomba. Por ello, la sustitución del capacitor defectuoso fue la primera acción correctiva del presente proyecto.

De forma paralela, se analizó el sistema completo de tuberías, se identificó que la presencia de múltiples cambios de dirección y accesorios resultaba en pérdidas de carga menores considerables. Para la reducción de dichas pérdidas de energía, se desarrolló y aplicó una configuración nueva del sistema de tuberías. La estrategia fundamental fue reducir el número de codos, mejoras en las transacciones entre secciones y la remoción de aquellos componentes que restringen el paso libre del fluido.

Como resultado de dichas intervenciones técnicas, tanto las mejoras del sistema eléctrico como la reestructuración del sistema hidráulico, se alcanzó un caudal cuyo valor operativo fue de 35 L/min, lo cual es equivalente a la capacidad nominal del diseño.

**Figura 3**

Curva de rendimiento de la bomba periférica Paolo PKM-60



Nota. Adaptado de Importadora Marvin (s.f.).

<https://importadoramarvin.com.ec/products/bomba-periferica-paolo-media-pkm-60-quito-ecuador-tunel-desinfeccion-herramientas-quito-ecuador>

**Figura 4**

Configuración mejorada del sistema



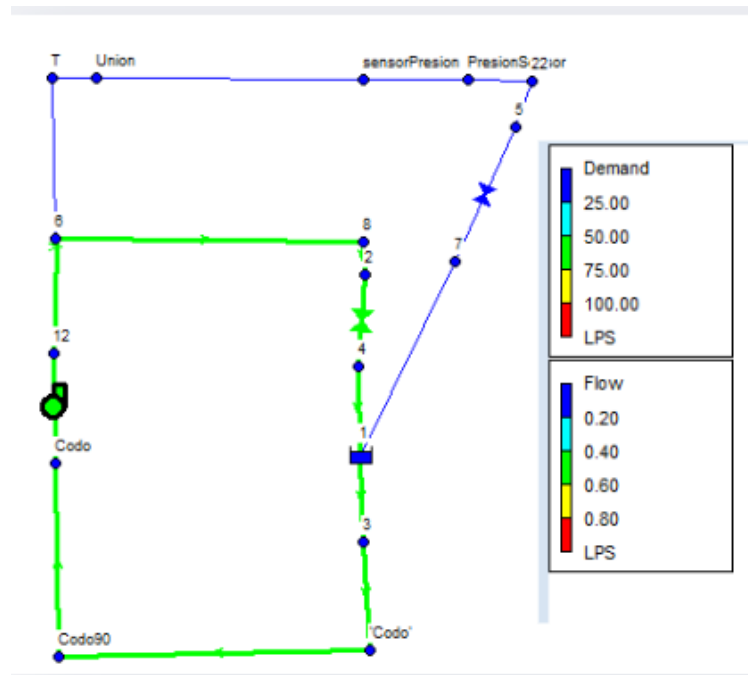
2. Simulación hidráulica sin control dinámico:

- a. Modelado del sistema en EPANET 2.2, estableciendo nodos, tuberías, coeficientes de fricción, y condiciones de operación.

- b. Determinación de parámetros hidráulicos básicos tales como pérdidas de carga, curva de la bomba, altura manométrica y caudal de operación.

**Figura 5**

*Simulación del sistema inicial en EPANET*



Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de la simulación del sistema.

**Tabla 3.**

*Determinación de pérdidas menores*

Accesorio	Unidad	Valor	Total
<b>Codo 90° 1 in</b>	6	1,5	9
<b>Codo 90° 0.5 in</b>	1	2	2
<b>Uniones Universales</b>	3	0,08	0,24
<b>Tes flujo brusco</b>	1	1,8	1,8
<b>T flujo linear</b>	1	0,9	0,9
<b>Válvula de bola</b>	1	0,07	0,07
<b>Entrada abrupta</b>	1	0,5	0,5
<b>Reductores graduales</b>	2	0,04	0,08
<b>Expansor gradual</b>	1	1,22	1,22

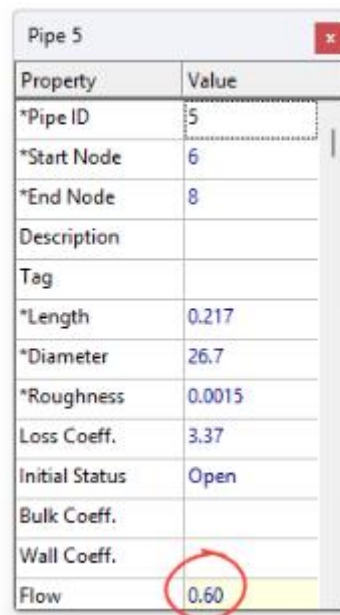
---

TOTAL	
PÉRDIDAS	15,81

---

**Figura 6**

*Resultado de caudal obtenido en la simulación del sistema hidráulico*



Property	Value
*Pipe ID	5
*Start Node	6
*End Node	8
Description	
Tag	
*Length	0.217
*Diameter	26.7
*Roughness	0.0015
Loss Coeff.	3.37
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	0.60

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de la simulación del sistema

## 2.2.2 Segunda fase: Diseño e implementación del sistema dinámico de control

### Selección e integración de componentes hidráulicos

Se escogió una válvula que presentará una capacidad de regulación fácil de afinar y a su vez entre sus características tenga una relación casi lineal con la apertura de la válvula, por lo que se usó una válvula de globo de ½ de pulgada. Se comprobó la relación entre la válvula y el sistema de tubería, considerando el caudal, la caída de presión y el comportamiento del coeficiente de la válvula Cv.

## **Selección e integración de componentes electrónicos**

Con respecto al control de la apertura de la válvula se empleó un motor a pasos el cual se acopló de forma mecánica al vástago de la válvula usando un driver adecuado. Dicha elección permitió conseguir una relación directa entre los pasos del motor y la posición de la válvula por medio de una mesa deslizante, lo que garantizó una presión mayor en el control de apertura.

Por medio de una tarjeta Arduino se controló el sistema, esto permitió programar el lazo de control, recibir las señales del sensor de flujo en el caudal y producir la salida hacia el motor a pasos.

Adicionalmente, se integraron sensores de presión los cuales se ubicaron tanto en la entrada como en la salida de la válvula para la verificación de la caída de presión, también se puede disponer de la simulación del EPANET para verificar la caída de presión dentro del sistema.

## **Programación del sistema de control digital**

Utilizando el Arduino se ejecutó un algoritmo de control de una sintonización de PID en el cual:

- La variable del proceso fue el caudal medido
- La variable manipulada fue el número de pasos enviados al motor y por ende la apertura de la válvula.
- El set point, en este caso, fue el caudal deseado.

Se realizó la configuración de la frecuencia de muestreo del sensor de caudal, se instauró un filtro digital para la reducción del ruido y se programó la comunicación serial entre el dispositivo y una computadora para el registro de datos.

### **Calibración y verificación operativa**

Se verificó la estabilidad del sistema y se ejecutaron pruebas de apertura de forma progresiva para la determinación de:

- a. Rango de operación adecuado para el motor
- b. El número de pasos al cual es equivalente al porcentaje de apertura de la válvula
- c. El ruido en la medición del sensor de flujo
- d. La repetibilidad mecánica del vástago en la válvula de control.

Con esta fase culminada se logró preparar el sistema para la ejecución de experimentos formales.

### **2.2.3 Tercera fase: Evaluación estática y dinámica del sistema automatizado**

Se desarrollaron dos experimentos fundamentales para la tesis.

#### **2.2.3.1 Experimento 1: Identificación dinámica del sistema**

##### **Objetivo del experimento**

Obtener el modelo dinámico del proceso entre el caudal y la apertura de la válvula por medio de ensayos de respuesta escalón, con la finalidad de estimar la función de transferencia del tipo.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2.1)$$

Donde  $G(s)$  es una función de transferencia de primer orden con tiempo muerto  $\theta$ , y los términos  $K$  y  $\tau$  son la ganancia y la constante de tiempo (Seborg et al., 2016).

### Procedimiento experimental

- a) Se estabilizó el sistema (estado estacionario) con una apertura inicial baja en la válvula
- b) Se elevó el valor de la apertura de la válvula provocando una señal escalón al motor
- c) Se registro el valor de las siguientes variables.
- d) Tiempo, en segundos
- e) Apertura de la válvula, en pasos o porcentaje
- f) Caudal, en L/min
- g) Presión, en kPa
- h) Se espero hasta que el sistema tengo su estabilización a un nuevo estado estacionario
- i) Los escalones se desarrollaron para diferentes condiciones iniciales y finales de apertura de válvula.
- j) Se obtienen las curvas de respuestas las cuales son promediadas para decir el ruido electrónico.

### Identificación del modelo

Con las curvas ya obtenidas se procedió a la determinación de:

#### a. Ganancia $K$

Por medio de la relación del cambio en la variable de estado y la variable de entrada.

$$K = \frac{\Delta Q}{\Delta u} \quad (2.2)$$

### b. Tiempo muerto $\theta$

Determinado como el tiempo entre el escalón y el primer cambio considerable del caudal.

### c. Constante de tiempo $\tau$

Por medio de la herramienta del 63.2 % de la respuesta del sistema.

Con los parámetros identificados se construyó la función de transferencia la cual se le realizó un método de sintonización para el controlador PID (Astrom & Hagglund, 2022).

### Complemento metodológico:

Además del uso de la identificación gráfica, basado en el método de regresión no lineal por medio de Python o Excel para el ajuste de los datos experimentales al modelo dinámico:

$$Q(t) = K(1 - e^{-(t-\theta)/\tau}) \quad (2.3)$$

Este ajuste permito la obtención de valores más precisos para la ganancia, constante de tiempo y tiempo muerto, ayudando a la precisión en la sintonización del controlador PID (Yin & Zhao, 2021).

### 2.2.3.2 Experimento 2: Obtención del coeficiente de válvula Cv

#### Objetivo del experimento

Construir la curva que relaciona la Cv-apertura de la válvula, necesaria para la caracterización del comportamiento de la válvula y validar la ecuación teórica.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{SG}} \quad (2.4)$$

### Procedimiento experimental

Se realizaron ensayos a diferentes grados de apertura de la válvula:

- Primero, la fijación de un valor de apertura específico por medio del motor a pasos.
- Luego, se esperó que el caudal se estabilizó a régimen permanente.
- A continuación, la medición del caudal
- Se determinó el valor de la caída de presión por medio de los sensores de presión en la entrada y la salida de la válvula o por verificación de la simulación del sistema por el EPANET
- El coeficiente de válvula se calculó con:

$$C_v = Q \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} \quad (2.5)$$

- Se generó la tabla de resultados Apertura de Válvula- Caudal y con dichos datos se ajustó al modelo matemático:

$$C_v = C_{v,max} \alpha^{vp-1} \quad (2.6)$$

- Con dicho modelo se logró verificar si la válvula de control presenta un comportamiento lineal o isoporcentual.

### 2.3 Técnicas De Recolección De Datos

Se utilizaron técnicas de registro de datos mediante un microcontrolador, con una frecuencia de muestras suficientes para capturar la dinámica del sistema. Los instrumentos utilizados fueron.

- Sensor de flujo
- Sensores de presión
- Motor a pasos más su respectivo driver
- Tarjeta Arduino
- Software de registro, en este caso Python
- EPANET para la simulación del sistema

Los datos fueron registrados por medio de filtros para corregir errores, repetición de ensayos y la validación cruzada entre mediciones experimentales y el uso de un simulador. Durante las pruebas dinámicas, los datos del caudal fueron filtrados mediante procesos digitales y suavizados tipo media móvil antes de la ejecución de la identificación del modelo. (Smith, 2020)

### 2.4 Diseño Experimental Del Estado Estático (Apertura – Caudal-Cv)

Para el análisis del sistema en régimen permanente o estacionario se utilizó un diseño experimental unifactorial (One-Way ANOVA) (Montgomery, 2013), respecto al grado de apertura de la válvula como el único factor controlable. En este caso las variables de respuesta fueron el caudal, el coeficiente de válvula y la caída de presión.

**Tabla 4.***Niveles del factor apertura de válvula*

<b>Nivel</b>	<b>Apertura de la válvula (%)</b>	<b>Descripción</b>
<b>1</b>	31,25	Apertura inicial (Base)
<b>2</b>	40	Apertura baja
<b>3</b>	50	Apertura media
<b>4</b>	60	Apertura alta
<b>5</b>	75	Apertura máxima de ensayo

Cada nivel fue evaluado por medio de réplicas para asegurar la repetibilidad. Los ensayos se aleatorizaron para evitar el caso de sesgos debido a las variaciones ambientales, eléctricas o hidráulicas (Montgomery, 2013).

Los datos obtenidos fueron verificados mediante el método ANOVA. Esto permitió validar la relación entre la apertura de la válvula, caudal y el coeficiente de la válvula  $C_v$  (Montgomery, 2013).

## **2.5 Método De Identificación Dinámica Del Sistema**

En el caso del estudio dinámico no se lo abordó mediante un diseño experimental, pues el caudal es una variable que depende del tiempo presentado por la respuesta transitoria. Por lo tanto, se utiliza un método de identificación de sistemas que se basó en la respuesta escalón (Step Response Method)(Åström & Murray, 2021).

El valor de la apertura de la válvula se modificó por medio de un escalón aplicado al motor a pasos y se registró la evolución en el tiempo del caudal. Luego, los datos se ajustaron al modelo de función de transferencia de primer orden con tiempo muerto mediante una regresión no lineal

La identificación del sistema permitió obtener valores más precisos de la ganancia, la constante de tiempo y el tiempo muerto, los cuales se utilizaron para la sintonización del controlador PID.

## **2.6 Técnicas De Análisis**

Para comparar los resultados en condiciones constantes, se aplicó ANOVA, pues, realizamos un análisis de varianza con un único factor y usamos la prueba de Tukey para detectar diferencias significativas entre tratamientos. Al examinar cómo variaba el sistema con el tiempo, calculamos métricas de ajuste como el error cuadrático medio y el coeficiente  $R^2$ , además de comparar visualmente las curvas: las que obtuvimos en laboratorio versus las que predecía nuestro modelo matemático de primer orden con tiempo muerto.

## **2.7 Recursos Utilizados**

Entre los recursos utilizados se cuenta con: bomba centrífuga, tuberías PVC, válvula de globo, sensores de presión y caudal, motor a pasos, driver, Arduino, computadora, EPANET, Excel, y Python. Además, se contó con el apoyo del técnico del cliente, quien dirige la parte práctica de la materia “Dinámica y Control de Procesos”.

## **2.8 Consideraciones Éticas, Ambientales Y De Seguridad**

De forma inicial se procedió a la limpieza del equipo, ya que antes de cada prueba se buscó verificar la presencia de aire en forma de burbujas. A su vez, se revisaron de forma cautelosa las conexiones entre la placa Arduino y el actuador para asegurarse de que no existiera fallas. Durante el funcionamiento, el agua se mantuvo circulando dentro de un circuito cerrado, lo que impidió cualquier escape hacia el exterior. Los datos obtenidos fueron tratados con criterios éticos de investigación y se reportaron tal como fueron registrados.

En particular, se corroboró el estado de los cables que se unían a la placa del Arduino con el driver del motor a pasos. Dicha verificación permitió asegurar que todos los contactos se encontraran bien ajustados, implicando que el sistema de control trabaje de forma correcta.

## **2.9 Validación Y Reproducibilidad**

Para asegurar la consistencia de los datos, se llevó a cabo una repetición de 3 veces por prueba. A su vez, los registros y códigos de Python se almacenaron para una replicabilidad futura. Al contrastar los hallazgos experimentales con las simulaciones realizadas en EPANET se pudo confirmar la validez del modelo hidráulico, al igual que la del modelo dinámico del sistema en estudio.

## **Capítulo 3**

### 3.1 Consideraciones generales sobre el tratamiento de datos

Los datos experimentales que fueron obtenidos durante la operación del sistema hidráulico fueron registrados en archivos de texto plano (.txt), en los cuales se contenía información temporal del caudal, la apertura de la válvula, la presión de entrada a la válvula, la presión de salida de la válvula y la caída de presión en la válvula. Debido al hecho de que se trabajó con un sistema real de laboratorio, las mediciones presentaban ruido instrumental y pequeñas fluctuaciones asociadas al sistema de adquisición de datos, al propio sistema de flujo y al actuador.

Para garantizar un análisis dinámico confiable del sistema, dichos datos experimentales se sometieron a un proceso de pretratamiento, el cual incluyó la conversión de unidades, la organización de la información y la ejecución de técnicas de suavizado sobre las variables medidas. Dicho enfoque es habitual cuando se realizan estudios experimentales de control de procesos, ya que permite reducir la influencia del ruido sin alterar de forma significativa la dinámica del sistema (Seborg et al., 2016).

#### 3.1.2 Conversión de unidades y organización de la información experimental

El sistema de instrumentación medía los valores de presión en MPa manométricos, de acuerdo con las especificaciones del sensor empleado. Para el análisis dinámico e hidráulico, los valores de las presiones se llevaron a presión absoluta (psia) mediante la siguiente relación:

$$P_{abs} = P_{mano} * 145.038 + 14.696 \quad (3.1)$$

En donde el valor de 145.038 es el factor para convertir de MPa a psi y 14.696 psia corresponde a la presión de la atmósfera en condiciones estándar. La caída de presión ( $\Delta P$ ) se

llevó únicamente a psi, debido a que la diferencia de presiones no necesita la adición del efecto de la presión atmosférica.

A continuación, los datos que fueron procesados se organizaron en archivos tipo Excel, los cuales contenían la información del tiempo, la apertura de la válvula, además de las señales suavizadas, como lo fueron el caudal y los datos de presión. Dicha sección permitió organizar y trabajar con datos agregados y depurados.

### **3.2 Suavizado de señales experimentales**

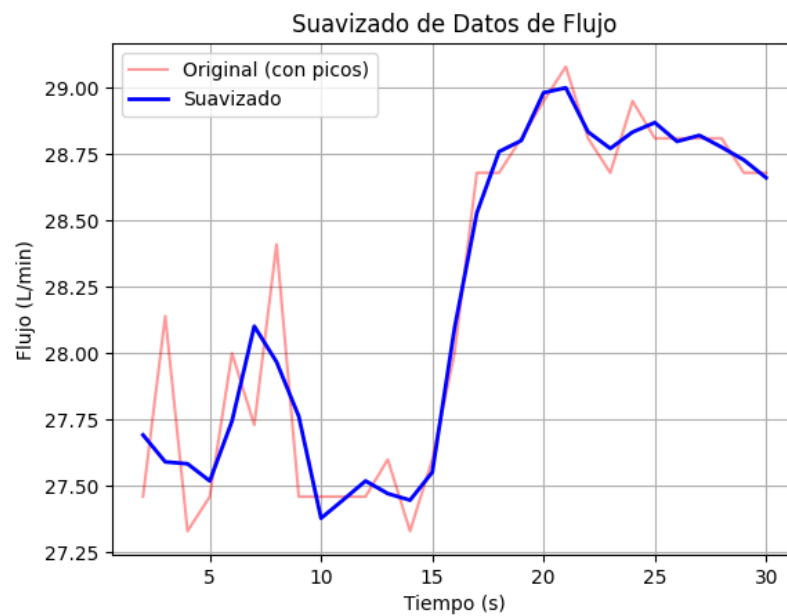
#### **3.2.1 Técnica de suavizada empleada**

Para reducir el ruido, el cual estaba presente en las señales de caudal y presión, se utilizó un filtro de Savitzky–Golay, el cual empleó una ventana de cinco puntos y un polinomio de segundo orden. El método se fundamenta en el ajuste local por medio de mínimos cuadrados de un polinomio respecto a una ventana móvil de datos, permitiendo suavizar la señal y preservando la forma general y las pendientes que se asocian a la dinámica del sistema.

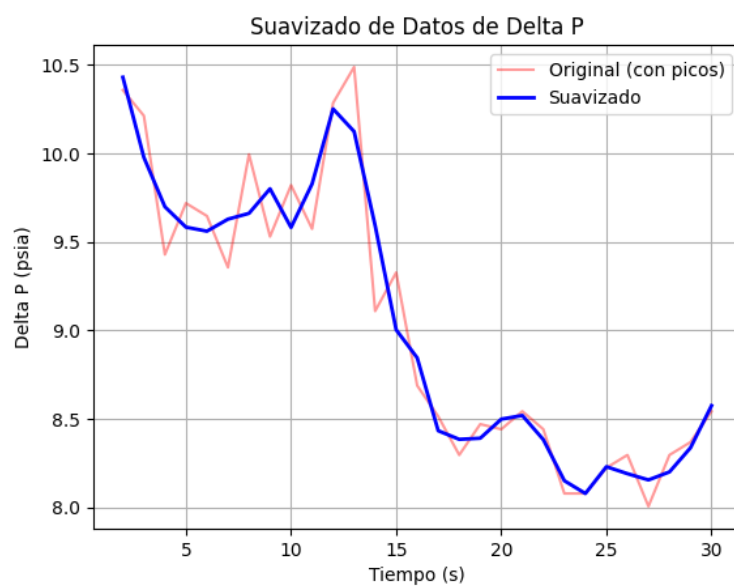
El filtro de Savitzky–Golay es usado de forma amplia en el procesamiento de señales de datos experimentales, debido a que presenta la capacidad de reducir el ruido sin distorsionar de forma significativa la respuesta temporal, especialmente en señales con transiciones suaves o respuestas de escalón (Press et al., 2007).

**Figura 7**

*Suavizado de datos de flujo en la toma 1*

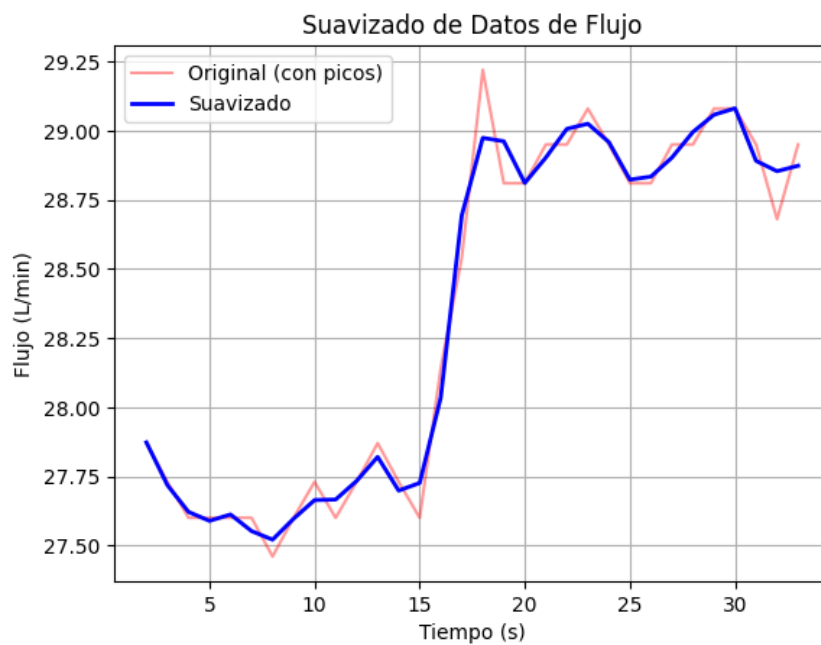
**Figura 8**

*Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 1*

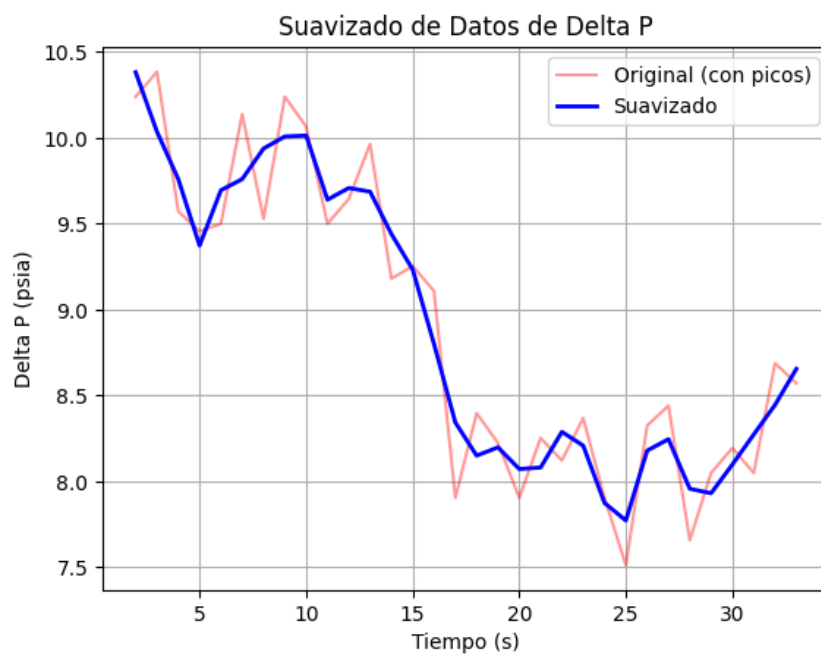


**Figura 9**

*Suavizado de datos de flujo en la toma 2*

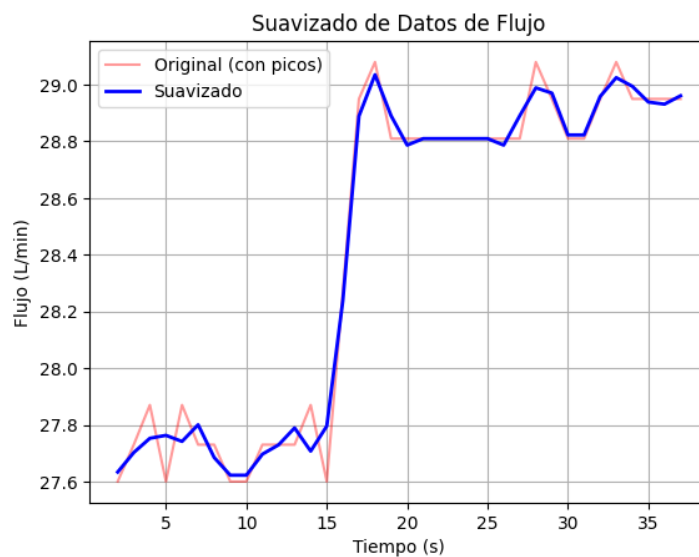
**Figura 10**

*Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 2*

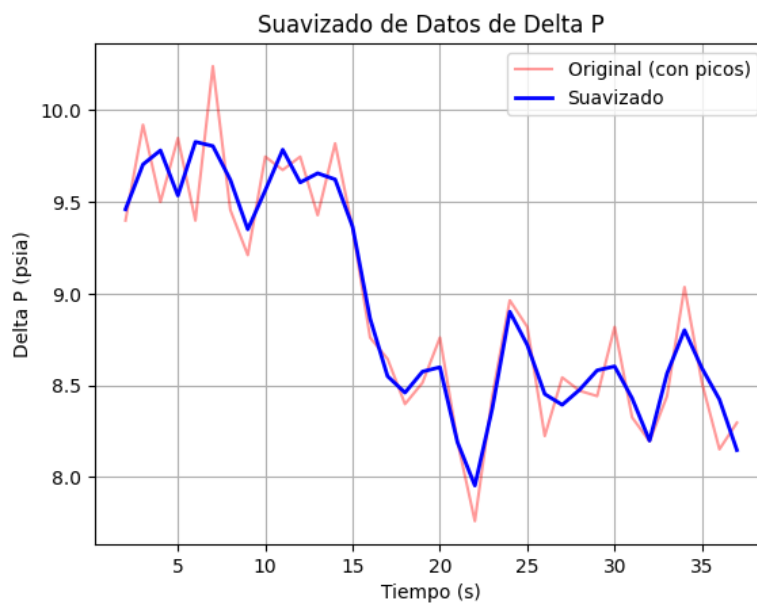


**Figura 11**

*Suavizado de datos de flujo en la toma 3*

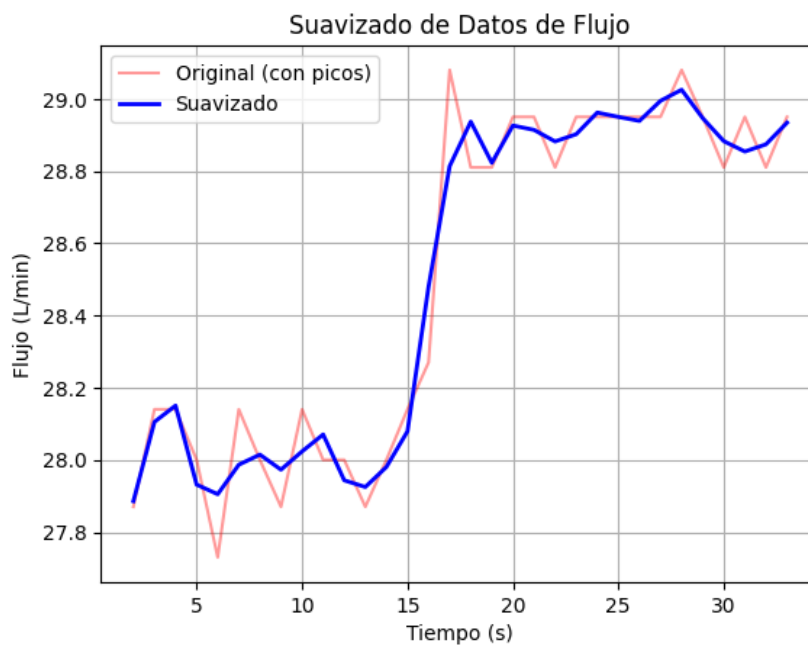
**Figura 12**

*Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 3*

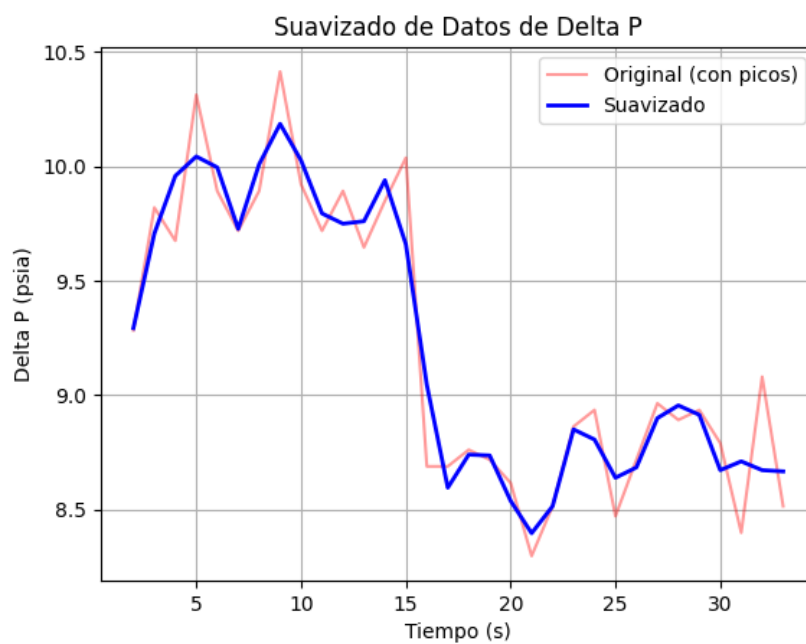


**Figura 13**

*Suavizado de datos de flujo en la toma 4*

**Figura 14**

*Suavizado de datos de la caída de presión en la toma 4*



### **3.2.2 Justificación del uso del suavizado**

El suavizado de datos se aplicó exclusivamente a las variables medidas, como el caudal y las presiones; por otro lado, el tiempo y la apertura de la válvula se mantuvieron sin modificación. Esta decisión se fundamenta en el hecho de que la alteración de la señal de entrada podría modificar de forma artificial la forma del escalón y afectar la identificación de los parámetros dinámicos del sistema.

El uso de señales suavizadas permitió obtener respuestas más estables y representativas del comportamiento del sistema trabajado, lo que facilitó la identificación del modelo dinámico y luego del diseño del controlador.

### **3.3 Identificación dinámica del sistema hidráulico**

#### **3.3.1 Ensayos de respuesta al escalón**

La identificación dinámica del sistema se ejecutó por medio de cuatro ensayos o tomas de respuesta al escalón, en las cuales la apertura de la válvula se fue incrementando desde un valor inicial, el cual fue de 31.25 %, hasta los valores finales de 40 %, 50 %, 60 % y 75 %, respectivamente. En cada uno de los ensayos se registró la evolución temporal del caudal hasta alcanzar un nuevo estado estacionario.

Este tipo de ensayos es generalmente empleado en la identificación de sistemas de procesos, ya que permite caracterizar la respuesta dinámica ante cambios controlados de las variables manipuladas (Astrom & Hagglund, 2022).

### 3.3.2 Modelo dinámico empleado

El sistema se modeló por medio de un comportamiento dinámico de primer orden con tiempo muerto (FOPDT), el cual está expresado por:

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (3.2)$$

Donde K es la ganancia del proceso,  $\tau$  es la constante de tiempo y  $t_0$  es el tiempo muerto total observado durante la respuesta experimental. Este modelo genera una aproximación adecuada para los sistemas hidráulicos con inercia y retardo; además, es ampliamente utilizado en el diseño de controladores de tipo PID, debido a su simplicidad y efectividad (Seborg et al., 2016).

### 3.3.3 Parámetros identificados y calidad del ajuste

Los parámetros dinámicos se ajustaron por medio de un ajuste no lineal por mínimos cuadrados. Es importante indicar que este análisis se realizó con los datos de las señales suavizadas de caudal y expresando el sistema en variables de desviación respecto al estado inicial. La calidad del ajuste se verificó por medio del coeficiente de determinación  $R^2$ .

**Tabla 5.**

*Parámetros de las funciones de transferencia identificadas (modelo FOPDT)*

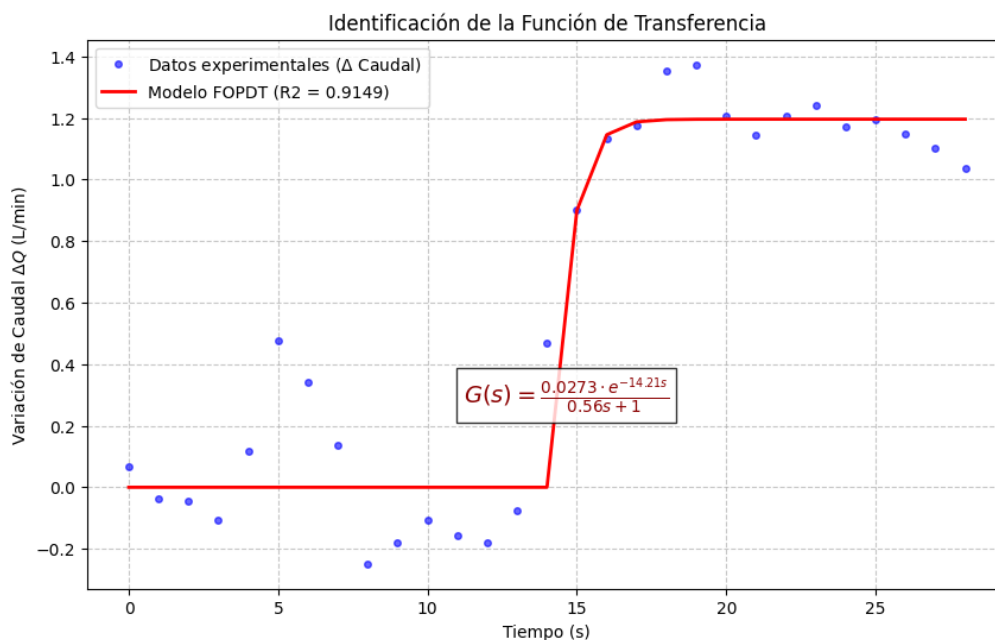
<b>Toma</b>	<b>K</b>	<b><math>\tau</math> (s)</b>	<b>t (s)</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>1 (31.25 → 75 %)</b>	0.027337	0.564604	14.212303	0.914917
<b>2 (31.25 → 60 %)</b>	0.044252	0.672616	13.771387	0.980261
<b>3 (31.25 → 50 %)</b>	0.063003	0.179326	13.894088	0.983752
<b>4 (31.25 → 40 %)</b>	0.107111	1.224190	12.903518	0.981147

Los valores de  $R^2$  que se obtuvieron presentan valores superiores a 0.9 en todas las tomas, lo que representa un alto grado de concordancia entre los modelos y los datos experimentales. Este nivel de ajuste se puede considerar como muy satisfactorio para sistemas reales de laboratorio, en donde el ruido instrumental y las perturbaciones experimentales se pueden considerar como inevitables.

La variación de la ganancia “K” y de la constante de tiempo “ $\tau$ ” entre las tomas indica la dependencia del sistema respecto al punto de operación, lo que evidencia que el comportamiento del sistema no es estrictamente lineal. Por otra parte, el tiempo muerto “ $t_0$ ” “se mantuvo relativamente constante, lo que indica que el retardo está dominado por el actuador y el sistema de adquisición de datos.

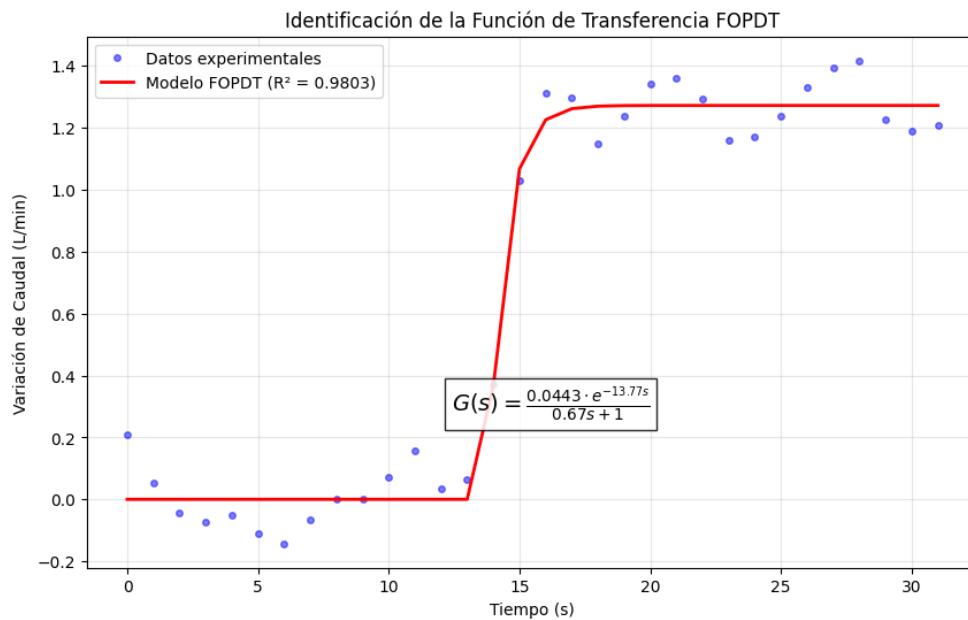
**Figura 15**

*Ajuste de la función de transferencia en la toma 1*

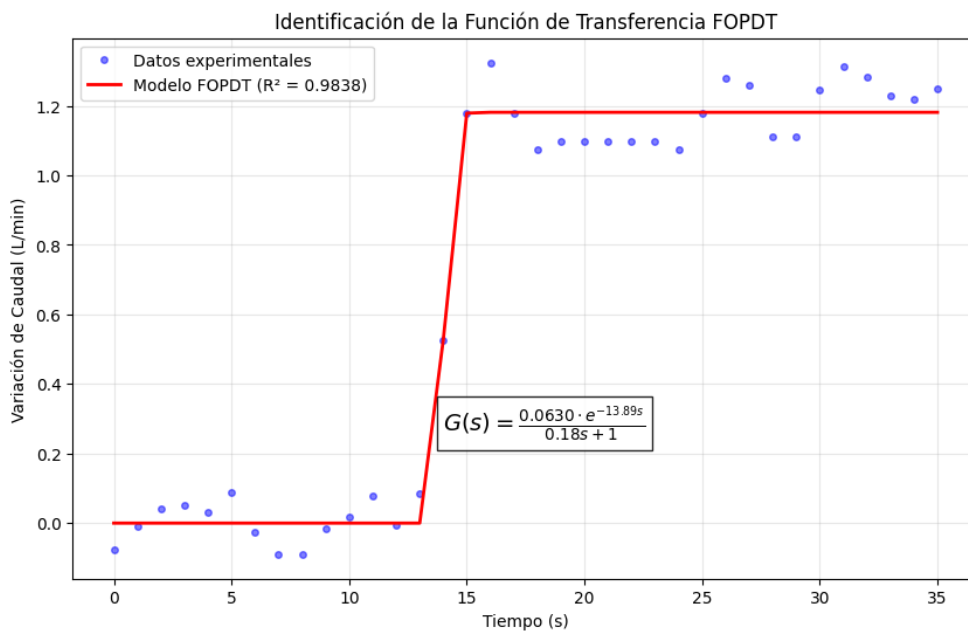


**Figura 16**

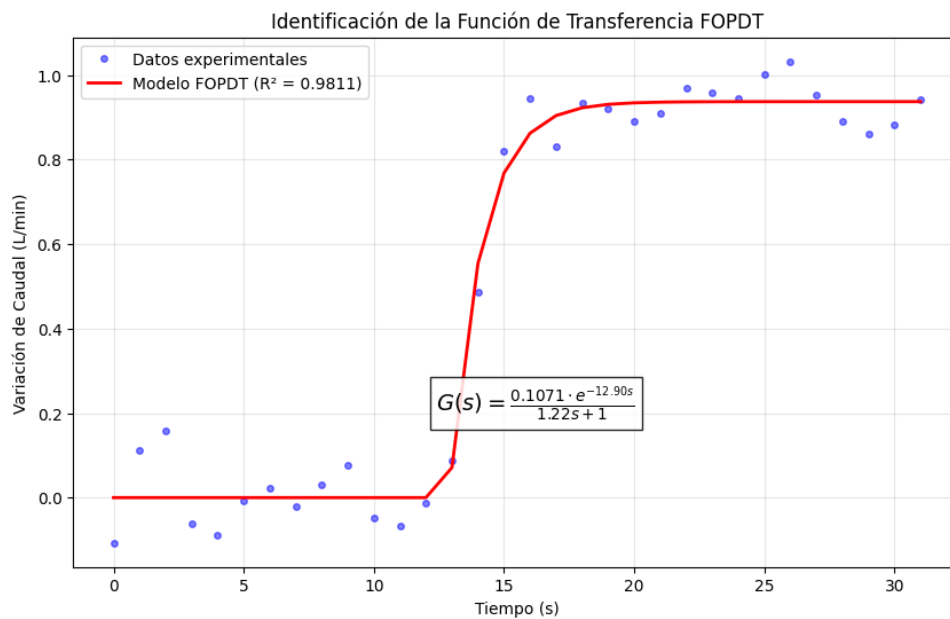
Ajuste de la función de transferencia en la toma 2

**Figura 17**

Ajuste de la función de transferencia en la toma 3



**Figura 18**  
**Ajuste de la función de transferencia en la toma 4**



### 3.4 Sintonización del controlador PID

#### 3.4.1 Metodología de sintonización

A partir de las funciones de transferencia obtenidas e identificadas, se procedió a realizar la sintonización de un controlador PID, utilizando un enfoque basado en la ganancia última y el período último, obtenidos por medio de análisis de márgenes de estabilidad en el dominio de la frecuencia. Para esta parte del análisis, el tiempo muerto se aproximó mediante una expansión de Padé de primer orden, lo que permitió aplicar técnicas clásicas de control.

La sintonización se realizó por medio de una variante del método de Ziegler–Nichols, ajustada para obtener una respuesta más conservadora y adecuada para sistemas hidráulicos con retardo significativo. Posteriormente, los parámetros obtenidos fueron convertidos a la

forma ideal (paralela) del controlador, facilitando su implementación digital (Astrom & Hagglund, 2022)

### 3.4.2 Parámetros del controlador PID

Los parámetros finales del controlador PID obtenidos durante las cuatro tomas de datos se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 6.**

*Parámetros del controlador PID obtenidos para cada toma*

<b>Toma</b>	<b>P</b>	<b>I (1/s)</b>	<b>D (s)</b>	<b>N</b>
<b>1</b>	29.034471	5.322790	25.340107	10
<b>2</b>	18.239174	3.125776	17.028349	10
<b>3</b>	11.972041	3.887643	5.898886	10
<b>4</b>	8.167346	1.095102	9.746025	10

Los resultados presentan que los parámetros del controlador varían entre las distintas tomas, lo cual es coherente con la variación observada en los parámetros dinámicos del sistema. Esta variabilidad confirma la naturaleza no lineal del sistema hidráulico y la dependencia del controlador respecto al punto de operación.

### 3.5 Discusión global de los resultados dinámicos

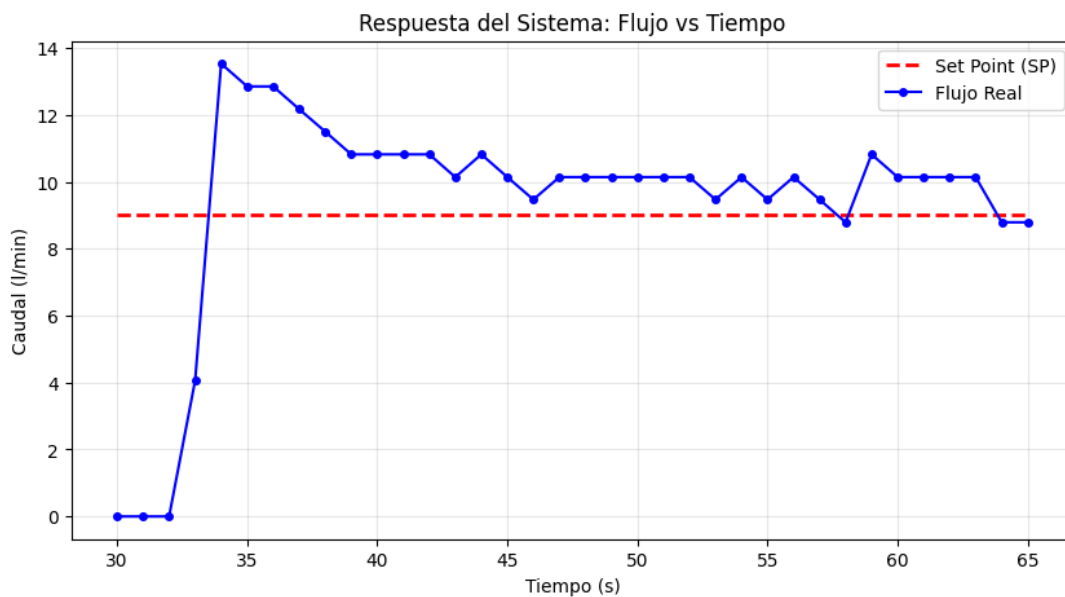
La elevada precisión de los modelos que se identificaron, reflejada en los altos valores de  $R^2$ , respalda de forma directa la calidad de los parámetros del controlador PID obtenidos. Dado que la técnica de sintonización se basa en los parámetros del modelo dinámico, el buen ajuste del modelo provoca una mayor confiabilidad en los valores del controlador.

Los resultados demuestran que el procedimiento experimental, la metodología de identificación, el tratamiento de los datos, incluyendo su suavizado, y el esquema de control empleado son adecuados y

representativos del comportamiento real del sistema hidráulico, lo que cumple con los objetivos planteados para el desarrollo del sistema de control de flujo con fines académicos.

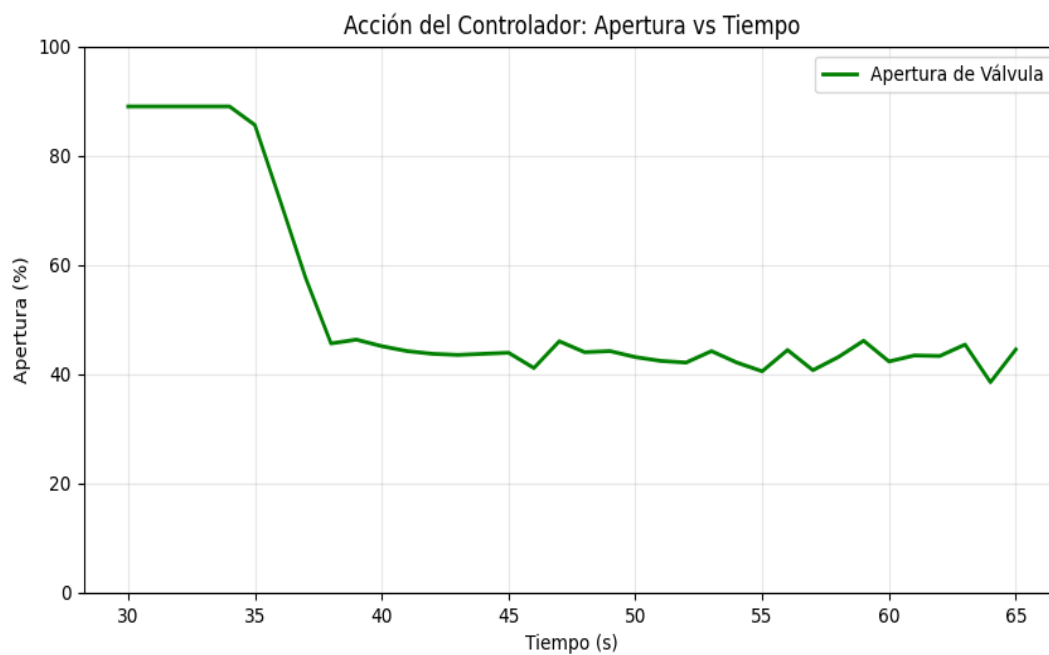
**Figura 19**

*Respuesta del controlador a un set point de 9L/min*



**Figura 20**

*Respuesta del controlador a un set point de 9L/min (Apertura de válvula)*



### 3.6 Análisis estático del sistema hidráulico: coeficiente de válvula Cv

#### 3.6.1 Determinación experimental del coeficiente de válvula

Para la caracterización del sistema hidráulico en estado estático, se emplearon únicamente los datos correspondientes a los estados estacionarios de cada ensayo de respuesta al escalón. Esta selección se fundamenta en que el coeficiente de válvula Cv está definido en condiciones de flujo permanente, en donde las variables del sistema tienden a permanecer constantes en el tiempo.

El coeficiente de válvula es un parámetro adimensional, el cual está definido bajo el sistema de unidades inglesas, y se relaciona con el caudal que atraviesa una válvula y la caída de presión asociada para un flujo incompresible (ISA-S75.01-1985 (R 1995), 1995). La expresión matemática es:

$$Cv = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P / SG}} \quad (3.3)$$

En donde Q es el caudal en gal/min, ΔP es la caída de presión en psi, y SG es la gravedad específica del fluido. En el caso presente, como el fluido de trabajo es agua, se utilizó un SG=1, lo que simplifica la expresión a la forma:

$$Cv = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}} \quad (3.4)$$

Los valores de caudal y caída de presión que se utilizaron corresponden a los datos que fueron previamente suavizados, con la finalidad de reducir el efecto del ruido instrumental sin alterar la tendencia física del sistema.

**Tabla 7.***Valores experimentales del coeficiente de válvula Cv*

Apertura (%)	Q (gpm)	$\Delta P$ (psi)	Cv
<b>31.25</b>	7.30	9.77	2.33
<b>40.00</b>	7.64	8.71	2.59
<b>50.00</b>	7.63	8.49	2.62
<b>60.00</b>	7.64	8.11	2.68
<b>75.00</b>	7.61	8.25	2.65

### 3.6.2 Relación entre el coeficiente de válvula Cv y la apertura de la válvula

Con el objetivo de analizar la tendencia que presenta el coeficiente de válvula en función de la apertura de la válvula, los valores experimentales de Cv se ajustaron a diferentes modelos representativos, los cuales son utilizados de forma común para la descripción del comportamiento de las válvulas de control, incluyendo modelos lineales, isoporcentuales y empíricos. Estas características se definen de forma original bajo la idea de condiciones ideales de catálogo, tales como presión diferencial constante y la inexistencia de restricciones externas (Fox et al., 2003)

**Tabla 8.***Ajuste de modelos para la relación Cv–Apertura de la Válvula*

Modelo	Expresión	R <sup>2</sup>
<b>Lineal con intercepto</b>	$Cv = aA + b$	0.600
<b>Lineal sin intercepto</b>	$Cv = aA$	-26.14
<b>Isoporcentual</b>	$Cv = Cv_o(R^{A/100})$	0.586
<b>Empírico racional</b>	$Cv = \frac{aA}{b + A} + c$	0.792
<b>Apertura Rapida</b>		0.701

---

$$Cv = a * \left(\frac{A}{100}\right)^n$$

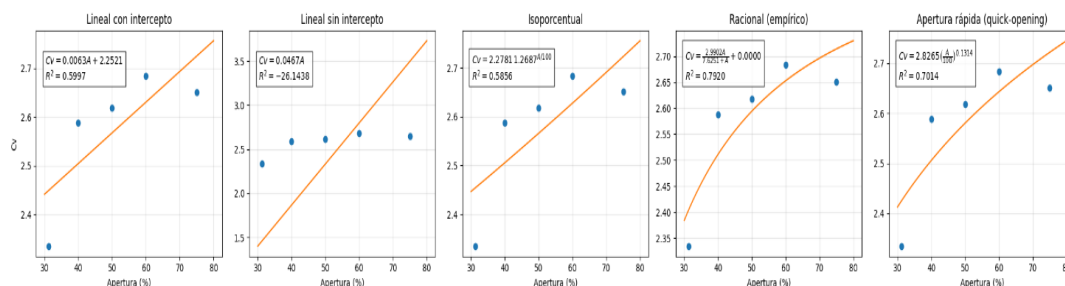
---

Los resultados expresan que ninguno de los modelos ideales reproduce de manera precisa el comportamiento de los resultados experimentales del coeficiente de válvula. No obstante, el modelo lineal con intercepto presenta un ajuste ligeramente superior al modelo isoporcentual en el rango de aperturas analizado, lo que indica una tendencia aproximadamente lineal bajo las condiciones experimentales dadas por el sistema, sin que ello implique una clasificación estricta de la válvula respecto a sus características ideales.

Adicionalmente, se incorporó el análisis de un modelo característico de válvulas denominado apertura rápida, el ajuste de este modelo presento un valor de coeficiente de determinación de  $R^2=0.701$ , este valor es superior a los valores obtenidos en los modelos lineales y los isoporcentuales, aunque menor al valor de empírico racional. El exponente ajustado presenta un valor menos a la unidad lo que expresa una apertura rápida con curvatura cóncava típica de válvulas de apertura rápida. Cabe mencionar que considerando la dispersión de los datos experimentales no permite clasificar de manera estricta a la válvula según una característica ideal de catálogo, sino que evidencia un comportamiento intermedio bajo dicho intervalo de condiciones reales de operación.

**Figura 21**

*Ajustes de la relación entre el Cv vs Apertura de válvula*



### 3.7 Análisis estático del sistema hidráulico: coeficiente de pérdida K

#### 3.7.1 Cálculo del coeficiente de pérdida K a partir del coeficiente Cv

El coeficiente de pérdida K es un parámetro de naturaleza adimensional que representa las pérdidas locales introducidas por un elemento en el sistema hidráulico. En este trabajo, el coeficiente de pérdida K de la válvula fue determinado a partir de los valores experimentales del coeficiente de válvula Cv, por medio de la relación analítica entre ambos parámetros para un flujo incompresible (CRANE Process Flow Technologies, 2010):

$$K = \frac{894 D^4}{Cv^2} \quad (3.5)$$

En donde D representa el diámetro interno de referencia de la válvula, el cual se debe expresar en pulgadas. Para el sistema experimental se utilizó el diámetro interno correspondiente a una válvula de ½ pulgada.

**Tabla 9.***Valores experimentales del coeficiente de pérdida K*

<b>Apertura (%)</b>	<b>Cv</b>	<b>K</b>
<b>31.25</b>	2.33	24.55
<b>40.00</b>	2.59	19.98
<b>50.00</b>	2.62	19.52
<b>60.00</b>	2.68	18.58
<b>75.00</b>	2.65	19.04

### 3.7.2 Relación entre el coeficiente de pérdida K y la apertura de la válvula

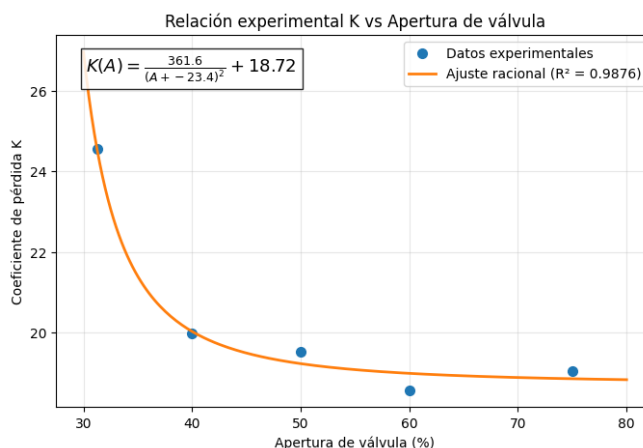
Con la finalidad de describir la tendencia que presenta el coeficiente de pérdida, los datos experimentales de K se ajustaron mediante un modelo empírico de tipo racional:

$$K(A) = \frac{a}{(A + b)^2} + c \quad (3.6)$$

El ajuste resultante indicó un coeficiente de determinación  $R^2$  elevado, con un valor de 0.9878, lo que expresa una excelente representación del comportamiento experimental. El término constante del modelo representa el valor asintótico del coeficiente de pérdida cuando el grado de apertura es elevado; por otro lado, el término racional describe la fuerte variación de las pérdidas a aperturas menores.

**Figura 22**

Relación entre  $K$  vs Apertura de la Válvula



### 3.7.3 Comparación entre el coeficiente de pérdida $K$ obtenido a partir de $C_v$ y el calculado desde su definición hidráulica

Con la finalidad de validar la coherencia de los resultados obtenidos para el valor del coeficiente de pérdida  $K$ , se realizó una comparación entre dos métodos diferentes para estimar el valor de  $K$ . El primero fue un cálculo de forma indirecta a partir de la relación entre  $C_v$  y  $K$  utilizando una relación que se fundamenta en el análisis hidráulico. El segundo es un cálculo directo a partir de su definición fundamental en la cual se emplea los valores experimentales de caudal, caída de la presión, el diámetro interno y las propiedades del propio fluido. En el segundo enfoque el valor del coeficiente de pérdida se determinó mediante la ecuación:

$$K = \frac{\Delta P \pi^2 D^4}{8\rho Q^2} \quad (3.7)$$

En donde  $\Delta P$  es la caída de presión,  $Q$  es el caudal volumétrico,  $\rho$  es la densidad del fluido y  $D$  es el diámetro interno del conducto. Esta ecuación se deriva de forma directa entre

la ecuación de la energía y la definición de pérdidas menores en conductos, lo que implica una expresión fundamental del análisis hidráulico (Cengel & Cimbala, 2014; White, 2025).

**Tabla 10.**

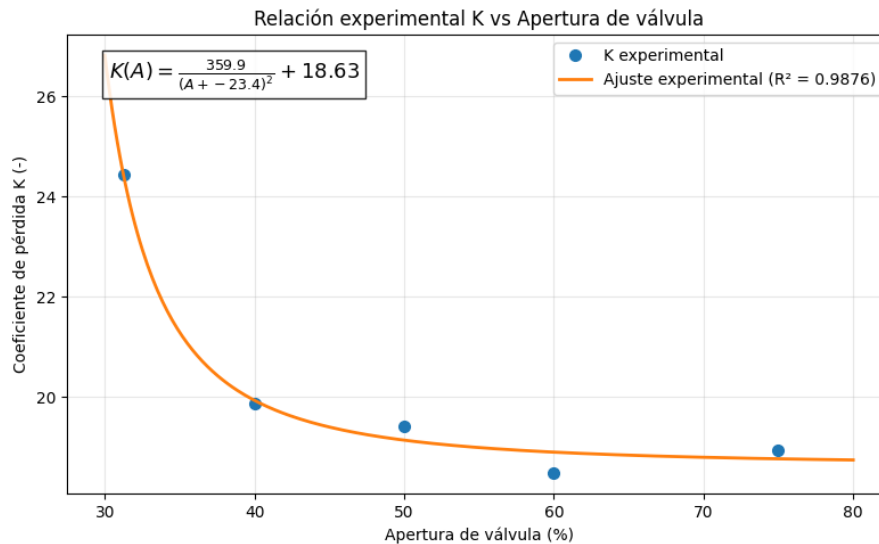
*Resultados del valor de K por su definición*

<b>Apertura (%)</b>	<b>Diámetro (D) (m)</b>	<b>Caudal (Q) (L/min)</b>	<b>Caída de presión (<math>\Delta P</math>) (psi)</b>	<b>Densidad (<math>\rho</math>) (g/mL)</b>	<b>Coefficiente de pérdida (K)</b>
<b>31.25</b>	0.0158	27.63	9.77	1.00	24.43
<b>40.00</b>	0.0158	28.92	8.71	1.00	19.88
<b>50.00</b>	0.0158	28.88	8.49	1.00	19.43
<b>60.00</b>	0.0158	28.93	8.11	1.00	18.49
<b>75.00</b>	0.0158	28.83	8.25	1.00	18.95

Los valores de K obtenidos mediante ambos métodos presentaron magnitudes y tendencias relativamente iguales a lo largo del rango de apertura analizado, con valores que se comprenden entre los 18 y 25 en los dos casos se observó que el coeficiente de pérdida disminuye a medida que aumenta el grado de apertura de la válvula, el cual es un comportamiento físicamente consistente con la reducción de restricciones al flujo y el aumento del área efectiva de paso (Fox et al., 2003).

**Figura 23**

*Resultados del valor de K por su definición*



El ajuste resultante indicó un coeficiente de determinación  $R^2$  elevado, con un valor de 0.9876, lo que expresa una excelente representación del comportamiento experimental, si se lo comparar con el método indirecto se puede apreciar como los términos de la relación son prácticamente semejantes, solo diferenciándose en cierta cantidad de decimales, esto se podría explicar por los valores de las variables de cálculos respecto al número de decimales usados los factores de conversión.

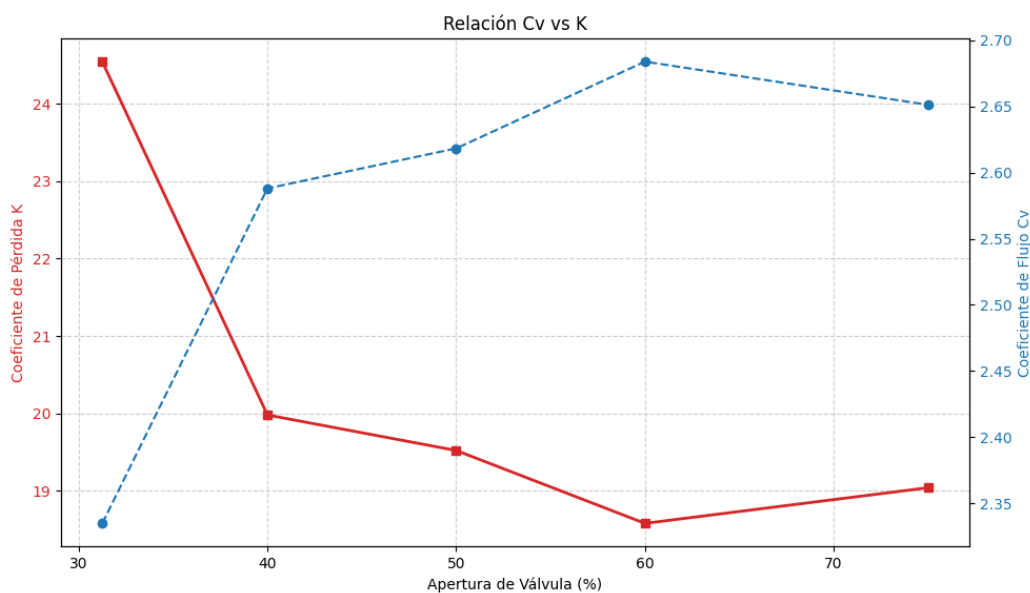
### 3.7.4 Relación entre el coeficiente de válvula $C_v$ y el coeficiente de pérdida $K$

La relación entre los coeficientes  $C_v$  y  $K$  se caracteriza por una dependencia inversa cuadrática, lo que implica que pequeñas variaciones en el coeficiente de válvula  $C_v$  provocan cambios significativos en las pérdidas hidráulicas. Dicha relación explica por qué el coeficiente de pérdida  $K$  presenta una tendencia más definida y un mejor ajuste empírico que el coeficiente  $C_v$ .

El análisis conjunto de ambos parámetros permitió la caracterización de manera exhaustiva del comportamiento estático de la válvula presente en el sistema hidráulico real, lo que integra los resultados dinámicos y fortalece la caracterización global del sistema.

**Figura 24**

*Relación entre K y Cv*



### 3.8 Curva de calibración entre el modelo hidráulico EPANET y el sistema experimental

Para obtener la curva de calibración de la válvula de control integrada en el sistema experimental, se empleó la herramienta de simulación hidráulica EPANET.

Dentro del modelo implementado en EPANET, se representó a la válvula de globo como una válvula tipo TCV la cual cuenta con un parámetro denominado “Setting” que representa el coeficiente de pérdida “K” asociado a diferentes porcentajes de apertura de la válvula. Con ello, cada valor de Setting corresponde a una condición específica de apertura,

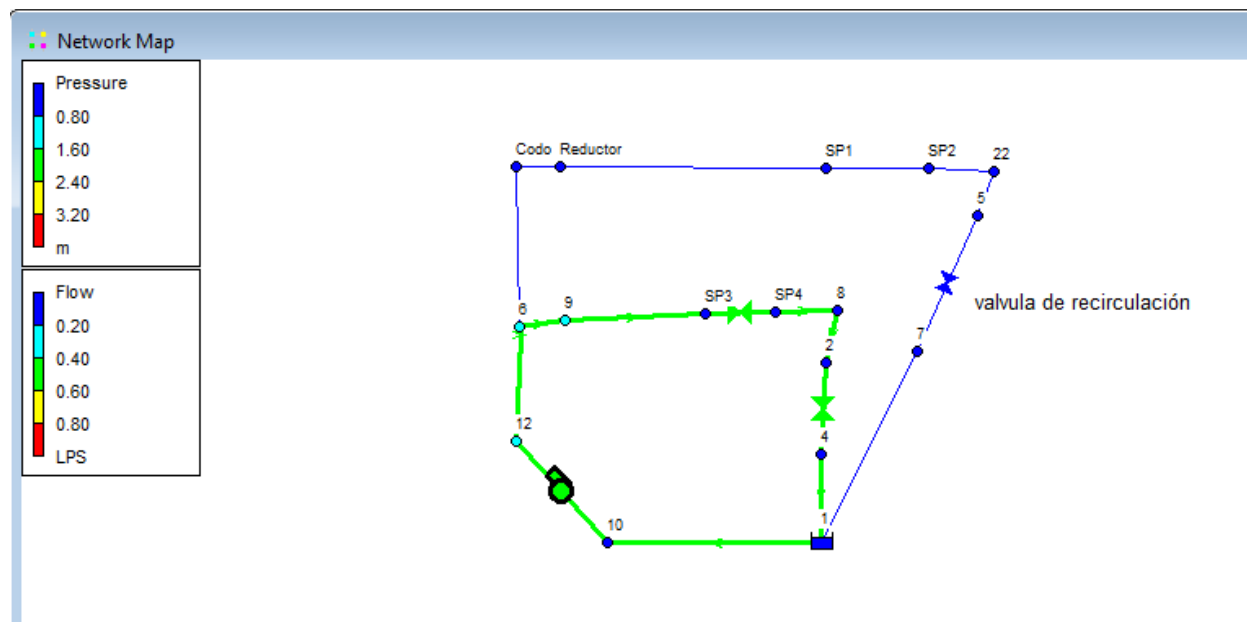
reflejando el efecto hidráulico que ejerce la válvula sobre el flujo del sistema como se detalla en la tabla 11.

Al ajustar el coeficiente de pérdida dentro del simulador, el software recalcula el régimen de trabajo del sistema, lo que se traduce en cambios inmediatos en el flujo volumétrico y en los niveles de presión diferencial registrados en la válvula. Mediante este método, logramos compilar una base de datos que vincula de manera directa el grado de apertura de la válvula con el caudal obtenido y su respectiva caída de presión tal como se detalla en el apéndice B.

Los resultados obtenidos mediante EPANET fueron utilizados para construir la curva de calibración del sistema, la cual sirve como referencia para comparar el comportamiento hidráulico simulado con los datos experimentales obtenidos en laboratorio. De este modo, la simulación contribuye a la validación del modelo hidráulico y al análisis del desempeño de la válvula bajo diferentes condiciones de operación

**Figura 25**

*Simulación del sistema final en EPANET*



Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de la simulación del sistema.

**Tabla 11.**

*Lista de pérdidas menores del sistema final*

Accesorio	Unidad	Valor	Total
Neplo hembra	2	0,05	0,1
Codo 90 0.5in	2	2	4
Unión Universal	3	0,08	0,24
Entrada abrupta	1	0,5	0,5
Expansor gradual	1	1,22	1,22
Codo 90 1in	1	1,5	1,5
reductores graduales	2	0,04	0,08
Tee flujo brusco	1	1,8	1,8
Válvula de globo	1	0,07	0,07
Tee flujo linear	1	0,9	0,9
		<b>TOTAL</b>	<b>10,41</b>

**Figura 26**

Resultado de caudal obtenido en la simulación del sistema hidráulico

Pipe 15	
Property	Value
*Start Node	9
*End Node	SP3
Description	
Tag	
*Length	0.34
*Diameter	26.7
*Roughness	0.0015
Loss Coeff.	0.17
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	0.59

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de la simulación del sistema.

**Tabla 12.**

Variación del flujo respecto al Setting (K)

Apertura (%)	K	Flujo (LPM)
31,25	24,47	28,8
40	19,94	31,2
50	19,14	31,2
60	18,9	31,2
75	18,77	31,2

**Tabla 13.***Variación de la presión respecto al Setting (K)*

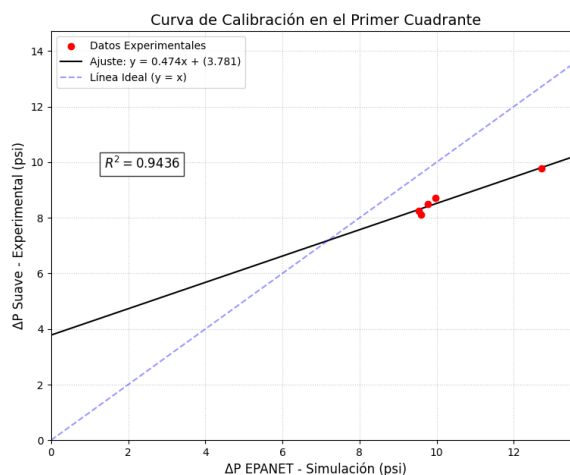
<b>Apertura (%)</b>	<b>K</b>	<b>Presión entrada (MPa)</b>	<b>Presión salida (Mpa)</b>
31,25	24,47	0,0924	0,00471
40	19,94	0,0739	0,0051
50	19,14	0,0725	0,0051
60	18,9	0,0712	0,0051
75	18,77	0,0709	0,0052

Con la finalidad de evaluar la relación existente entre los resultados que se obtuvieron por medio de la simulación hidráulica y el comportamiento experimental del sistema en la realidad, se desarrolló una comparación entre el valor de la caída de presión estimada por el programa de simulación EPANET y la caída de presión obtenida de forma experimental por los sensores presentes en la válvula de control.

Para el análisis se tomaron valores de caída de presión correspondientes a estados estacionarios respecto a cierta condición de apertura de la válvula, debido a que en estas condiciones se representa el régimen permanente de operación en el sistema, Los valores experimentales seleccionados pertenecen a señales las cuales ya estaban previamente suavizadas, con la finalidad de reducir el efecto del ruidos por parte de los instrumentos y garantizar una comparación firme con los resultados simulados.

**Figura 27**

Curva de Calibración entre los datos experimentales y simulación EPANET ( $\Delta P$ )



Los valores resultantes se ajustaron en pares, correspondientes a la caída de presión simulada por EPANET y la caída de presión experimental, estos valores se ajustaron por medio de una regresión lineal en donde se consideró como variables independientes la caída de presión simulada ( $\Delta P$  EPANET) y como variable dependiente la caída de presión experimental ( $\Delta P$  EXP), lo que presenta el siguiente ajuste:

$$\Delta P_{EXP} = 0.474 * \Delta P_{EXP} + 3.781 \quad (3.8)$$

El valor del coeficiente de determinación de dicho ajuste fue de  $R^2=0.9436$ , esto presenta una alta correlación entre los resultados simulados y los datos experimentales, dicho nivel de ajuste evidencia como el modelo hidráulico que se implementó mediante EPANET reproduce de forma adecuada la tendencia en cómo se comporta el sistema, aunque presenta diferencias en los valores absolutos de caída de presión.

La pendiente con un valor inferior a la unidad sugiere que el modelo de EPANET tiende a sobreestimar el valor de la caída de presión en comparación del valor experimental del sistema real, por otro lado, el término independiente implica la existencia de pérdidas adicionales presentes en el sistema experimental las cuales no son representadas de forma explícita en el modelo hidráulico. Dichas diferencias se pueden atribuir a las simplificaciones del modelo como a la presencia de pérdidas menores existentes por fugas de agua en el sistema, rugosidad interna en las tuberías, efectos constructivos y las condiciones reales de operación en el sistema real.

### **3.9 Análisis económico del sistema hidráulico automatizado**

#### **3.9.1 introducción al análisis económico**

Dentro de esta sección se busca dar a conocer el costo total de la inversión directa (CAPEX) el cual se asocia al diseño, construcción e implementación de un sistema hidráulico automatizado con fines académicos. Este análisis permite dimensionar el nivel de recursos necesarios para reproducir dicho prototipo en un entorno de laboratorio universitario y evaluar su viabilidad desde una perspectiva técnica–económica.

Dado que el sistema desarrollado corresponde a un prototipo experimental, el análisis se enfoca exclusivamente en los costos directos de adquisición e integración de componentes, sin considerar indicadores financieros clásicos como VAN o TIR, los cuales son propios de proyectos industriales o comerciales (Peters & Timmerhaus, 1991; Turton et al., 2018).

#### **3.9.2 Alcance del CAPEX considerado**

El CAPEX del sistema hidráulico automatizado se compone de los siguientes rubros:

- Equipos hidráulicos principales
- Instrumentación y sensores
- Sistema de control y parte electrónica
- Materiales hidráulicos y eléctricos
- Elementos de montaje e integración

No se incluyen costos de operación, mantenimiento ni depreciación, ya que con este análisis se pretende dar a conocer el costo de implementación inicial del sistema con fines académicos.

### 3.9.3 Resumen del costo total de inversión

**Tabla 14.**

Resumen del CAPEX del sistema hidráulico automatizado

<b>Categoría</b>	<b>Costo (USD)</b>
Construcción – parte control	289,27
Construcción – línea hidráulica	212,96
Parte estética	82,67
<b>CAPEX TOTAL</b>	<b>584,9</b>

**Nota:** El detalle completo de cada componente, cantidades y costos unitarios se presenta en el Apéndice A del presente documento.

### 3.9.4 Discusión del costo de implementación

El costo total de implementación del sistema hidráulico automatizado asciende a USD 584,9 valor que refleja de forma integral los recursos necesarios para la construcción del

prototipo, incluyendo equipos principales, instrumentación, electrónica de control y materiales de integración.

Este valor es considerablemente bajo en comparación con bancos de prueba comerciales para control de procesos, los cuales presentan costos elevados y menor flexibilidad para fines didácticos (Seborg et al., 2016). En consecuencia, el sistema desarrollado constituye una alternativa económica y técnicamente viable para la modernización de laboratorios universitarios de hidráulica y control de procesos.

### **3.9.5 Análisis del costo energético y operacional del sistema hidráulico automatizado**

Para lograr que el estudio del sistema hidráulico desarrollado sea integral, se llevó a cabo un estudio energético correspondiente al uso en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), el cual es importante ya que permite determinar el impacto económico real de las prácticas académicas, pues, el equipo no trabaja de manera continua.

El cálculo se limita al consumo eléctrico de los componentes operativos por la naturaleza pedagógica del sistema, por ende, se omiten gastos que se deriven del mantenimiento preventivo o del ciclo de vida de los materiales.

### **3.9.6 Potencia eléctrica instalada del sistema**

La potencia eléctrica total del sistema está dada principalmente por la bomba hidráulica, mientras que la electrónica de control (Arduino, sensores, driver y motor paso a paso) presenta un consumo significativamente más bajo. Debido a que los dispositivos electrónicos no trabajan de forma continua ni a potencia máxima, su consumo se reporta

como una estimación conservadora, práctica usual en análisis energéticos de sistemas de laboratorio.

**Tabla 15.**

*Potencia eléctrica de los principales componentes del sistema*

<b>Componente</b>	<b>Potencia nominal</b>	<b>Conversión</b>	<b>Potencia (kW)</b>
<b>Bomba hidráulica</b>	0.5 HP	1 HP = 0.746 kW	0.373
<b>Electrónica de control (Arduino, sensores, driver y motor paso a paso)</b>	—	Estimación conservadora	0.020
Potencia total del sistema	—	—	<b>0.393</b>

La bomba hidráulica representa aproximadamente el 95 % del consumo energético total del sistema, comportamiento típico en bancos de prueba hidráulicos, donde los sistemas de control y medición presentan consumos eléctricos reducidos en comparación con los equipos de potencia (Fox et al., 2003).

### **3.9.7 Consumo energético por sesión de laboratorio**

El sistema está diseñado para operar de forma intermitente durante prácticas académicas. Para este análisis se consideró una duración típica de 15 minutos por práctica, equivalente a 0.25 horas de operación continua.

El consumo energético por práctica se determinó mediante la expresión:

$$E = P \times t = 0.393 \times 0.25 = 0.098 \text{ KWh} \quad (3.9)$$

donde:

- P es la potencia total del sistema (kW),
- T es el tiempo de operación (h).

**Tabla 16.**

*Consumo energético por sesión de laboratorio*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Potencia total del sistema</b>	0.393 kW
<b>Tiempo de operación</b>	0.25 h
<b>Energía consumida por práctica</b>	<b>0.98 h</b>

### **3.9.8 Consumo energético acumulado y costo operativo**

Considerando un uso típico del sistema de dos prácticas por semana (en base a la suposición de dos paralelos), se estimó el consumo energético semanal, mensual y anual. Para el cálculo del costo se utilizó una tarifa eléctrica promedio de 0.10 USD/kWh, valor representativo del sector educativo y residencial en Ecuador.

**Tabla 17.***Consumo energético y costo operativo estimado*

<b>Periodo</b>	<b>Energía (kWh)</b>	<b>Costo (USD)</b>
<b>Por práctica</b>	0.098	0.0098
<b>Por semana (2 prácticas)</b>	0.196	0.0196
<b>Por mes (8 prácticas)</b>	0.786	0.079
<b>Por año (96 prácticas)</b>	<b>9.43</b>	<b>0.94</b>

### **3.9.9 Discusión del costo energético y operativo**

Los resultados demuestran que el impacto económico respecto al costo energético del sistema es prácticamente nulo, ya que no supera el dólar. Esto cobra sentido pues, el equipo prioriza la eficiencia además de usarse para tareas puntuales. Esto representa una ventaja enorme, posicionándolo como una alternativa superior frente a soluciones comerciales más robustas, que, debido a ser potentes, conllevan gastos de operación elevados.

#### **3.9.9.1 Comparación de costos y alcance funcional entre el sistema desarrollado y un equipo comercial**

El sistema hidráulico que se desarrolló en este proyecto presenta un costo de implementación de aproximadamente de USD 584.9, este valor incluye los componentes de hidráulica, el sistema electrónico, materiales de integración la instrumentación, permitiendo ser una alternativa de bajo costo que se orienta a fines académicos y de laboratorios universitarios.

Por otro lado, entre los equipos de enseñanza y demostración de control de flujo disponibles en el mercado internacional como lo es el Armfield Ltd. PCT61 Flow Control

Demonstration Unit, el cual presenta un precio más elevado. De acuerdo con catálogos y distribuidores académicos, este tipo de sistemas tiene un costo de aproximadamente USD 3000 y USD 4000, dependiendo de los accesorios y los módulos adiciones que se incluyan (armfield.co.uk, 2026).

Esta diferencia de costos presenta que el sistema tiene una reducción de aproximadamente el 80-85 % respecto a un equipo comercial de la misma equivalencia, manteniendo las funciones como la mediciones del caudal, análisis de la caída de presión, caracterización de válvula de control y un estudio de cómo se comporta el sistema en forma dinámica. Por ello, el sistema propuesto constituye una solución más económicamente viable y pedagógicamente efectiva para para aquellas instituciones con presupuesto limitado, sin sacrificar el aprendizaje en hidráulica y control de procesos.

### 3.9.9.2 Comparación funcional entre el sistema desarrollado y el equipo comercial

Desde el punto de vista académico-técnico, los dos sistemas presentar fortalezas diferenciales según el enfoque de uso.

**Tabla 18.**

*Características entre el sistema desarrollado por la tesis y el comercial*

<b>Característica</b>	<b>Sistema desarrollado en esta tesis</b>	<b>Equipo comercial Armfield PCT61</b>
<b>Costo aproximado</b>	≈ USD 700	≈ USD 3 500
<b>Rango de caudal</b>	Bajo-medio (laboratorio)	(escala Medio, definido por el fabricante)
<b>Tipo de válvula</b>	Válvula de globo real	Válvulas intercambiables

<b>Control dinámico</b>	Implementado y configurable	Integrado, configuración limitada
<b>Flexibilidad del sistema</b>	Alta (modificable y ampliable)	Baja (sistema cerrado)
<b>Enfoque principal</b>	Aprendizaje experimental y análisis	Demostración guiada
<b>Aplicación</b>	Formación en control hidráulica	Docencia estandarizada

El equipo comercial presenta como ventajas su robustez, estandarización y una facilidad en su uso, siendo adecuados para demostraciones rápidas y prácticas repetitivas: no obstante, su sistema es cerrado lo que limita la modificación del sistema y la explotación más profunda de los fenómenos dinámicos.

Por otro lado, el sistema desarrollado ofrece una mayor flexibilidad experimental, permitiendo modificar parámetros, implementar estrategias de control que se puedan personalizar y analizar el comportamiento real de la válvula bajo en diferentes condiciones de operación, dando como resultado un aprendizaje activo y una formación integral en ingeniería.

## **Capítulo 4**

## 4.1 Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

Después de realizar las fases metodológicas que se planearon para el desarrollo del sistema, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se logró desarrollar y caracterizar un sistema hidráulico de control de flujo a escala de laboratorio, por medio de la identificación experimental de su comportamiento estático como dinámico, lo que presenta una base para la regulación del caudal respecto al grado de apertura de la válvula

2. Se analizó el sistema hidráulico propuesto sin control dinámico por medio del software EPANET, lo que permitió determinar parámetros de funcionamiento, en particular valores de caídas de presión cercanos a 10.31 psia y un caudal nominal de aproximadamente 35.4 L/min, esto condescendió comprender el comportamiento del sistema cuando trabaja en régimen estacionario.

3. Por medio de los modelos dinámicos que se identificaron, se desarrolló la sintonización teórica de un controlador PID por Ziegler Nichols, lo que se obtuvo valores promedio de  $P = 16.85$ ,  $I = 3.36 \text{ s}^{-1}$  y  $D = 14.50 \text{ s}$ , los cuales presentaron ser coherentes y estables, lo que confirma la viabilidad del control dinámico del caudal.

4. Se comparó la caída de presión obtenida de forma experimental con los resultados simulados en el programa EPANET, obteniéndose una relación y curva de calibración lineal  $\Delta P = 0.474 \cdot \Delta P_{\text{EPANET}} + 3.787$ , con un  $R^2$  de 0.9436, que presenta como evidencia una

correspondencia razonable entre ambos enfoques y valida el uso de la simulación como herramienta de apoyo para el análisis real del sistema hidráulico.

### **Recomendaciones**

Tras culminar las actividades planificadas en el desarrollo del sistema hidráulico automatizado y considerando los resultados obtenidos, así como las limitaciones técnicas presentadas durante la ejecución del proyecto, se proponen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros y mejoras del sistema: Luego de terminar las actividades planificadas para el desarrollo del sistema hidráulico con control de flujo y considerando los resultados obtenidos, así como las limitantes técnicas presentadas durante la realización de proyecto, se propone las siguientes recomendaciones para trabajos futuros y mejoras en el sistema

- Mejorar el rango de operación de la apertura de la válvula, debido a que el sistema experimental solo permite trabajar en un rango aproximando de 0 a 58 % de apertura, esto se debe a una limitante mecánica impuesta por la mesa deslizante la cual es utilizada como mecanismo de seguridad. Para futuras implementaciones, se recomienda un rediseño de este elemento mecánico o la incorporación de un acople de mayor longitud que permita aprovechar la carrera total de la válvula y de esta forma ampliar el rango de análisis.
- Incorporar elementos de amortiguación hidráulica o mecánicos, esto es debido a las fluctuaciones observadas en el caudal del sistema durante su operación. La introducción de amortiguadas o de dispositivos de absorción de vibración permite reducir las oscilaciones, lo que mejora la estabilidad del sistema y se obtiene señales experimentales más limpias para la identificación dinámica y de control.
- Evaluar estrategias de control alternativas al método de Ziegler–Nichols en lazo cerrado, dado que en este trabajo la sintonización del controlador PID se realizó utilizando dicho método por su

simplicidad y aplicabilidad académica. En estudios futuros se recomienda implementar técnicas más avanzadas como sintonización por optimización, control predictivo basado en modelos (MPC) o control adaptativo, con el fin de mejorar el desempeño dinámico y la robustez del sistema frente a perturbaciones.

- Establecer un programa de mantenimiento y lubricación de forma periódica en el sistema mecánico, especialmente en la zona de la mesa deslizante y en la pieza hexagonal que unen el motor con el vástago de la válvula. La lubricación adecuada permitirá eliminar el desgaste mecánico, evitar descalibraciones en la posición de la válvula y certificar una operación más precisa y repetible del sistema a lo largo del tiempo.
- Se aconseja limitar la operación del sistema dentro de un rango seguro de apertura de la válvula, evitando posiciones cercanas a 0 % y cercanos al 100 %, ya que dichas condiciones generan transitorios hidráulicos de alta velocidad asociados a cambios abruptos del caudal. Estos transitorios pueden provocar sobrepresiones en la tubería, fenómeno conocido como golpe de ariete, el cual eleva el riesgo de daño en accesorios, pérdidas de estanqueidad y fallas prematuras del equipo
- Se recomienda reemplazar la manguera saliente de la línea principal del sistema por una de menor rigidez. La manguera actual tiende a doblarse durante su funcionamiento, provocando obstrucciones parciales en el paso del fluido. Esta condición entorpece el flujo continuo y uniforme del fluido, por lo que, el uso de una manguera más flexible ayudaría a evitar deformaciones, reducir las pérdidas de carga y asegurar un flujo más estable.

## Referencias

- Aguirre, S., Universidad, O., De Pereira, T., De, F., & Mecánica, I. (2023). MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA DE VEHÍCULOS EN SIMULINK. *Repositorio Institucional UTP*.
- Ajaz, M., & Ahmad, D. (2023). Optimal Water Quality Simulation of the Proposed Water Distribution System for the University of Kashmir Using EPANET 2.2 and Leakage Modelling of the Network Using EPANET Extension—WaterNetGen. *The 7th International Electronic Conference on Water Sciences*, 25(1), 27. <https://doi.org/10.3390/ecws-7-14251>
- Bojórquez Sánchez, I., Reyes Reyes, J., Gloria Lilia Osorio Gordillo, D., Amalio Vargas Méndez, R., & Quintero Mármol-Márquez, E. (2021). Modelado no lineal de válvulas en un sistema hidráulico algebraico diferencial de mezcla de dos flujos. *REVISTA IPSUMTEC*, 4(1), 35-43.
- Céspedes, A., & Gutiérrez, C. (2021). Modelo 3D de servomotor, que permite el movimiento articular de un brazo robótico. Mendeley.
- Dademuchconnection. (2018). Dinámica de un sistema de nivel de líquidos.
- David, A., Bagueña, N., Morales, M., Pilar, H., & Navarro, G. (2022). Estudio de parámetros significativos relacionados con el diseño de válvulas industriales de control mediante herramientas CFD. <https://zagan.unizar.es/record/146796/files/TAZ-TFG-2023-1316.pdf?version=1>
- Díaz, M. Á., & Posada, J.A (2025). Diseño de un prototipo de máquina de corte hidrodinámico a alta presión con desplazamiento automático. *Repositorio Universidad Francisco de Caldas*.
- García. (2022). Modelado, simulación y control del sistema hidráulico de bombeo de petróleo como herramienta didáctica para control de procesos.
- Kortela, J. (2022). Model-Predictive Control for the Three-Tank System Utilizing an Industrial Automation System. *ACS Omega*, 7(22). <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01275>
- Melendrez Giron, E. J. (2023). Instalación innovada de obtención de energía renovable de una mini (micro) hidroeléctrica para la creación de microempresas de unidades familiares en

la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica de la Universidad Nacional José F. Sánchez Carrión. Repositorio UNJFSC.

Rashid, S. M., Salloom, M. Y., Jemily, N. H. B., & Ab-Samat, H. (2024). Modeling and Simulation of Hydraulic Proportional Control Valves with Different Types of Controllers. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 20(2), 56-64.  
<https://doi.org/10.22153/kej.2024.03.001>

Paolo. (s.f.). *Curva de rendimiento de la bomba periférica Paolo PKM-60* [Imagen]. Importadora Marvin.

<https://importadoramarvin.com.ec/products/bomba-periferica-paolo-media-pkm-60-quito-ecuador-tunel-desinfeccion-herramientas-quito-ecuador>

Salazar Salas, J. M. (2020). La interacción de los usuarios en la Junta de Usuarios del Sistema Hidráulico Rímac y la presencia de la Ley de Recursos Hídricos. *Pontificia Universidad Católica del Perú*.

Vilches Gabriel Esteban. (2024). Desarrollo-de-un-sistema-maestro-para-la-seleccion-de-valvulas-de-control-reguladoras-de-flujo-para-plantas-de-procesos. *Repositorio Universidad de Chile*.  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/199940/Desarrollo-de-un-sistema-maestro-para-la-seleccion-de-valvulas-de-control-reguladoras-de-flujo-para-plantas-de-procesos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

armfield.co.uk. (2026, January). *PCT61 - Flow Control - Armfield*.  
<https://armfield.co.uk/product/pct61-flow-control/>

Astrom, K. J., & Hagglund, T. (2022). Advanced Pid Control K J Astrom T Hagglund | PDF | Control Theory | Applied Mathematics. In ISA instrumentation system and automation society (Ed.), <https://es.scribd.com/> (1st ed.).  
<https://es.scribd.com/document/979096415/Advanced-Pid-Control-K-J-Astrom-T-Hagglund>

Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications 3rd Edition*. McGraw-Hill. <https://engineeringbookslibrary.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/03/fluid-mechanics-fundamentals-and-applications-3rd-edition-cengel-and-cimbala-2014.pdf>

- CRANE Process Flow Technologies. (2010). *CRANE. Flow of Fluids Through Valves, Fitting and Pipe Technical Paper No. 410*. CRANE Co. <https://es.scribd.com/document/733867654/CRANE-Technical-Paper-410-1705972152>
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2003). *Introduction to FLUID MECHANICS* (Inc. John Wiley & Sons, Ed.; 6th ed.). [https://ahsheikh.github.io/Courses/NumMod/FM\\_RobertFox.pdf](https://ahsheikh.github.io/Courses/NumMod/FM_RobertFox.pdf)
- ISA-S75.01-1985 (R 1995). (1995). *Flow Equations for Sizing Control Valves*. Instrument Society of America. <https://pdfcoffee.com/flow-equations-for-sizing-control-valves-pdf-free.html>
- Johanåström, K. J., Murray, R. M., & Murray, R. (2006). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. <https://people.duke.edu/~hpgavin/SystemID/References/Astrom-Feedback-2006.pdf>
- Montgomery, D. C. . (2013). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). John Wiley & Sons, Inc. [https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/douglas\\_c.\\_montgomery-design\\_and\\_analysis\\_of\\_experiments-wiley\\_2012\\_edition\\_8.pdf](https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/douglas_c._montgomery-design_and_analysis_of_experiments-wiley_2012_edition_8.pdf)
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant Designs and Economic for Chemical Engineers* (B. J. Clark & J. M. Morriss, Eds.; 4th ed.). McGraw-Hill, Inc. [https://www.academia.edu/15075687/chemical\\_engineering\\_plant](https://www.academia.edu/15075687/chemical_engineering_plant)
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *NUMERICAL RECIPES. The Art of Scientific Computing. Third Edition* (3rd ed.). Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York. [https://faculty.kfupm.edu.sa/phys/aanaqvi/Numerical%20Recipes-The%20Art%20of%20Scientific%20Computing%203rd%20Edition%20\(Press%20et%20al\).pdf](https://faculty.kfupm.edu.sa/phys/aanaqvi/Numerical%20Recipes-The%20Art%20of%20Scientific%20Computing%203rd%20Edition%20(Press%20et%20al).pdf)
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle III, F. J. (2016). *Process Dynamics and Control Fourth Edition* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc. [https://elmoukrie.com/wp-content/uploads/2022/06/process-dynamics-and-control-dale-e.-seborg-thomas-f.-edgar-etc.-z-lib.org\\_.pdf](https://elmoukrie.com/wp-content/uploads/2022/06/process-dynamics-and-control-dale-e.-seborg-thomas-f.-edgar-etc.-z-lib.org_.pdf)
- Smith, S. W. (1990). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing. <https://ia801301.us.archive.org/23/items/GuideToDigitalSignalProcessing/Guide%20To%20Digital%20Signal%20Processing.pdf>

- Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D., & Whiting, W. B. (2018). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes Fifth Edition* (5th ed.). Pearson Education, Inc. [https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780134177489\\_A34478845/preview-9780134177489\\_A34478845.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780134177489_A34478845/preview-9780134177489_A34478845.pdf)
- White, F. M. (2025). *Fluid Mechanics* (J. P. Holman & J. Lloyd, Eds.; 4th ed.). McGraw-Hill. [https://www.academia.edu/8669730/Frank\\_M\\_White\\_Fluid\\_Mechanics](https://www.academia.edu/8669730/Frank_M_White_Fluid_Mechanics)
- Yin, M., & Zhao, L. (2021). Iterative parameter estimation of nonlinear systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 1883(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1883/1/012066>

**Apéndice A**  
**Costos totales**

**Construcción – Parte control**

<b>Componente / Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo unitario (USD)</b>	<b>Costo total (USD)</b>
<b>Varilla redonda de acero</b>	1	lote	5,49	5,49
<b>STEPPERONLINE relación de engranajes planetarios</b>	1	lote	24,5	24,5
<b>MIDLINE VALVE 95344</b>	1	lote	16,63	16,63
<b>STEPPERONLINE NEMA 17 pancake motor paso a paso</b>	1	lote	9,95	9,95
<b>Acoplamiento de eje flexible</b>	1	lote	12,99	12,99
<b>Controlador de motor paso a paso</b>	1	lote	10,89	10,89
<b>Mini interruptor de límite permeable</b>	1	lote	8,99	8,99
<b>Mesa deslizante</b>	1	lote	49,99	49,99
<b>Relación de engranaje de la caja de cambios planetaria 10:1</b>	1	lote	24	24
<b>Acople flexible 5 a 8 mm</b>	1	lote	8,9	8,9
<b>Jumpers</b>	1	lote	2,17	2,17
<b>Cable eléctrico</b>	1	lote	2,08	2,08
<b>Borneras 3 y 2P</b>	1	lote	1,72	1,72
<b>Microcontrolador</b>	1	unidad	14	14

<b>Sensor de caudal</b>	1	unidad	10,43	10,43
<b>Chimetaf 600 piezas de tornillos espaciadores hexagonales</b>	1	unidad	7,29	7,29
<b>Juego de acoplamiento rígido</b>	1	lote	6,99	6,99
<b>Stepperonline nema 17</b>	1	lote	7,26	7,26
<b>TOTAL</b>				289,27
<b>Construcción parte control</b>		–		

**Construcción – Línea hidráulica**

<b>Componente / Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo unitario (USD)</b>	<b>Costo total (USD)</b>
<b>Tubería PVC 1 in</b>	1	m	3,75	3,75
<b>Codos PVC de 1/2 in</b>	1	unidad	0,42	0,42
<b>Uniones PVC 1 in</b>	2	unidad	1,25	2,5
<b>Tes PVC 1/2 in</b>	2	unidad	0,55	1,1
<b>Reductores / expansores de 1 a 1/2 in (metal)</b>	1	unidad	9,49	9,49
<b>Tees PVC 1 in</b>	1	unidad	1,94	1,94
<b>Neplo perdido de metal 1 in</b>	2	unidad	0,69	1,38
<b>Neplo corrido PVC 1 in</b>	2	unidad	0,84	1,68
<b>Neplo hembra PVC 1/2 in</b>	1	unidad	0,26	0,26
<b>Adaptador flex 1/2 in</b>	2	unidad	0,2	0,4
<b>Adaptador de tanque 1 in PVC</b>	1	Unidad	5,4	5,4
<b>Codos PVC de 1 in</b>	1	Unidad	1,57	1,57

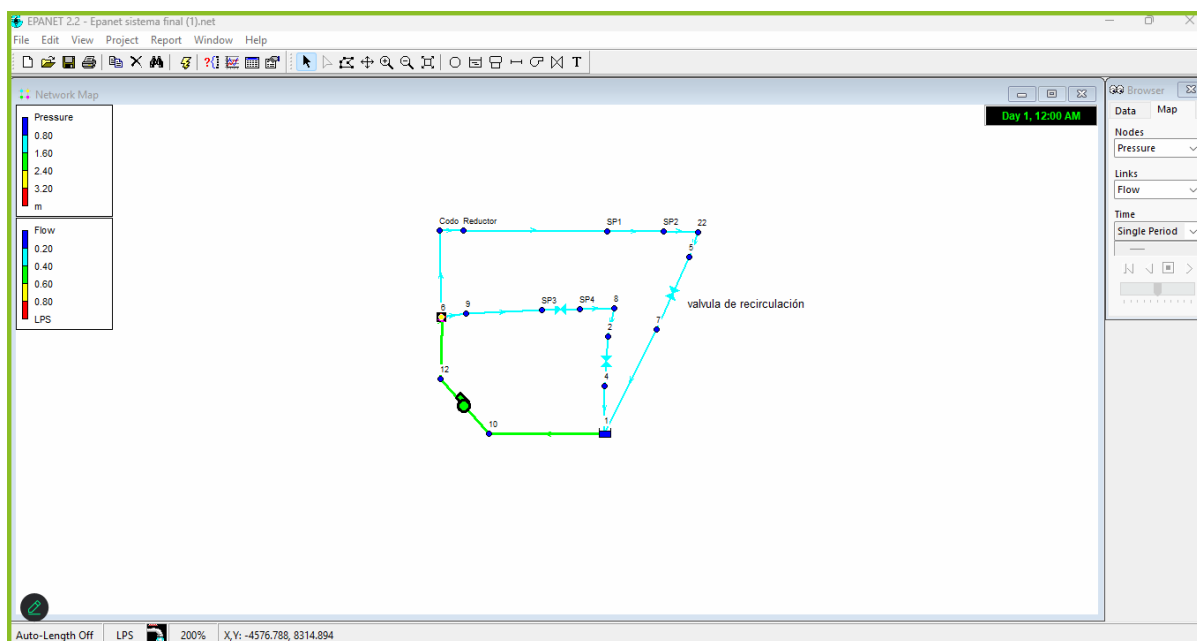
<b>Válvula de globo 1 in</b>	1	Unidad	16,63	16,63
<b>Olla de aluminio (tanque reservorio)</b>	1	Unidad	40	40
Bomba centrífuga	1	Unidad	43,75	43,75
<b>Neplo perdido PVC 1/2 in</b>	2	unidad	0,4	0,8
<b>Diseño de placa</b>	1	lote	80	80
<b>Válvula de Bola 1 in</b>	1	Unidad	1,89	1,89
<b>TOTAL Construcción – línea hidráulica</b>				<b>212,96</b>

### Costos de la parte estética

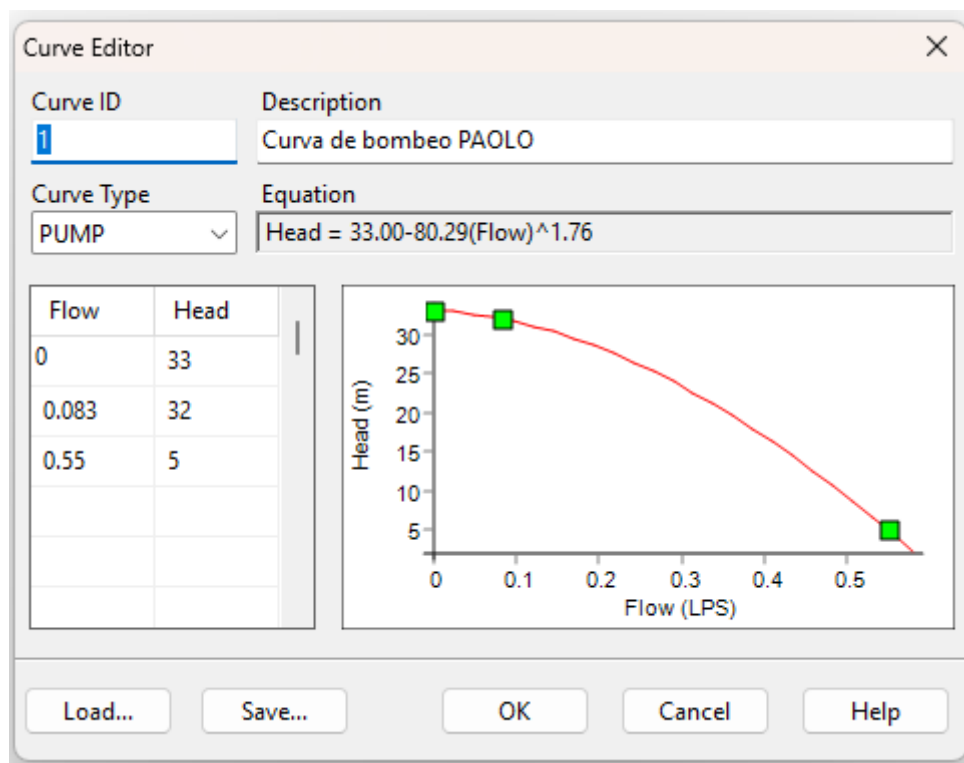
<b>Concepto</b>	<b>Costo total (USD)</b>
<b>Impresión 3D</b>	70,00
<b>Madera</b>	7,00
<b>Pintura negra</b>	4,67
<b>Brocha</b>	1,00
<b>TOTAL Parte estética</b>	<b>82,67</b>

**Apéndice B**  
**Simulación**

## Entorno de simulación



## Curva de bombeo registrada en EPANET



**Flujo de agua de acuerdo con el Setting**

<b>Apertura (%)</b>	<b>K</b>	<b>Flujo (LPS)</b>
<b>31,25</b>	24,47	0,5
<b>40</b>	19,94	0,52
<b>50</b>	19,14	0,52
<b>60</b>	18,9	0,52
<b>75</b>	18,77	0,52

**Variación de presión de acuerdo con el Setting**

<b>Apertura (%)</b>	<b>K</b>	<b>Presión entrada (M)</b>	<b>Presión salida (M)</b>
<b>31,25</b>	24,47	9,42	0,48
<b>40</b>	19,94	7,53	0,52
<b>50</b>	19,14	7,39	0,52
<b>60</b>	18,9	7,26	0,52
<b>75</b>	18,77	7,23	0,53

**Apéndice C**  
**Códigos**

- **Código de Sintonización**

```

• #include <AccelStepper.h> // Librería para controlar el motor paso a
  paso
•
• // Establecemos límites físicos y configuramos variables de movimiento
  del sistema
•
• // --- CAMBIO: maxPasos ya no es const, se calculará solo en el setup -
  --
• long maxPasos = 0; // Límite físico total (se actualiza en la auto-
  calibración)
•
• // POSICIONES (AHORA EN PORCENTAJE)
• // Formula interna: Pasos = ((Porcentaje deseado - 25)/58) * maxPasos
• const float POSICION_AUTO_1_PORCENTAJE = 30.0; // Porcentaje deseado
  para la posición inicial
• const float POSICION_AUTO_2_PORCENTAJE = 75.0; // Porcentaje deseado
  para la posición final
•
• // Variables internas para guardar los pasos calculados
• long pasosPosicion1 = 0; // Se calculará automáticamente en el setup
• long pasosPosicion2 = 0; // Se calculará automáticamente en el setup
•
• // RANGO VISUAL
• const float porcentajeMinimo = 25.0; // Porcentaje mínimo asociado al
  recorrido (Inicio / Cero)
• const float porcentajeMaximo = 83.0; // Porcentaje máximo asociado al
  recorrido (Fin / Max)
•
• // TIEMPO DE ESPERA ANTES DE MOVERSE
• const unsigned long tiempoDeEnsayo = 10000; // Tiempo de espera (10 s)
  antes de pasar a la posición 2
•
• // Definimos los pines
• const int pinPUL = 9; // Pin de pulso del motor
• const int pinDIR = 8; // Pin de dirección del motor
•
• const int btnAbrir = 5; // Botón para abrir en modo manual (VERDE)
• const int btnCerrar = 4; // Botón para cerrar en modo manual
  (AMARILLO)
•
• const int swCerrado = 11; // Final de carrera en posición cerrada
  (home)
• const int swAbierto = 10; // Final de carrera en posición abierta
•

```

```

• const int pinSensorFlujo = 3; // Pin del sensor de flujo por
  interrupción
•
• // --- NUEVOS PINES Y VARIABLES PARA SENSORES DE PRESION ---
• const int pinSensorP1 = A0; // Pin analógico para sensor antes de la
  válvula
• const int pinSensorP2 = A1; // Pin analógico para sensor después de
  la válvula
• const float vcc = 5.0; // Voltaje de referencia del Arduino
• const float maxPresion = 0.2; // Rango máximo del sensor en MPa
• const float rangoVoltaje = 4.0; // Rango útil de voltaje (4.5V - 0.5V)
• // Calibración específica (Offsets medidos por el usuario)
• const float offsetSensor1 = 0.4399; // Voltaje medido en sensor 1 a 0
  MPa
• const float offsetSensor2 = 0.4350; // Voltaje medido en sensor 2 a 0
  MPa
• // -----
•
• //VARIABLES PARA LECTURA DEL SENSOR DE FLUJO
•
• AccelStepper motor(1, pinPUL, pinDIR); // Configuración del motor en
  modo driver (1)
•
• volatile unsigned long flow_frequency1 = 0; // Conteo de pulsos del
  sensor de flujo
• unsigned long lastInterruptTime1 = 0; // Último tiempo registrado
  para evitar rebote
• float l_minute1 = 0; // Valor del flujo
  calculado
• const long debounceTime = 0; // Tiempo de antirebote del
  sensor
•
• unsigned long cloopTime = 0; // Temporizador para
  lecturas cada segundo
•
• // CRONÓMETRO
• unsigned long tiempoInicioProceso = 0; // Momento en que inicia el
  proceso
• bool procesoIniciado = false; // Indica si el cronómetro
  ya empezó
• bool movimientoFinalRealizado = false; // Indica si ya se ordenó
  el movimiento a la posición final
•
• // Estado del Sistema
• bool modoAutomatico = true; // Modo automático activo
  por defecto

```

```

• long objetivoActual = 0; // Posición hacia la que
  debe moverse el motor
•
• // Anti-Rebote
• int estadoAbrir = HIGH, estadoCerrar = HIGH; // Estados
  filtrados de los botones
• int ultimoEstadoAbrir = HIGH, ultimoEstadoCerrar = HIGH; // Estados
  previos de lectura
• unsigned long tCambioAbrir = 0, tCambioCerrar = 0; //
  Temporizadores para el debouncing
• const unsigned long retardo = 50; // Tiempo de
  filtro para botones
•
• // Interrupción Sensor
• void flow1() {
•   unsigned long interruptTime = millis(); // Tiempo actual
•   if (interruptTime - lastInterruptTime1 > debounceTime) {
•     flow_frequency1++; // Suma un pulso válido
  de flujo
•   }
•   lastInterruptTime1 = interruptTime; // Actualiza última
  lectura
• }
•
• void setup() {
•   Serial.begin(9600);
•   Serial.println("Sistema de Sintonizacion + AutoCalibracion");
•
•   pinMode(btnAbrir, INPUT_PULLUP); // Botón de abrir con resistencia
  interna
•   pinMode(btnCerrar, INPUT_PULLUP); // Botón de cerrar con
  resistencia interna
•   pinMode(swCerrado, INPUT_PULLUP); // Final de carrera cerrado
•   pinMode(swAbierto, INPUT_PULLUP); // Final de carrera abierto
•
•   pinMode(pinSensorFlujo, INPUT_PULLUP);
•   digitalWrite(pinSensorFlujo, HIGH);
•   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinSensorFlujo), flow1,
  FALLING); // Interrupción del sensor de flujo
•
•   motor.setPinsInverted(true, false, false); // Inversión de pines
  según driver
•   motor.setMaxSpeed(4000); // Velocidad máxima del
  motor
•   motor.setAcceleration(5000); // Aceleración del motor

```

```

• // =====
• // --- INICIO DE AUTO-CALIBRACIÓN (MEDICIÓN DE PASOS) ---
• // =====
•
• // 1. BUSCAR CERO (CERRADO)
• Serial.println(">> 1. BUSCANDO CERO...");
• if (digitalRead(swCerrado) == HIGH) { // Si no estamos en cero
•     motor.setSpeed(-1500); // Avanza hacia el home
(cerrar)
•     while (digitalRead(swCerrado) == HIGH) {
•         motor.runSpeed(); // Se mueve hasta que
toque el sensor cerrado
•     }
• }
• motor.setCurrentPosition(0); // Se establece el cero
absoluto
• motor.setSpeed(0);
• Serial.println(">> CERO ENCONTRADO.");
• delay(1000);
•
• // 2. BUSCAR MAXIMO (ABIERTO) PARA CALIBRAR maxPasos
• Serial.println(">> 2. MIDIENDO RECORRIDO TOTAL...");
• motor.setSpeed(1500); // Avanza hacia abrir a
velocidad moderada de calibración
• while (digitalRead(swAbierto) == HIGH) { // Mientras no toque el
sensor de abierto
•     motor.runSpeed(); // Moverse contando pasos
• }
• motor.setSpeed(0); // Detener motor al tocar
sensor
• maxPasos = motor.currentPosition(); // GUARDAR LOS PASOS
TOTALES CONTADOS
•
• Serial.print(">> CALIBRACION COMPLETA. MaxPasos: ");
• Serial.println(maxPasos);
• delay(1000);
•
• // 3. CALCULAR OBJETIVOS EN BASE A PORCENTAJE
• // Formula: Pasos = ((Porcentaje - 25) / 58) * maxPasos
• // Nota: 58 sale de (porcentajeMaximo - porcentajeMinimo) = (83 - 25)
• float rangoPorcentaje = porcentajeMaximo - porcentajeMinimo;
•
• // Calculo Posicion 1
• pasosPosicion1 = ((POSICION_AUTO_1_PORCENTAJE - porcentajeMinimo) /
rangoPorcentaje) * maxPasos;
• // Calculo Posicion 2

```

```

•   pasosPosicion2 = ((POSICION_AUTO_2_PORCENTAJE - porcentajeMinimo) /
rangoPorcentaje) * maxPasos;
•
•   Serial.print(">> Objetivo 1 (Pasos): ");
Serial.println(pasosPosicion1);
•   Serial.print(">> Objetivo 2 (Pasos): ");
Serial.println(pasosPosicion2);
•
•   // 4. IR A POSICION INICIAL DE TRABAJO
•   Serial.println(">> YENDO A POSICION DE INICIO...");
•   motor.moveTo(pasosPosicion1);           // Usamos la variable
calculada
•   while (motor.distanceToGo() != 0) {
•       motor.run();
•   }
•   Serial.println(">> LISTO.");
•
•   cloopTime = millis();
•   objetivoActual = pasosPosicion1;       // El primer objetivo es
la posición 1 calculada
•   procesoIniciado = false;
•   }
•
•   void loop() {
•       unsigned long currentTime = millis();
•
•       // 1. Lectura por Serial (cambio de modo)
•       if (Serial.available() > 0) {
•           char cmd = Serial.read();
•           if (cmd == 'M' || cmd == 'm') {           // Entra en modo manual
•               modoAutomatico = false;
•               procesoIniciado = false;
•               motor.setSpeed(0);
•               motor.moveTo(motor.currentPosition());
•               Serial.println(">> MODO MANUAL");
•           }
•           else if (cmd == 'A' || cmd == 'a') {       // Regresa al modo
automático
•               modoAutomatico = true;
•               objetivoActual = pasosPosicion1;     // Reinicia a la posición
1 calculada
•               procesoIniciado = false;
•               movimientoFinalRealizado = false;
•               motor.moveTo(pasosPosicion1);
•               Serial.println(">> REINICIANDO PROCESO...");
•           }
•       }

```

```

• }
•
• // 2. Envío de datos al monitor serial cada 1 segundo
• if (currentTime >= (cloopTime + 1000)) {
•   cloopTime = currentTime;
•
•   // Cálculo del flujo por pulsos
•   if (flow_frequency1 != 0) {
•     l_minute1 = (flow_frequency1 + 2.7) / 6.5163; //Ecuacion de
calibracion sensor de flujo
•     flow_frequency1 = 0;
•   } else {
•     l_minute1 = 0;
•   }
•
•   // Cálculo de apertura como porcentaje
•   float rangoTotal = porcentajeMaximo - porcentajeMinimo; //58
unidades de movimiento
•   long posActual = constrain(motor.currentPosition(), 0, maxPasos);
•   float fraccion = (float)posActual / maxPasos;
•   float percentage = porcentajeMinimo + (fraccion * rangoTotal);
•
•   // Tiempo del proceso en segundos (si está en automático)
•   float segundosProceso = 0.0;
•   if (modoAutomatico && procesoIniciado) {
•     segundosProceso = (currentTime - tiempoInicioProceso) / 1000.0;
•   }
•
•   // --- NUEVO CODIGO: LECTURA DE PRESIONES ---
•   float rawP1 = analogRead(pinSensorP1); // Leer sensor Entrada (0-
1023)
•   float rawP2 = analogRead(pinSensorP2); // Leer sensor Salida (0-
1023)
•
•   // Convertir lectura a voltaje
•   float vP1 = rawP1 * (vcc / 1023.0);
•   float vP2 = rawP2 * (vcc / 1023.0);
•
•   // Calcular Presión MPa usando calibración (Offset y Rango)
•   float p1_MPa = ((vP1 - offsetSensor1) / rangoVoltaje) * maxPresion;
•   float p2_MPa = ((vP2 - offsetSensor2) / rangoVoltaje) * maxPresion;
•
•   // Filtro de negativos (ruido eléctrico)
•   if(p1_MPa < 0.001) p1_MPa = 0.0;
•   if(p2_MPa < 0.001) p2_MPa = 0.0;

```

```

• // Calcular Caída de Presión
• float deltaP = p1_MPa - p2_MPa;
• // -----
•
• // Impresión de datos
• Serial.print("Tiempo:");
• Serial.print(segundosProceso);
• Serial.print(",");
• Serial.print("flujo:");
• Serial.print(l_minute1);
• Serial.print(",");
• Serial.print("Apertura:");
• Serial.print(percentage);
• // --- NUEVA IMPRESION DE DATOS DE PRESION ---
• Serial.print(",");
• Serial.print("P_Entrada:");
• Serial.print(p1_MPa, 4); // 4 decimales
• Serial.print(",");
• Serial.print("P_Salida:");
• Serial.print(p2_MPa, 4);
• Serial.print(",");
• Serial.print("DeltaP:");
• Serial.println(deltaP, 4);
• // -----
• }
•
• // 3. Lógica de control automático
• if (modoAutomatico) {
•
• // Fase 1: permanecer en posición inicial
• if (objetivoActual == pasosPosicion1) { // Usamos la variable
calculada
•
•     if (motor.distanceToGo() == 0) { // Ya llegó a la posición
•
•         if (!procesoIniciado) { // Inicia conteo del tiempo
•             tiempoInicioProceso = currentTime;
•             procesoIniciado = true;
•             movimientoFinalRealizado = false;
•             Serial.println(">> INICIO CRONOMETRO.");
•         }
•
•         // Pasado el tiempo, mover a la posición final
•         if (procesoIniciado && !movimientoFinalRealizado &&
(currentTime - tiempoInicioProceso >= tiempoDeEnsayo)) {

```

```

•         objetivoActual = pasosPosicion2; // Cambiamos al
objetivo calculado 2
•         movimientoFinalRealizado = true;
•     }
•     }
•     else {
•         procesoIniciado = false; // Si aún se está moviendo, no se
cuenta tiempo
•     }
• }
•
•     motor.moveTo(objetivoActual); // Actualiza el destino del motor
• }
• else {
•     // CONTROL MANUAL
•     leerBotones();
•     if (estadoAbrir == LOW && estadoCerrar == HIGH) {
•         motor.moveTo(maxPasos); // Usa maxPasos calculado
•     } else if (estadoCerrar == LOW && estadoAbrir == HIGH) {
•         motor.moveTo(0);
•     } else {
•         motor.setSpeed(0);
•         motor.moveTo(motor.currentPosition());
•     }
• }
•
• // 4. Seguridad: límites físicos (SEGURIDAD CON FINALES DE CARRERA)
• if (digitalRead(swAbierto) == LOW) {
•     if (motor.distanceToGo() > 0) {
•         motor.setSpeed(0);
•         motor.setCurrentPosition(maxPasos); // Recalibra al tope
calculado
•         motor.moveTo(maxPasos);
•     }
• }
• if (digitalRead(swCerrado) == LOW) {
•     if (motor.distanceToGo() < 0) {
•         motor.setSpeed(0);
•         motor.setCurrentPosition(0);
•         motor.moveTo(0);
•     }
• }
•
•     motor.run(); // Actualiza el motor en cada ciclo
• }

```

```

• // Anti-rebote de botones
• void leerBotones() {
•   int A = digitalRead(btnAbrir);    // Lectura cruda del botón Abrir
•   int C = digitalRead(btnCerrar);   // Lectura cruda del botón Cerrar
•
•   if (A != ultimoEstadoAbrir) tCambioAbrir = millis();
•   if ((millis() - tCambioAbrir) > retardo) {
•     if (A != estadoAbrir) estadoAbrir = A;
•   }
•   ultimoEstadoAbrir = A;
•
•   if (C != ultimoEstadoCerrar) tCambioCerrar = millis();
•   if ((millis() - tCambioCerrar) > retardo) {
•     if (C != estadoCerrar) estadoCerrar = C;
•   }
•   ultimoEstadoCerrar = C;
• }

```

- **Código de control.**

```

• #include <SPI.h>
• #include <Wire.h>
• #include <AccelStepper.h>
• #include <PID_v1_bc.h>
•
• // =====
• // RANGOS PARA VISUALIZACIÓN
• // =====
• const float PORCENTAJE_MIN_VISUAL = 31.0;
• const float PORCENTAJE_MAX_VISUAL = 89.0;
•
• // =====
• // PINES
• // =====
• const int pinPUL = 9;
• const int pinDIR = 8;
• const int swCerrado = 12;
• const int swAbierto = 11;
• const int pinSensorFlujo = 3;
•
• const int pinSensorP1 = A0;
• const int pinSensorP2 = A1;
• const int pinPotenciometro = A2;
•
• // =====
• // MOTOR

```

```

• // =====
• AccelStepper motor(AccelStepper::DRIVER, pinPUL, pinDIR);
• long pasosTotalesFisicos = 0;
• long targetPosition = 0;
•
• // =====
• // SENSORES
• // =====
• const float vcc = 5.0;
• const float maxPresion = 0.2;
• const float rangoVoltaje = 4.0;
• const float offsetSensor1 = 0.4399;
• const float offsetSensor2 = 0.4350;
•
• // =====
• // FLUJO
• // =====
• volatile unsigned long flow_frequency1 = 0;
• unsigned long lastInterruptTime1 = 0;
• float l_minute1 = 0;
• const long debounceTime = 0;
•
• // =====
• // PID
• // =====
• double Setpoint, Input, Output;
• double Kp = 16.85, Ki = 3.35, Kd = 14.50;
• PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
•
• // =====
• // CONTROL
• // =====
• unsigned long cloopTime = 0;
• bool enRecalibracion = false;
•
• // VARIABLES DE TIEMPO
• unsigned long startTime = 0; // Para contar el tiempo total (0, 1,
• 2...)
• unsigned long lastPrintTime = 0; // Para controlar la impresión cada 1s
•
• // =====
• // INTERRUPCIÓN FLUJO
• // =====
• void flow1() {
• unsigned long t = millis();
• if (t - lastInterruptTime1 > debounceTime) {

```

```

•   flow_frequency1++;
•   }
•   lastInterruptTime1 = t;
•   }
•
•   // =====
•   // FILTRO POTENCIÓMETRO
•   // =====
•   int leerPotFiltrado() {
•       long suma = 0;
•       for (int i = 0; i < 10; i++) {
•           suma += analogRead(pinPotenciometro);
•           delayMicroseconds(200);
•       }
•       return suma / 10;
•   }
•
•   // =====
•   // RECALIBRACIONES
•   // =====
•   void recalibrarCerrado() {
•       enRecalibracion = true;
•       myPID.SetMode(MANUAL);
•       motor.stop();
•
•       motor.setSpeed(-1200);
•       while (digitalRead(swCerrado) == HIGH) {
•           motor.runSpeed();
•       }
•
•       motor.setSpeed(0);
•       motor.setCurrentPosition(0);
•
•       myPID.SetMode(AUTOMATIC);
•       enRecalibracion = false;
•   }
•
•   void recalibrarAbierto() {
•       enRecalibracion = true;
•       myPID.SetMode(MANUAL);
•       motor.stop();
•
•       motor.setSpeed(1200);
•       while (digitalRead(swAbierto) == HIGH) {
•           motor.runSpeed();
•       }
•   }

```

```

•
•   motor.setSpeed(0);
•   pasosTotalesFisicos = motor.currentPosition();
•
•
•   myPID.SetMode(AUTOMATIC);
•   enRecalibracion = false;
• }
•
• // =====
• // SETUP
• // =====
• void setup() {
•   Serial.begin(9600);
•
•   pinMode(swCerrado, INPUT_PULLUP);
•   pinMode(swAbierto, INPUT_PULLUP);
•   pinMode(pinSensorFlujo, INPUT_PULLUP);
•
•   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinSensorFlujo), flow1,
FALLING);
•
•   motor.setPinsInverted(true, false, false);
•   motor.setMaxSpeed(4000);
•   motor.setAcceleration(5000);
•
•   // ----- CALIBRACIÓN INICIAL -----
•   motor.setSpeed(-1200);
•   while (digitalRead(swCerrado) == HIGH) motor.runSpeed();
•   motor.setCurrentPosition(0);
•
•   motor.setSpeed(1500);
•   while (digitalRead(swAbierto) == HIGH) motor.runSpeed();
•   pasosTotalesFisicos = motor.currentPosition();
•
•   motor.setSpeed(-1200);
•   while (digitalRead(swCerrado) == HIGH) motor.runSpeed();
•   motor.setCurrentPosition(0);
•
•   // ----- PID -----
•   myPID.SetOutputLimits(0, 255);
•   myPID.SetSampleTime(200);
•   myPID.SetMode(AUTOMATIC);
•
•   // >>> INICIALIZACIÓN DE TIEMPOS <<<
•   startTime = millis(); // Tiempo cero real
•   cloopTime = millis(); // Tiempo para el PID (200ms)

```

```

•   lastPrintTime = millis(); // Tiempo para el Serial (1000ms)
•   }
•
•   // =====
•   // LOOP
•   // =====
•   void loop() {
•
•       unsigned long now = millis();
•
•       // ----- PROTECCIÓN FINALES -----
•       if (!enRecalibracion) {
•           if (digitalRead(swCerrado) == LOW && motor.currentPosition() > 10)
•           {
•               recalibrarCerrado();
•               return;
•           }
•           if (digitalRead(swAbierto) == LOW &&
•               motor.currentPosition() < pasosTotalesFisicos - 10) {
•               recalibrarAbierto();
•               return;
•           }
•       }
•
•       // ----- CICLO PID (Cada 200ms) -----
•       // Esto debe seguir rápido para calcular bien el flujo y mover el
motor
•       if (now - cloopTime >= 200 && !enRecalibracion) {
•           cloopTime = now;
•
•           // ----- SETPOINT -----
•           static double lastSetpoint = 0;
•           int pot = leerPotFiltrado();
•           Setpoint = pot * (50.0 / 1023.0);
•
•           if (abs(Setpoint - lastSetpoint) < 0.3)
•               Setpoint = lastSetpoint;
•           else
•               lastSetpoint = Setpoint;
•
•           // ----- FLUJO -----
•           if (flow_frequency1 > 0) {
•               // Cálculo corregido (pulsos * 5 para escalar 200ms a 1s)
•               l_minute1 = ((flow_frequency1 * 5.0) + 4.98) / 7.3915;
•               flow_frequency1 = 0;
•           } else {

```

```

•   l_minute1 = 0;
•   }
•
•   // ----- PRESIONES -----
•   float vP1 = analogRead(pinSensorP1) * (vcc / 1023.0);
•   float vP2 = analogRead(pinSensorP2) * (vcc / 1023.0);
•
•   float p1 = ((vP1 - offsetSensor1) / rangoVoltaje) * maxPresion;
•   float p2 = ((vP2 - offsetSensor2) / rangoVoltaje) * maxPresion;
•
•   if (p1 < 0.001) p1 = 0;
•   if (p2 < 0.001) p2 = 0;
•
•   // ----- PID -----
•   Input = l_minute1;
•   myPID.Compute();
•
•   targetPosition = constrain(
•       map(Output, 0, 255, 0, pasosTotalesFisicos),
•       0,
•       pasosTotalesFisicos
•   );
•
•   motor.moveTo(targetPosition);
•
•   // ----- APERTURA -----
•   float frac = (float)motor.currentPosition() / pasosTotalesFisicos;
•   float apertura = PORCENTAJE_MIN_VISUAL +
•       frac * (PORCENTAJE_MAX_VISUAL -
•   PORCENTAJE_MIN_VISUAL);
•
•   apertura = constrain(apertura,
•       PORCENTAJE_MIN_VISUAL,
•       PORCENTAJE_MAX_VISUAL);
•
•   // >>> MONITOR SERIAL (Cada 1000ms / 1 segundo) <<<
•   // Verificamos si pasó 1 segundo desde la última impresión
•   if (now - lastPrintTime >= 1000) {
•       lastPrintTime = now; // Reiniciamos contador de impresión
•
•       long segundosProceso = (now - startTime) / 1000;
•
•       Serial.print("T:"); Serial.print(segundosProceso);
•       Serial.print(",SP:"); Serial.print(Setpoint, 1);
•       Serial.print(",Flujo:"); Serial.print(l_minute1, 2);
•       Serial.print(",Apertura:"); Serial.print(apertura-31, 1);

```

```

•     Serial.print(",P1:"); Serial.print(p1, 4);
•     Serial.print(",P2:"); Serial.println(p2, 4);
•     }
•   }
•
•   motor.run();
• }
•

```

- **Código de limpieza de datos (Toma 1)**

```

#Toma 1 gráficas
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import savgol_filter

# 1. Lectura de Archivo (Estructura original respetada)
archivo = open("Toma 1 de 31.25 A 75.txt", "r")
informacion = archivo.read()
lista_informacion = informacion.split('\n')
archivo.close()

lista_Tiempo = []
lista_flujo = []
lista_Apertura = []
lista_P_Entrada = []
lista_P_Salida = []
lista_DeltaP = []

for dato in lista_informacion:
    if not dato: continue
    lista_dato = dato.split(',')
    for valores in lista_dato:
        lista_valores = valores.split(':')
        parametro = lista_valores[0].strip()
        numero = lista_valores[1].strip()

        if parametro == "Tiempo":
            lista_Tiempo.append(float(numero))
        elif parametro == "flujo":
            lista_flujo.append(float(numero))
        elif parametro == "Apertura":
            lista_Apertura.append(float(numero))
        elif parametro == "P_Entrada":
            lista_P_Entrada.append(float(numero) * 145.038 + 14.696)
        elif parametro == "P_Salida":

```

```

        lista_P_Salida.append(float(numero) * 145.038 + 14.696)
    elif parametro == "DeltaP":
        lista_DeltaP.append(float(numero) * 145.038)

# 2. Conversión a vectores de NumPy
vector_Tiempo = np.array(lista_Tiempo)
vector_flujo = np.array(lista_flujo)
vector_P_Entrada = np.array(lista_P_Entrada)
vector_P_Salida = np.array(lista_P_Salida)
vector_DeltaP = np.array(lista_DeltaP)

# --- SECCIÓN DE SUAVIZADO ---
# Aplicamos el filtro a las 4 variables
v_F_s = savgol_filter(vector_flujo, 5, 2)
v_P1_s = savgol_filter(vector_P_Entrada, 5, 2)
v_P2_s = savgol_filter(vector_P_Salida, 5, 2)
v_DP_s = savgol_filter(vector_DeltaP, 5, 2)

# --- GRÁFICAS COMPARATIVAS (4 VENTANAS) ---
# Creamos una figura con 4 sub-gráficas

#plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(vector_Tiempo, vector_flujo, label="Original (con picos)",
alpha=0.4, color='red')
plt.plot(vector_Tiempo, v_F_s, label="Suavizado", color='blue',
linewidth=2)
plt.xlabel("Tiempo (s)")
plt.ylabel("Flujo (L/min)")
plt.title("Suavizado de Datos de Flujo")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

#plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(vector_Tiempo, vector_P_Entrada, label="Original (con
picos)", alpha=0.4, color='red')
plt.plot(vector_Tiempo, v_P1_s, label="Suavizado", color='blue',
linewidth=2)
plt.xlabel("Tiempo (s)")
plt.ylabel("Presión de Entrada (psia)")
plt.title("Suavizado de Datos de Presión de Entrada")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

#plt.figure(figsize=(10, 5))

```

```

plt.plot(vector_Tiempo, vector_P_Salida, label="Original (con
picos)", alpha=0.4, color='red')
plt.plot(vector_Tiempo, v_P2_s, label="Suavizado", color='blue',
linewidth=2)
plt.xlabel("Tiempo (s)")
plt.ylabel("Presión de Entrada (psia)")
plt.title("Suavizado de Datos de Presión de Salida")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

#plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(vector_Tiempo, vector_DeltaP, label="Original (con picos)",
alpha=0.4, color='red')
plt.plot(vector_Tiempo, v_DP_s, label="Suavizado", color='blue',
linewidth=2)
plt.xlabel("Tiempo (s)")
plt.ylabel("Delta P (psia)")
plt.title("Suavizado de Datos de Delta P")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

```

- **Código de Generación de archivos Excel con datos suavizados (Toma 1)**

```

#Excel de Toma 1
import numpy as np
import pandas as pd # <-- Librería para Excel
from scipy.signal import savgol_filter

# 1. Lectura de Archivo (Tu estructura original)
archivo = open("Toma 1 de 31.25 A 75.txt", "r")
informacion = archivo.read()
lista_informacion = informacion.split('\n')
archivo.close()

lista_Tiempo = []
lista_flujo = []
lista_Apertura = []
lista_P_Entrada = []
lista_P_Salida = []
lista_DeltaP = []

for dato in lista_informacion:
    if not dato: continue
    lista_dato = dato.split(',')

```

```

for valores in lista_dato:
    lista_valores = valores.split(':')
    parametro = lista_valores[0].strip()
    numero = lista_valores[1].strip()

    if parametro == "Tiempo":
        lista_Tiempo.append(float(numero))
    elif parametro == "flujo":
        lista_flujo.append(float(numero))
    elif parametro == "Apertura":
        lista_Apertura.append(float(numero))
    elif parametro == "P_Entrada":
        lista_P_Entrada.append(float(numero) * 145.038 + 14.696)
    elif parametro == "P_Salida":
        lista_P_Salida.append(float(numero) * 145.038 + 14.696)
    elif parametro == "DeltaP":
        lista_DeltaP.append(float(numero) * 145.038)

# 2. Conversión a vectores de NumPy
vector_Tiempo = np.array(lista_Tiempo)
vector_flujo = np.array(lista_flujo)
vector_Apertura = np.array(lista_Apertura)
vector_P_Entrada = np.array(lista_P_Entrada)
vector_P_Salida = np.array(lista_P_Salida)
vector_DeltaP = np.array(lista_DeltaP)

# --- SECCIÓN DE SUAVIZADO ---
# Usamos ventana 5 y grado 2 para mantener la consistencia
v_F_s = savgol_filter(vector_flujo, 5, 2)
v_P1_s = savgol_filter(vector_P_Entrada, 5, 2)
v_P2_s = savgol_filter(vector_P_Salida, 5, 2)
v_DP_s = savgol_filter(vector_DeltaP, 5, 2)

# --- EXPORTACIÓN A EXCEL ---
# Creamos un diccionario vinculando los nombres de las columnas con
los vectores
datos_finales = {
    "Tiempo (s)": vector_Tiempo,
    "Apertura (%)": vector_Apertura,
    "Flujo Suave (L/min)": v_F_s,
    "P1 Suave (psia)": v_P1_s,
    "P2 Suave (psia)": v_P2_s,
    "DeltaP Suave (psi)": v_DP_s
}

# Creamos el DataFrame (Tabla)

```

```
df = pd.DataFrame(datos_finales)

# Guardamos en un archivo Excel
nombre_archivo = "Toma 1 de 31.25 A 75 suavizado.xlsx"
df.to_excel(nombre_archivo, index=False)

print(f"¡Éxito! Los datos han sido exportados a: {nombre_archivo}")
```

- **Código de Ajuste de la Función de Transferencia (Toma 1)**

```
#Toma 1
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. LECTURA DE DATOS CON MANEJO DE ERRORES
nombre_archivo = "Toma 1 de 31.25 A 75 suavizado.xlsx"

try:
    if nombre_archivo.endswith('.xlsx'):
        data = pd.read_excel(nombre_archivo)
    else:
        data = pd.read_csv(nombre_archivo, encoding='latin-1')
    print("Archivo cargado exitosamente.")
except Exception as e:
    print(f"Error al cargar el archivo: {e}")

# 2. SELECCIÓN DE COLUMNAS
columna_t = "Tiempo (s)"
columna_y = "Flujo Suave (L/min)"
columna_u = "Apertura (%)"

t_raw = data[columna_t].values
y_raw = data[columna_y].values
u_raw = data[columna_u].values

# 3. TRANSFORMACIÓN A VARIABLES DE DESVIACIÓN
y_inicial = np.mean(y_raw[u_raw == 31.25])
u_inicial = 31.25
u_final = 75.0

t_data = t_raw - t_raw[0]
y_data = y_raw - y_inicial
m_data = u_final - u_inicial
```

```

# 4. MODELO FOPDT (Primer Orden con Tiempo Muerto)
def modelo(t, k, tau, to):
    return np.where(t < to, 0, k * m_data * (1 - np.exp(-(t - to) /
tau)))

# 5. AJUSTE DE PARÁMETROS
k0, tau0, to0 = 0.03, 1.0, 14.0
try:
    parametros_opt, _ = curve_fit(modelo, t_data, y_data, p0=[k0,
tau0, to0], bounds=(0, [1, 50, 25]))
    k_opt, tau_opt, to_opt = parametros_opt
except:
    print("No se pudo ajustar la curva. Revisa los datos.")
    k_opt, tau_opt, to_opt = k0, tau0, to0

# 6. CÁLCULO DE R2
y_cal = modelo(t_data, k_opt, tau_opt, to_opt)
r2 = 1 - (np.sum((y_data - y_cal)**2) / np.sum((y_data -
np.mean(y_data))**2))

# 7. GRÁFICAS
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(t_data, y_data, 'bo', label=r"Datos experimentales
($\Delta$ Caudal)", markersize=4, alpha=0.6)
plt.plot(t_data, y_cal, 'r-', label=f"Modelo FOPDT (R2 = {r2:.4f})",
linewidth=2)
plt.xlabel("Tiempo (s)")
plt.ylabel(r"Variación de Caudal $\Delta Q$ (L/min)")
plt.title("Identificación de la Función de Transferencia")
plt.legend()
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)

# Texto de la ecuación en el gráfico
texto_f = rf"$G(s) = \frac{{{k_opt:.4f}} \cdot e^{\{-
{to_opt:.2f}s\}}}{\{\tau_opt:.2f}s + 1\}}$"
plt.text(max(t_data)*0.4, max(y_data)*0.2, texto_f, fontsize=14,
color='darkred', bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8))
plt.show()

# 8. IMPRESIÓN DE RESULTADOS Y FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
L_real = to_opt - 14.0

print("-" * 50)
print(f"{'RESULTADOS DE LA IDENTIFICACIÓN':^50}")
print("-" * 50)
print(f"Ganancia (K):                {k_opt:.6f}")

```

```

print(f"Tau (Constante de tiempo):      {tau_opt:.6f} s")
print(f"Tiempo Muerto total (to):      {to_opt:.6f} s")
print(f"Tiempo Muerto del proceso (L):  {L_real:.6f} s")
print(f"Precisión del ajuste (R2):     {r2:.6f}")
print("-" * 50)

# Impresión de la función Experimental
print("\n1. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EXPERIMENTAL (Incluye espera
inicial):")
print(f"          {k_opt:.6f} * e^{-{to_opt:.2f}s}")
print(f" G_exp(s) = -----")
print(f"          {tau_opt:.4f}s + 1")

# Impresión de la función de la Planta
print("\n2. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA (Proceso Real):")
print(f"          {k_opt:.6f} * e^{-{L_real:.4f}s}")
print(f" G_plan(s) = -----")
print(f"          {tau_opt:.4f}s + 1")
print("-" * 50)

```

- **Código de Sintonización (Toma 1)**

```

import numpy as np
import control as ct

# =====
# 1. PARÁMETROS DE LA PLANTA (Toma 1)
# =====
K = 0.027337
tau = 0.564604
to = 14.212303
alfa = 0.1      # Para el filtro N = 10

# Crear la función de transferencia de primer orden G(s) = K /
(tau*s + 1)
num = [K]
den = [tau, 1]
G_orden1 = ct.tf(num, den)

# Aproximación de Padé para el tiempo muerto e^{-to*s}
# Usamos orden 1 como en tu fórmula: (1 - 0.5*to*s) / (1 + 0.5*to*s)
num_pade, den_pade = ct.pade(to, n=1)
G_pade = ct.tf(num_pade, den_pade)

# Función de Transferencia Completa Experimental

```

```

G_p = ct.series(G_orden1, G_pade)

# =====
# 2. CÁLCULO DE VALORES ÚLTIMOS (Kcu y Tu)
# =====
# margin() nos devuelve el Margen de Ganancia (Gm) y la frecuencia
# de fase -180 (wpc)
gm, pm, wpc, wg = ct.margin(G_p)

Kcu = gm          # La ganancia última es el margen de ganancia
wu = wpc         # Frecuencia última en rad/s
Tu = 2 * np.pi / wu if wu > 0 else 0

# =====
# 3. ALGORITMO DE SINTONIZACIÓN (Z-N 1.7 + Conversión)
# =====
# Forma Serie (Interactivas)
Kc_s = Kcu / 1.7
tauI_s = Tu / 2
tauD_s = Tu / 8

# Conversión a Forma Ideal (Paralela)
Kc_ideal = Kc_s * (1 + (tauD_s / tauI_s))
tauI_ideal = tauI_s + tauD_s
tauD_ideal = (tauI_s * tauD_s) / (tauI_s + tauD_s)

# Constantes Finales
P = Kc_ideal
I = Kc_ideal / tauI_ideal
D = Kc_ideal * tauD_ideal
N = 1 / alfa

# =====
# 4. RESULTADOS
# =====
print("-" * 50)
print(f"VALORES CRÍTICOS (Usando control.pade en Toma 1)")
print("-" * 50)
print(f"Ganancia última (Kcu):           {Kcu:.6f}")
print(f"Periodo último (Tu):                {Tu:.6f} s")
print("-" * 50)
print(f"PARÁMETROS PID (FORMA IDEAL)")
print("-" * 50)
print(f"Proporcional (P):                    {P:.6f}")
print(f"Integral (I):                        {I:.6f} 1/s")
print(f"Derivativo (D):                      {D:.6f} s")

```

```
print(f"Filtro (N): {N:.1f}")
print("-" * 50)
```

- **Código de Graficas de Cv**

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# =====
# DATOS EXPERIMENTALES
# =====
A = np.array([31.25, 40, 50, 60, 75]) # Apertura (%)
Cv_exp = np.array([2.33471004911434, 2.58809326341105,
2.61836454351684,
2.68400133357015, 2.65130070778323])

A_fit = np.linspace(30, 80, 300)

# =====
# MODELOS
# =====
def Cv_lineal(A, a, b):
    return a*A + b

def Cv_lineal_puro(A, a):
    return a*A

def Cv_isoporcentual(A, Cv0, R):
    return Cv0 * R**(A/100)

def Cv_racional(A, a, b, c):
    return a*A/(b + A) + c

# --- NUEVO: APERTURA RÁPIDA (Quick-opening) ---
# Cv = Cvmax * (A/100)^n, con 0 < n < 1 (típico de apertura rápida)
def Cv_apertura_rapida(A, Cvmax, n):
    return Cvmax * (A/100)**n

# =====
# FUNCIÓN R²
# =====
def R2(y, y_hat):
    return 1 - np.sum((y - y_hat)**2) / np.sum((y - np.mean(y))**2)

# =====
# AJUSTES
```

```

# =====
p1, _ = curve_fit(Cv_lineal, A, Cv_exp)
p1b, _ = curve_fit(Cv_lineal_puro, A, Cv_exp)
p2, _ = curve_fit(Cv_isoporcentual, A, Cv_exp, p0=[0.5, 2])

p3, _ = curve_fit(
    Cv_racional,
    A,
    Cv_exp,
    p0=[5, 30, 0],
    bounds=([0, 0, 0], [100, 100, 10]),
    maxfev=10000
)

# --- Ajuste apertura rápida ---
# Suposición inicial:
# Cvmax ~ max(Cv_exp), n ~ 0.5
# Acotamos: Cvmax > 0 ; 0 < n < 1
p4, _ = curve_fit(
    Cv_apertura_rapida,
    A,
    Cv_exp,
    p0=[np.max(Cv_exp), 0.5],
    bounds=([0, 1e-6], [100, 0.999999]),
    maxfev=10000
)

# =====
# PREDICCIONES (para graficar)
# =====
Cv1 = Cv_lineal(A_fit, *p1)
Cv1b = Cv_lineal_puro(A_fit, *p1b)
Cv2 = Cv_isoporcentual(A_fit, *p2)
Cv3 = Cv_racional(A_fit, *p3)
Cv4 = Cv_apertura_rapida(A_fit, *p4)

# =====
# R²
# =====
R2_1 = R2(Cv_exp, Cv_lineal(A, *p1))
R2_1b = R2(Cv_exp, Cv_lineal_puro(A, *p1b))
R2_2 = R2(Cv_exp, Cv_isoporcentual(A, *p2))
R2_3 = R2(Cv_exp, Cv_racional(A, *p3))
R2_4 = R2(Cv_exp, Cv_apertura_rapida(A, *p4))

# =====

```

```

# TEXTO DE ECUACIONES (para gráficas)
# =====
eq1 = rf"$Cv = {p1[0]:.4f}A + {p1[1]:.4f}$" + "\n" + rf"$R^2 = {R2_1:.4f}$"
eq1b = rf"$Cv = {p1b[0]:.4f}A$" + "\n" + rf"$R^2 = {R2_1b:.4f}$"
eq2 = rf"$Cv = {p2[0]:.4f}\, {p2[1]:.4f}^{{A/100}}$" + "\n" + rf"$R^2 = {R2_2:.4f}$"
eq3 = rf"$Cv = \frac{{{p3[0]:.4f}A}}{{{p3[1]:.4f}+A}} + {p3[2]:.4f}$" + "\n" + rf"$R^2 = {R2_3:.4f}$"
eq4 = rf"$Cv = {p4[0]:.4f}\left(\frac{{A}}{{100}}\right)^{{{p4[1]:.4f}}$" + "\n" + rf"$R^2 = {R2_4:.4f}$"

# =====
# GRÁFICAS (ahora 5 subplots)
# =====
plt.figure(figsize=(22,4))

plt.subplot(1,5,1)
plt.plot(A, Cv_exp, 'o')
plt.plot(A_fit, Cv1)
plt.title("Lineal con intercepto")
plt.xlabel("Apertura (%)")
plt.ylabel("Cv")
plt.grid(alpha=0.3)
plt.text(0.05, 0.78, eq1, transform=plt.gca().transAxes,
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8))

plt.subplot(1,5,2)
plt.plot(A, Cv_exp, 'o')
plt.plot(A_fit, Cv1b)
plt.title("Lineal sin intercepto")
plt.xlabel("Apertura (%)")
plt.grid(alpha=0.3)
plt.text(0.05, 0.78, eq1b, transform=plt.gca().transAxes,
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8))

plt.subplot(1,5,3)
plt.plot(A, Cv_exp, 'o')
plt.plot(A_fit, Cv2)
plt.title("Isoporcentual")
plt.xlabel("Apertura (%)")
plt.grid(alpha=0.3)
plt.text(0.05, 0.78, eq2, transform=plt.gca().transAxes,
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8))

```

```

plt.subplot(1,5,4)
plt.plot(A, Cv_exp, 'o')
plt.plot(A_fit, Cv3)
plt.title("Racional (empírico)")
plt.xlabel("Apertura (%)")
plt.grid(alpha=0.3)
plt.text(0.05, 0.78, eq3, transform=plt.gca().transAxes,
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8))

plt.subplot(1,5,5)
plt.plot(A, Cv_exp, 'o')
plt.plot(A_fit, Cv4)
plt.title("Apertura rápida (quick-opening)")
plt.xlabel("Apertura (%)")
plt.grid(alpha=0.3)
plt.text(0.05, 0.78, eq4, transform=plt.gca().transAxes,
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8))

plt.tight_layout()
plt.show()

# =====
# RESUMEN FINAL (como tu código)
# =====
print("\nRESUMEN DE MODELOS AJUSTADOS\n")

print("1) Lineal con intercepto")
print(f"   Cv = {p1[0]:.5f} A + {p1[1]:.5f}")
print(f"   R² = {R2_1:.5f}\n")

print("2) Lineal sin intercepto (puro)")
print(f"   Cv = {p1b[0]:.5f} A")
print(f"   R² = {R2_1b:.5f}\n")

print("3) Isoporcentual")
print(f"   Cv = {p2[0]:.5f} · {p2[1]:.5f}^(A/100)")
print(f"   R² = {R2_2:.5f}\n")

print("4) Racional")
print(f"   Cv = ({p3[0]:.5f} A)/({p3[1]:.5f} + A) + {p3[2]:.5f}")
print(f"   R² = {R2_3:.5f}\n")

print("5) Apertura rápida (quick-opening)")
print(f"   Cv = {p4[0]:.5f} · (A/100)^({p4[1]:.5f})")
print(f"   R² = {R2_4:.5f}\n")

```

```
# Extra útil: verificar condición quick-opening
if p4[1] < 1:
    print(f"Nota: n = {p4[1]:.4f} < 1 → forma cóncava (consistente
con apertura rápida).")
else:
    print(f"Nota: n = {p4[1]:.4f} ≥ 1 → NO sería apertura rápida
(revisar datos/ajuste).")
```

- **Código de Cv y K vs apertura de válvula**

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# --- DATOS DE ENTRADA ---
# Apertura de la válvula en %
apertura = np.array([31.25, 40, 50, 60, 75])

# Valores de Cv (Ejemplo típico para una válvula de globo de 1/2")
# Nota: El Cv máximo para 1/2" suele rondar los 3.0 - 4.5
cv_valores = np.array([2.33471004911434, 2.58809326341105,
2.61836454351684, 2.68400133357015, 2.65130070778323])

# Diámetro de referencia (Válvula de 1/2 pulgada)
# Usaremos 0.622 que es el estándar Schedule 40 para 1/2"
D = 0.622

# --- CÁLCULO DEL COEFICIENTE K ---
# Usamos la fórmula demostrada:  $K = (894 * D^4) / Cv^2$ 
k_valores = (894 * (D**4)) / (cv_valores**2)

# --- GRÁFICA ---
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(10, 6))

# Graficar K vs Apertura
ax1.set_xlabel('Apertura de Válvula (%)')
ax1.set_ylabel('Coeficiente de Pérdida K', color='tab:red')
ax1.plot(apertura, k_valores, color='tab:red', marker='s',
linewidth=2, label='Factor K')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='tab:red')
ax1.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)

# Crear un segundo eje para mostrar el Cv y comparar
ax2 = ax1.twinx()
```

```

ax2.set_ylabel('Coeficiente de Flujo Cv', color='tab:blue')
ax2.plot(apertura, cv_valores, color='tab:blue', marker='o',
linestyle='--', label='Cv')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='tab:blue')

plt.title(f'Análisis de Válvula de 1/2" (D = {D})\nRelación Cv vs
K')
fig.tight_layout()
plt.show()

# Mostrar resultados
print(f"{'Apertura%':<10} | {'Cv':<10} | {'K':<10}")
print("-" * 35)
for a, c, k in zip(apertura, cv_valores, k_valores):
    print(f"{a:<10} | {c:<10.6f} | {k:<10.6f}")

```

- **Código de Curva de ajuste de K**

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# =====
# DATOS EXPERIMENTALES
# =====
apertura = np.array([31.25, 40.0, 50.0, 60.0, 75.0])
K_exp = np.array([24.548963, 19.977411, 19.518158, 18.575204,
19.036236 ])

# =====
# MODELO TEÓRICO PROPUESTO
#  $K = a / (A + b)^2 + c$ 
# =====
def modelo_K(A, a, b, c):
    return a / (A + b)**2 + c

# =====
# AJUSTE DE PARÁMETROS
# =====
p0 = [20000, 10, 15]
params, _ = curve_fit(modelo_K, apertura, K_exp, p0=p0)

a_opt, b_opt, c_opt = params

# =====
# CÁLCULO DE R2

```

```

# =====
K_cal = modelo_K(apertura, a_opt, b_opt, c_opt)

R2 = 1 - np.sum((K_exp - K_cal)**2) / np.sum((K_exp -
np.mean(K_exp))**2)

# =====
# RESULTADOS NUMÉRICOS
# =====
print("Modelo experimental ajustado:")
print(f"K(A) = {a_opt:.2f} / (A + {b_opt:.2f})2 + {c_opt:.2f}")
print(f"Coeficiente de determinación R2 = {R2:.4f}")

# =====
# GRÁFICA
# =====
A_fit = np.linspace(30, 80, 200)
K_fit = modelo_K(A_fit, a_opt, b_opt, c_opt)

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(apertura, K_exp, 'o', label="Datos experimentales",
markersize=7)
plt.plot(A_fit, K_fit, '-', linewidth=2, label=f"Ajuste racional (R2
= {R2:.4f})")

plt.xlabel("Apertura de válvula (%)")
plt.ylabel("Coeficiente de pérdida K")
plt.title("Relación experimental K vs Apertura de válvula")
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.legend()

# Ecuación en la gráfica
ecuacion =
rf"$K(A)=\frac{{{a_opt:.1f}}}{(A+{b_opt:.1f})^2}+{c_opt:.2f}$"
plt.text(
    0.05, 0.95,
    ecuacion,
    transform=plt.gca().transAxes,
    fontsize=13,
    verticalalignment='top',
    bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.85)
)

plt.show()

```

- **Código de Curva de ajuste de K (por definición)**

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# =====
# DATOS EXPERIMENTALES MEDIDOS
# =====
apertura = np.array([31.25, 40, 50, 60, 75])

Q_Lmin = np.array([
    27.62785714,
    28.92078095,
    28.88104762,
    28.934,
    28.82584127
])

DeltaP_psi = np.array([
    9.77241871,
    8.714325061,
    8.490616608,
    8.110078689,
    8.249347046
])

# =====
# CONVERSIÓN DE UNIDADES (SI)
# =====
Q = Q_Lmin * 1e-3 / 60      # m³/s
DeltaP = DeltaP_psi * 6894.76 # Pa

# =====
# PARÁMETROS DEL SISTEMA
# =====
rho = 1000      # kg/m³ (agua)
D = 0.0158     # m (1/2" Schedule 40)

# =====
# CÁLCULO DE K DESDE ECUACIONES BASE
#  $K = (\Delta P \pi^2 D^4) / (8 \rho Q^2)$ 
# =====
K_exp = (DeltaP * np.pi**2 * D**4) / (8 * rho * Q**2)

# =====
# MODELO EXPERIMENTAL PROPUESTO
#  $K = a / (A + b)^2 + c$ 

```

```

# =====
def modelo_K(A, a, b, c):
    return a / (A + b)**2 + c

# =====
# AJUSTE DE PARÁMETROS
# =====
p0 = [20000, 10, 15] # valores iniciales
params, _ = curve_fit(modelo_K, apertura, K_exp, p0=p0)

a_opt, b_opt, c_opt = params

# =====
# CÁLCULO DE R2
# =====
K_cal = modelo_K(apertura, a_opt, b_opt, c_opt)
R2 = 1 - np.sum((K_exp - K_cal)**2) / np.sum((K_exp -
np.mean(K_exp))**2)

# =====
# RESULTADOS NUMÉRICOS
# =====
print("Modelo experimental ajustado:")
print(f"K(A) = {a_opt:.2f} / (A + {b_opt:.2f})2 + {c_opt:.2f}")
print(f"Coeficiente de determinación R2 = {R2:.4f}\n")

print(f"{'Apertura (%)':>12} | {'K experimental':>15}")
print("-"*32)
for a, k in zip(apertura, K_exp):
    print(f"{a:12.2f} | {k:15.4f}")

# =====
# GRÁFICA
# =====
A_fit = np.linspace(30, 80, 300)
K_fit = modelo_K(A_fit, a_opt, b_opt, c_opt)

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(apertura, K_exp, 'o', markersize=7, label="K experimental")
plt.plot(A_fit, K_fit, '-', linewidth=2,
        label=f"Ajuste experimental (R2 = {R2:.4f})")

plt.xlabel("Apertura de válvula (%)")
plt.ylabel("Coeficiente de pérdida K (-)")
plt.title("Relación experimental K vs Apertura de válvula")
plt.grid(True, alpha=0.3)

```

```
plt.legend()

ecuacion =
rf"$K(A)=\frac{{{a_opt:.1f}}}{(A+{b_opt:.1f})^2}+{c_opt:.2f}$"
plt.text(
    0.05, 0.95,
    ecuacion,
    transform=plt.gca().transAxes,
    fontsize=13,
    verticalalignment='top',
    bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.85)
)

plt.tight_layout()
plt.show()
```

- **Código de Curva de Calibración (Toma 1)**

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.metrics import r2_score

# 1. Definir los datos
apertura = np.array([31.35, 40, 50, 60, 75])
caudal_sim = np.array([10, 20, 30, 40, 50])
caudal_exp = np.array([9.55, 18.40, 31.44, 41.4, 51.4])

# 2. Calcular la regresión lineal para los datos experimentales
(Grado 1)
# m = pendiente, b = intercepto
m, b = np.polyfit(apertura, caudal_exp, 1)

# 3. Predecir valores para la línea de tendencia
caudal_predicho = m * apertura

# 4. Calcular el coeficiente de determinación R^2
r_cuadrado = r2_score(caudal_exp, caudal_predicho)

# 5. Crear la gráfica
plt.figure(figsize=(10, 6))

# Dibujar puntos de datos
plt.scatter(apertura, caudal_sim, color='blue', label='Simulación',
marker='o')
plt.scatter(apertura, caudal_exp, color='red',
label='Experimentación', marker='s')
```

```

# Dibujar línea de tendencia experimental
plt.plot(apertura, caudal_predicho, color='darkred', linestyle='--',
         label=f'Ajuste Exp: y = {m:.3f}x {b:.3f}')

# Configuración de etiquetas
plt.title('Curva de Calibración: Apertura de Válvula vs Caudal',
         fontsize=14)
plt.xlabel('Apertura de Válvula (%)', fontsize=12)
plt.ylabel('Caudal de Flujo (L/min)', fontsize=12)
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)
plt.legend()

# Mostrar R^2 en la gráfica
plt.text(35, 45, f'$R^2 = {r_cuadrado:.4f}$', fontsize=12,
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.5))

plt.show()

# Imprimir resultados en consola
print(f"Ecuación de la recta experimental: y = {m:.4f}x +
      ({b:.4f})")
print(f"Coeficiente R²: {r_cuadrado:.4f}")

```

- **Código de respuesta del controlador (a SP = 9 L/min)**

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Leer y procesar el archivo
file_path = 'Prueba SP 9.txt'
data = []

try:
    with open(file_path, 'r') as f:
        for line in f:
            if line.strip():
                parts = line.strip().split(',')
                row = {p.split(':')[0]: float(p.split(':')[1]) for p
in parts}
                data.append(row)
except FileNotFoundError:
    print(f"Error: No se encontró el archivo '{file_path}'")
    exit()

df = pd.DataFrame(data)

```

```

# --- PLANO 1: Gráfica de Flujo y Set Point ---
plt.figure(num="Control de Flujo", figsize=(10, 5))
plt.plot(df['T'], df['SP'], label='Set Point (SP)', color='red',
linestyle='--', linewidth=2)
plt.plot(df['T'], df['Flujo'], label='Flujo Real', color='blue',
marker='o', markersize=4)
plt.title('Respuesta del Sistema: Flujo vs Tiempo')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Caudal (l/min)')
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.legend()

# --- PLANO 2: Gráfica de Apertura ---
plt.figure(num="Acción de Válvula", figsize=(10, 5))
plt.plot(df['T'], df['Apertura'], label='Apertura de Válvula',
color='green', linewidth=2)
plt.title('Acción del Controlador: Apertura vs Tiempo')
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Apertura (%)')
plt.ylim(0, 100) # Rango de 0 a 100%
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.legend()

# Mostrar ambas ventanas
plt.show()

```

### Código de Método ANOVA

```

import numpy as np
import pandas as pd
from scipy import stats

# =====
# ANOVA: Caudal (L/min) vs Apertura (%)
# Datos: 3 mediciones por cada apertura (según tu tabla)
# =====

datos = {
    "31.25%": [27.69228571, 27.74457143, 27.37857143],
    "40.00%": [28.82285714, 28.99457143, 28.88285714],
    "50.00%": [28.89057143, 28.98914286, 28.95857143],
    "60.00%": [28.96171429, 28.81085714, 28.90285714],
    "75.00%": [29.00028571, 28.77171429, 28.86914286],
}

```

```

# -----
# 1) DataFrame para visualizar y exportar si quieres
# -----
df = pd.DataFrame(datos)
print("\nDatos de caudal (L/min) por apertura (%):")
print(df)
print("\nResumen estadístico por apertura:")
resumen = pd.DataFrame({
    "Media (L/min)": df.mean(),
    "Desv.Est (L/min)": df.std(ddof=1),
    "n": df.count()
})
print(resumen)

# -----
# 2) ANOVA de una vía (scipy.stats.f_oneway)
# H0: todas las medias son iguales
# H1: al menos una media es diferente
# -----
grupos = [df[col].dropna().values for col in df.columns]
F_stat, p_value = stats.f_oneway(*grupos)

print("\n=====")
print("ANOVA de una vía (Apertura vs Caudal)")
print("=====")
print(f"Estadístico F = {F_stat:.6f}")
print(f"p-value      = {p_value:.10e}")

# -----
# 3) Tamaño de efecto: eta-cuadrado ( $\eta^2$ )
#  $\eta^2 = SS_{\text{between}} / SS_{\text{total}}$ 
# -----
all_values = np.concatenate(grupos)
grand_mean = np.mean(all_values)

# SS_total
SS_total = np.sum((all_values - grand_mean)**2)

# SS_between
SS_between = 0.0
for g in grupos:
    SS_between += len(g) * (np.mean(g) - grand_mean)**2

eta2 = SS_between / SS_total if SS_total != 0 else np.nan
print(f"Eta-cuadrado ( $\eta^2$ ) = {eta2:.6f}")

```

```

# -----
# 4) Interpretación automática
# -----
alpha = 0.05
print("\nInterpretación (alpha = 0.05):")
if p_value < alpha:
    print("☑ Se RECHAZA H0: hay diferencias significativas entre
aperturas.")
    print("   Conclusión: la apertura de la válvula SÍ afecta el
caudal.")
else:
    print("✗ NO se rechaza H0: no se detectan diferencias
significativas.")
    print("   Conclusión: no hay evidencia estadística de efecto de
apertura.")

# -----
# 5) (Opcional) Verificación de supuestos básicos
# Normalidad por grupo (Shapiro-Wilk) y homogeneidad (Levene)
# OJO: con n=3 por grupo estas pruebas tienen poca potencia,
# pero se reportan como referencia académica.
# -----
print("\n=====")
print("Chequeo de supuestos (referencial)")
print("=====")

print("\nNormalidad (Shapiro-Wilk) por grupo:")
for col in df.columns:
    g = df[col].dropna().values
    if len(g) >= 3: # Shapiro requiere al menos 3 datos
        W, p_shapiro = stats.shapiro(g)
        print(f"{col:>7} -> W={W:.4f}, p={p_shapiro:.4f}")
    else:
        print(f"{col:>7} -> No aplica (n<3)")

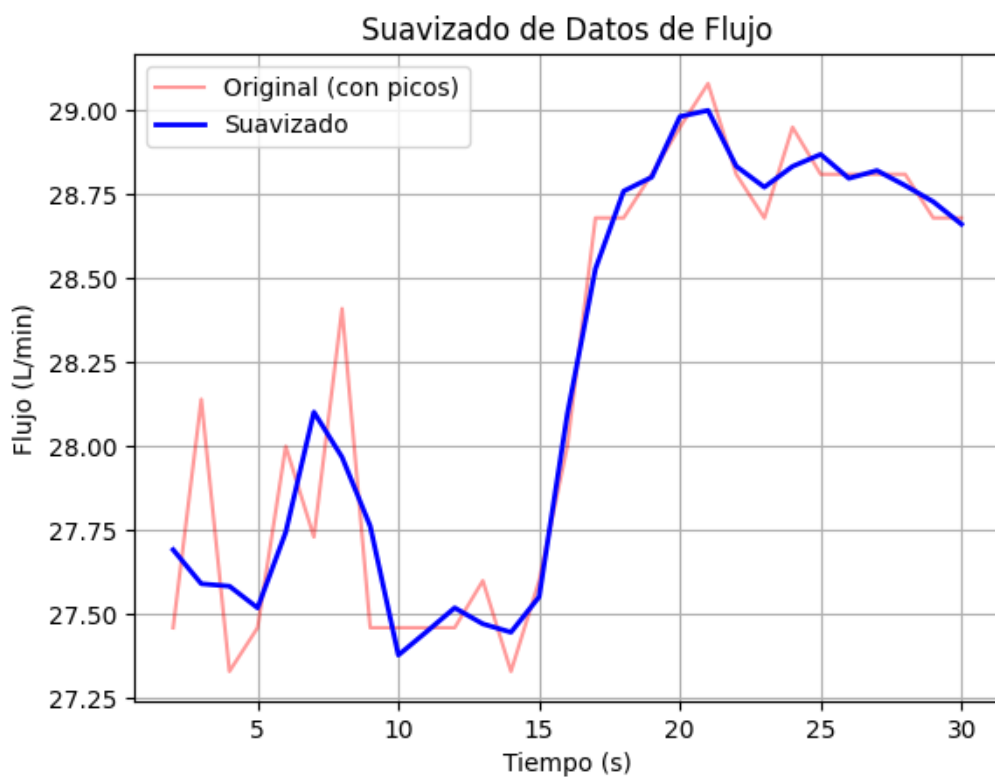
# Homogeneidad de varianzas (Levene)
stat_lev, p_lev = stats.levene(*grupos, center='median')
print(f"\nHomogeneidad (Levene, mediana): stat={stat_lev:.6f},
p={p_lev:.6f}")

# Nota para reporte
print("\nNota:")
print("- Con n=3 por apertura, el ANOVA funciona, pero conviene
aumentar réplicas")
print(" para fortalecer el poder estadístico y el chequeo de
supuestos.")

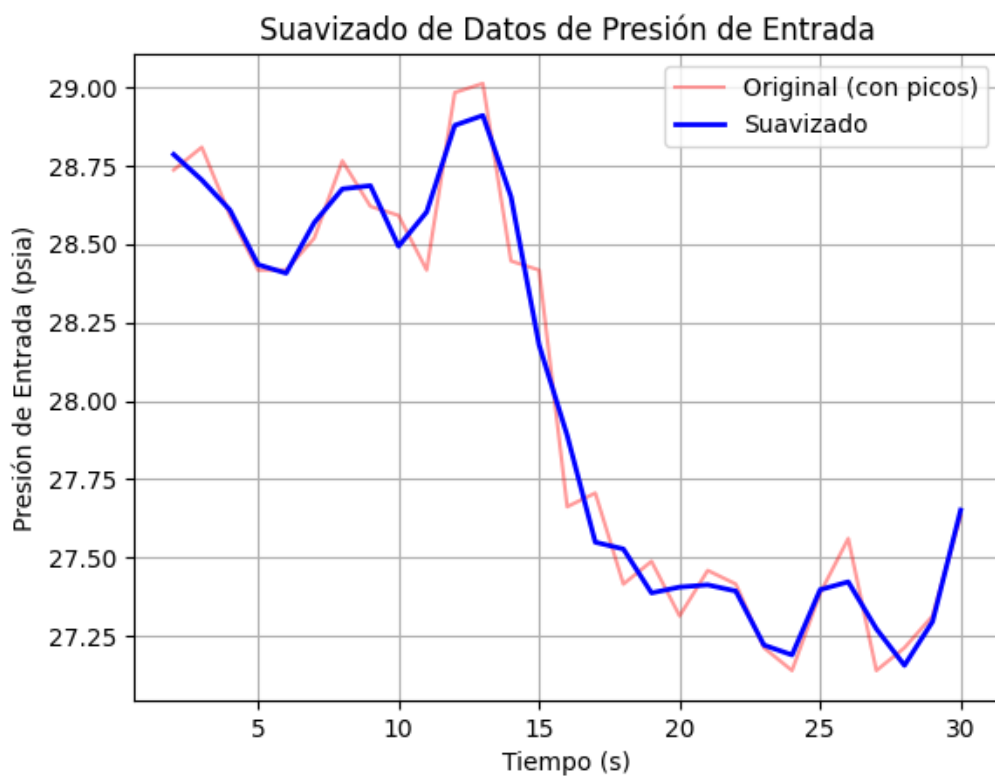
```

**Apéndice D**  
**Resultados de la limpieza de datos**

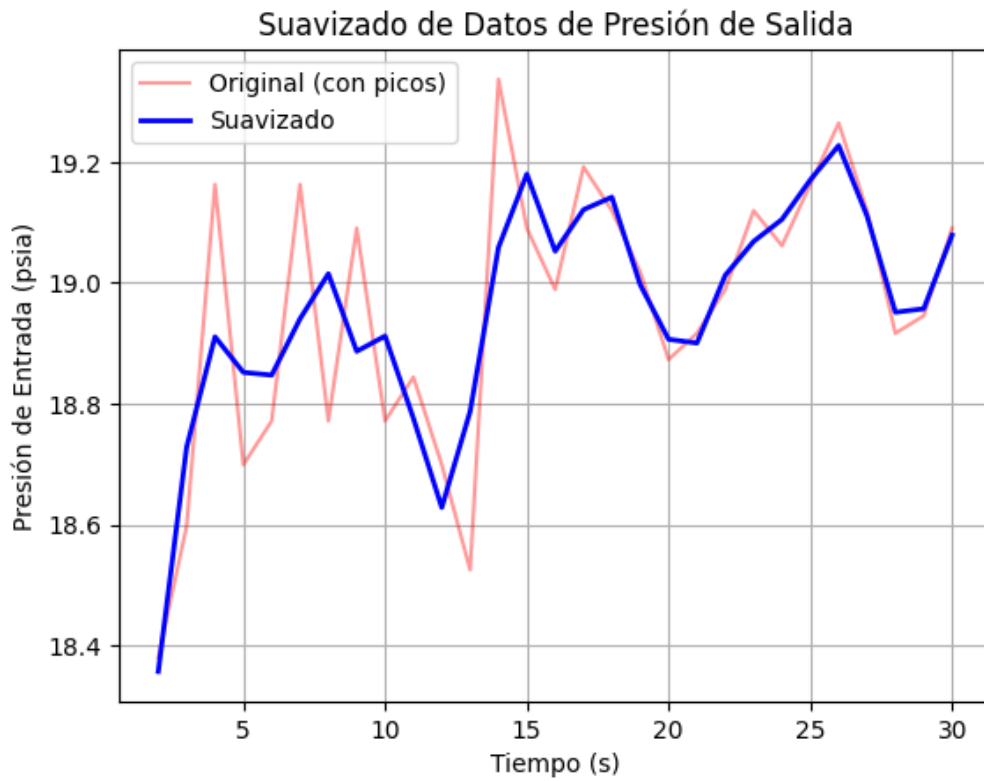
### Gráfica de datos suavizados de flujo (Toma 1)



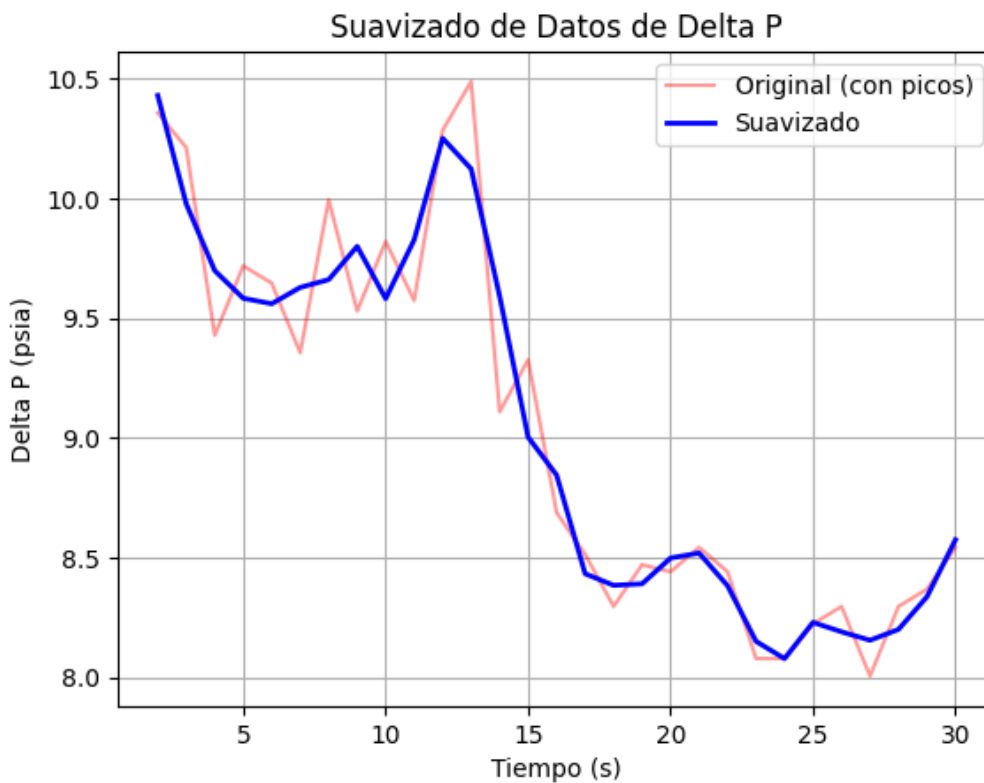
### Gráfica de datos suavizados de Presión de Entrada (Toma 1)

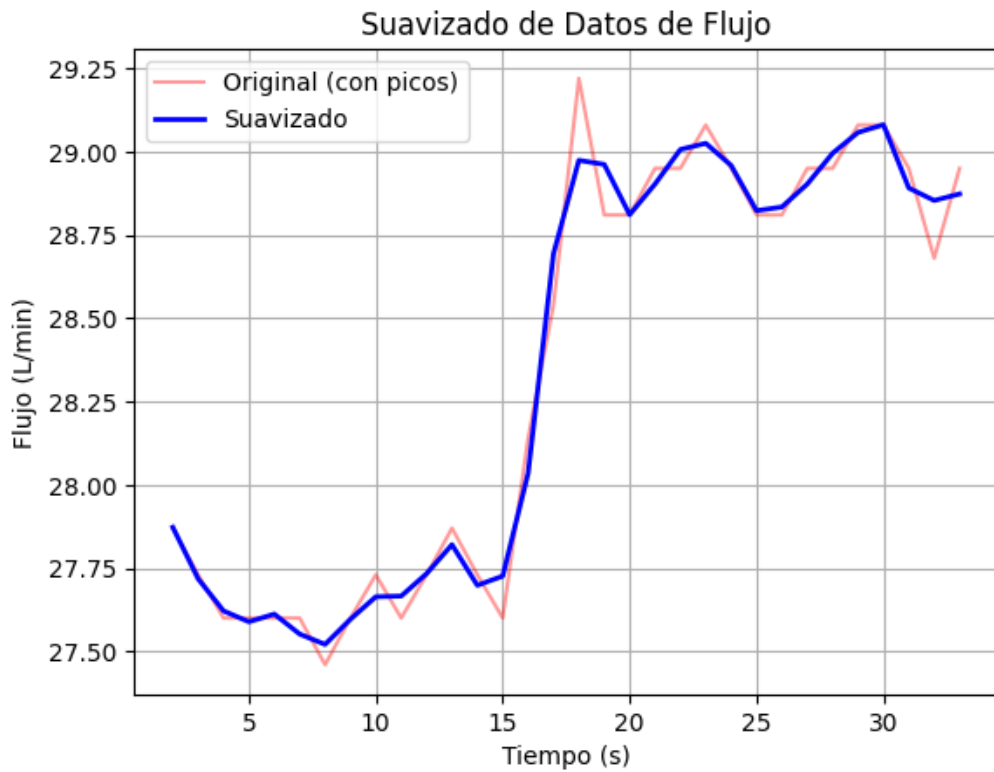
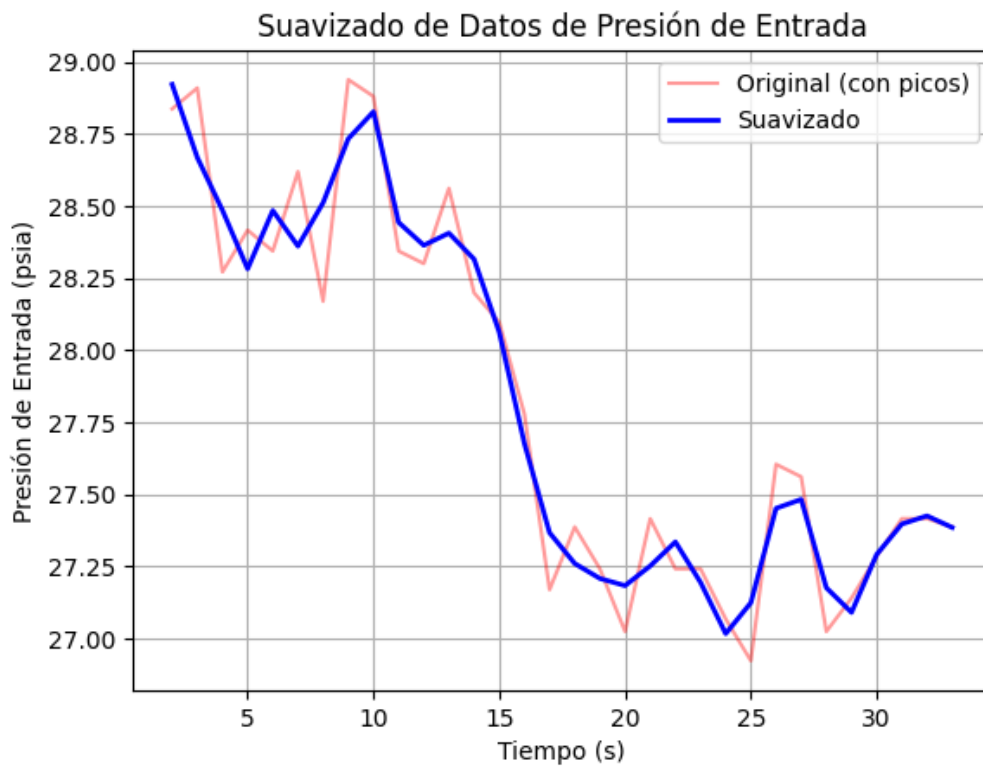


**Gráfica de datos suavizados de Presión de Salida (Toma 1)**

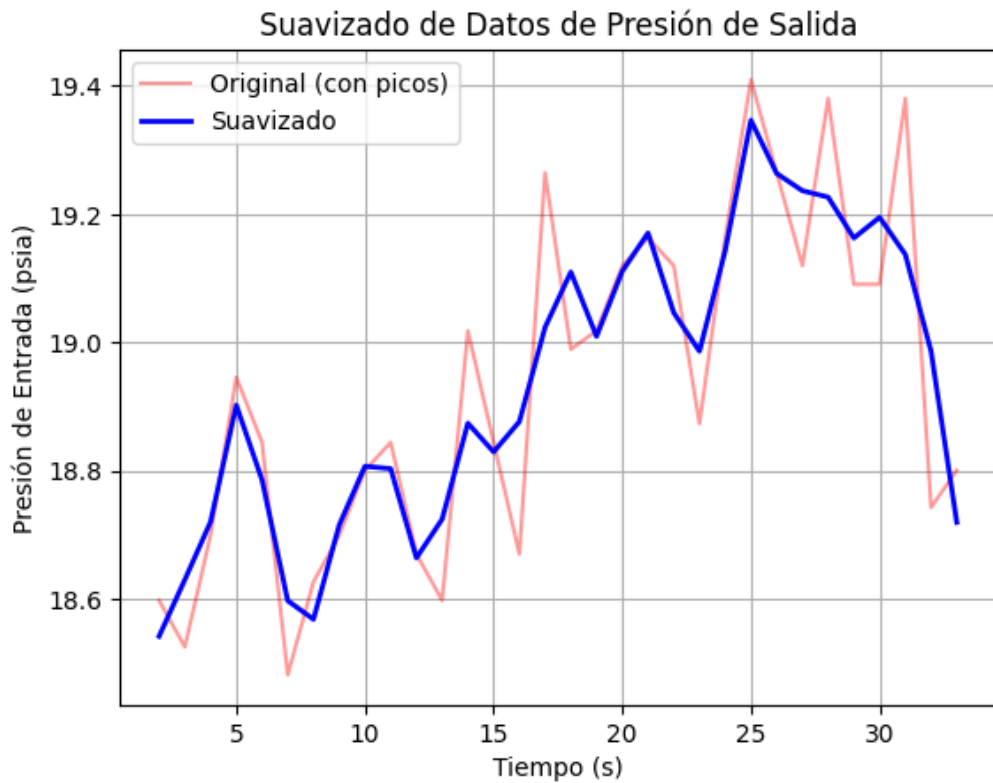


**Gráfica de datos suavizados de Caída de Presión de Salida (Toma 1)**

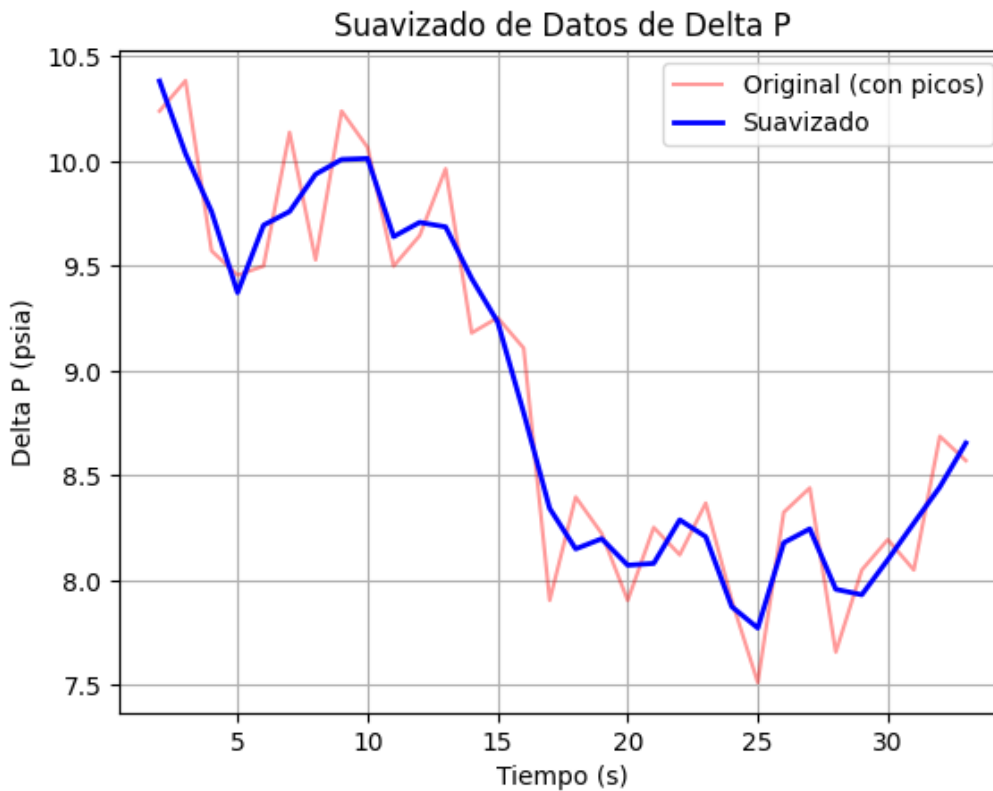


**Gráfica de datos suavizados de flujo (Toma 2)****Gráfica de datos suavizados de Presión de Entrada (Toma 2)**

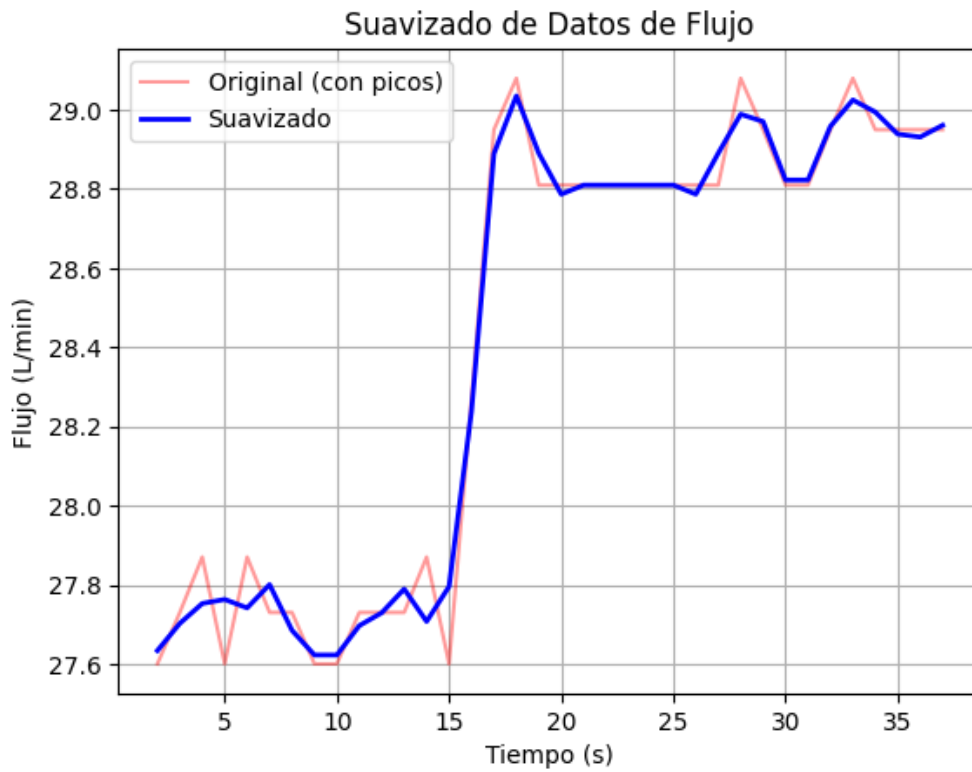
**Gráfica de datos suavizados de Presión de Salida (Toma 2)**



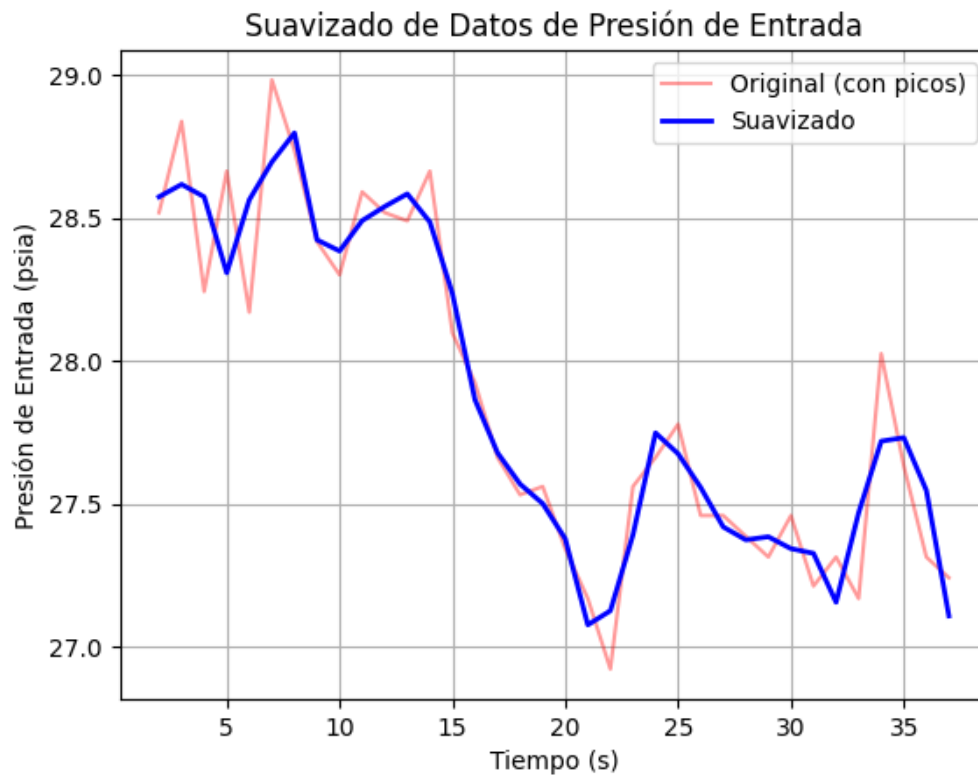
**Gráfica de datos suavizados de Caída de Presión de Salida (Toma 2)**



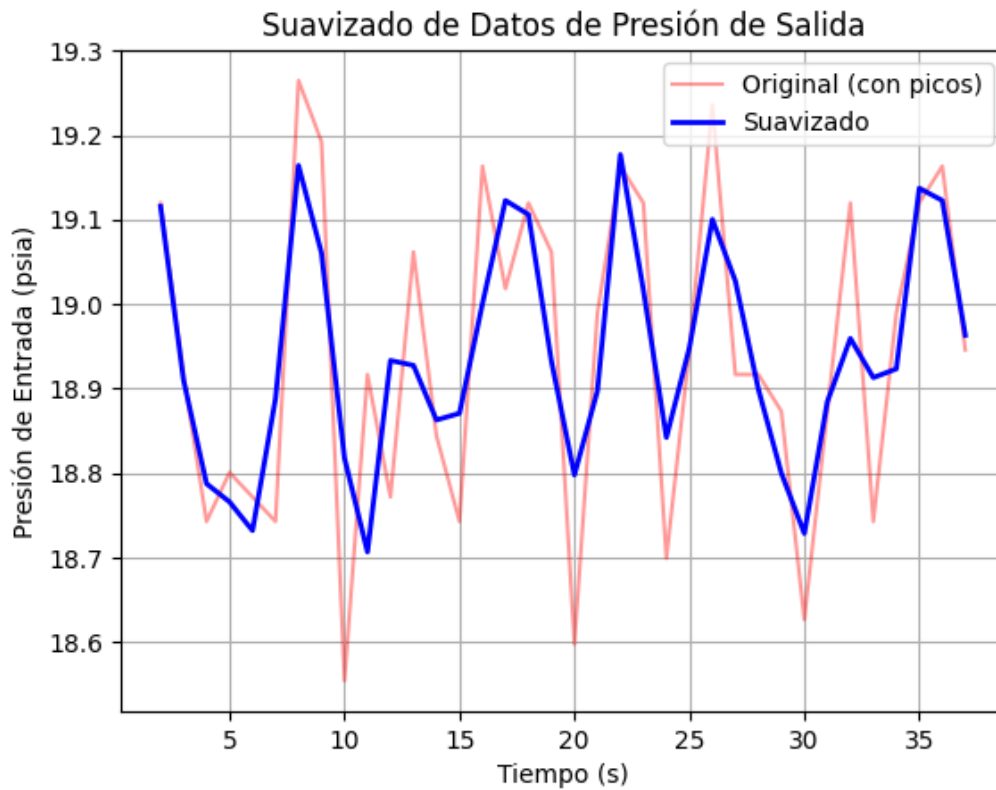
### Gráfica de datos suavizados de flujo (Toma 3)



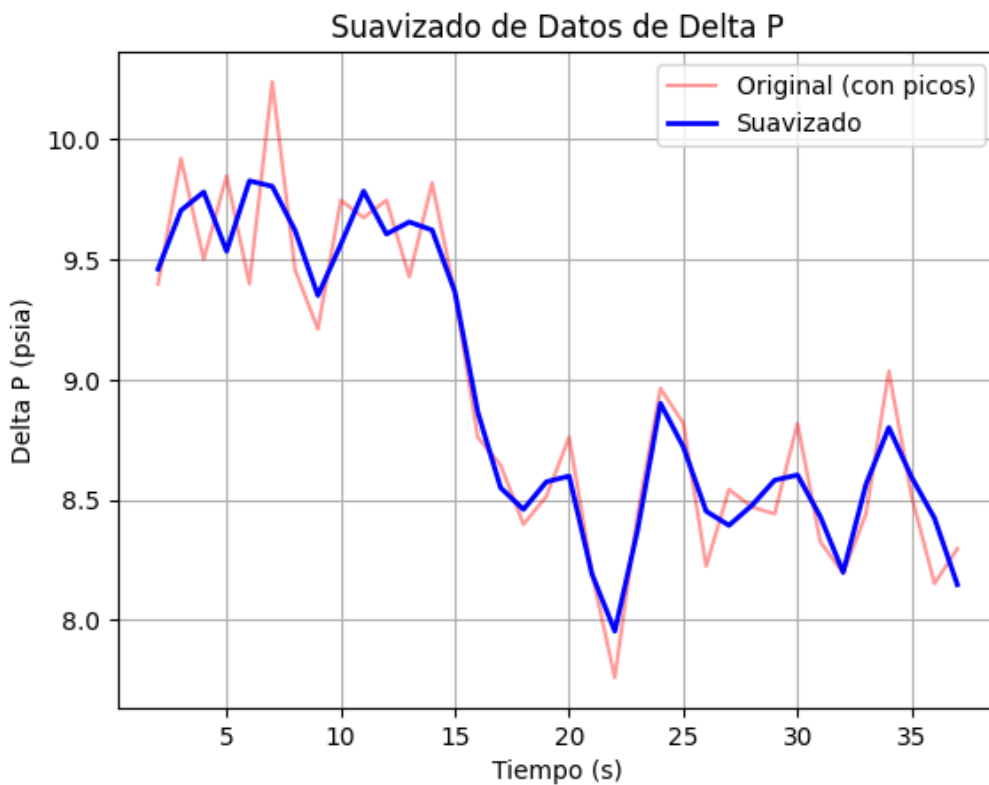
### Gráfica de datos suavizados de Presión de Entrada (Toma 3)

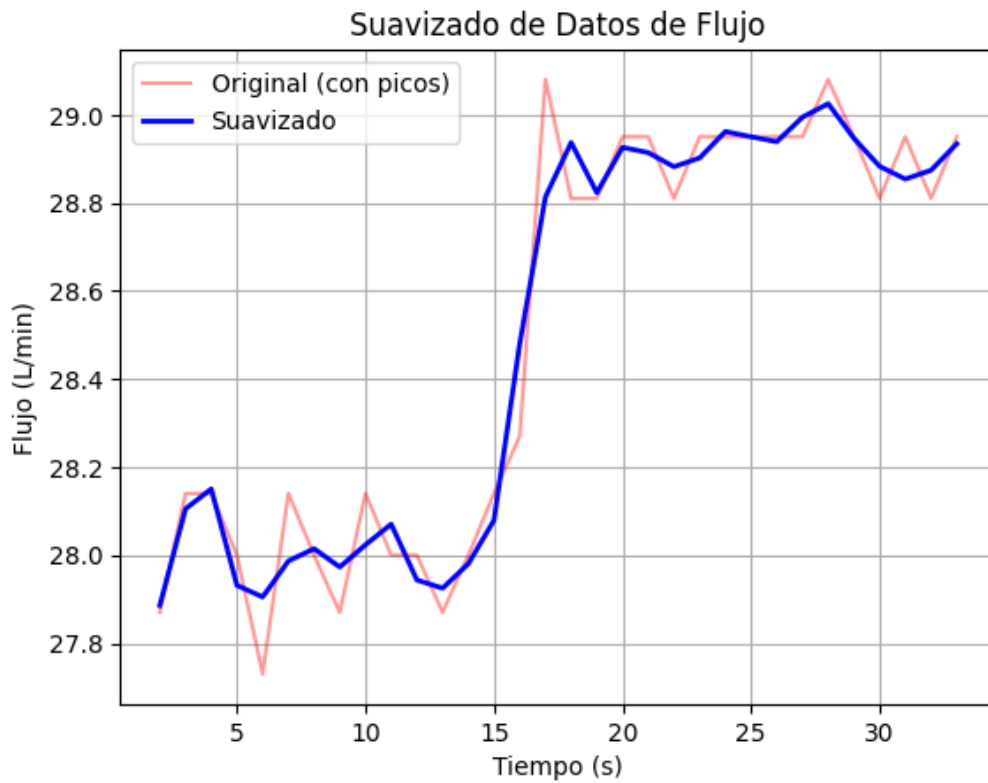
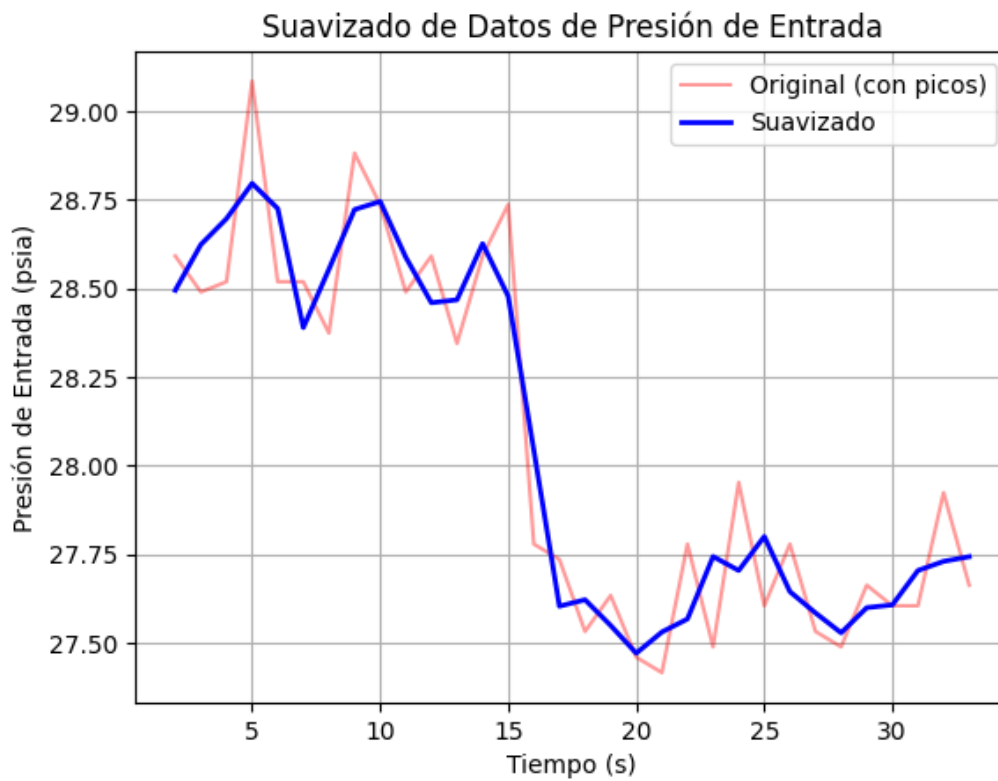


**Gráfica de datos suavizados de Presión de Salida (Toma 3)**

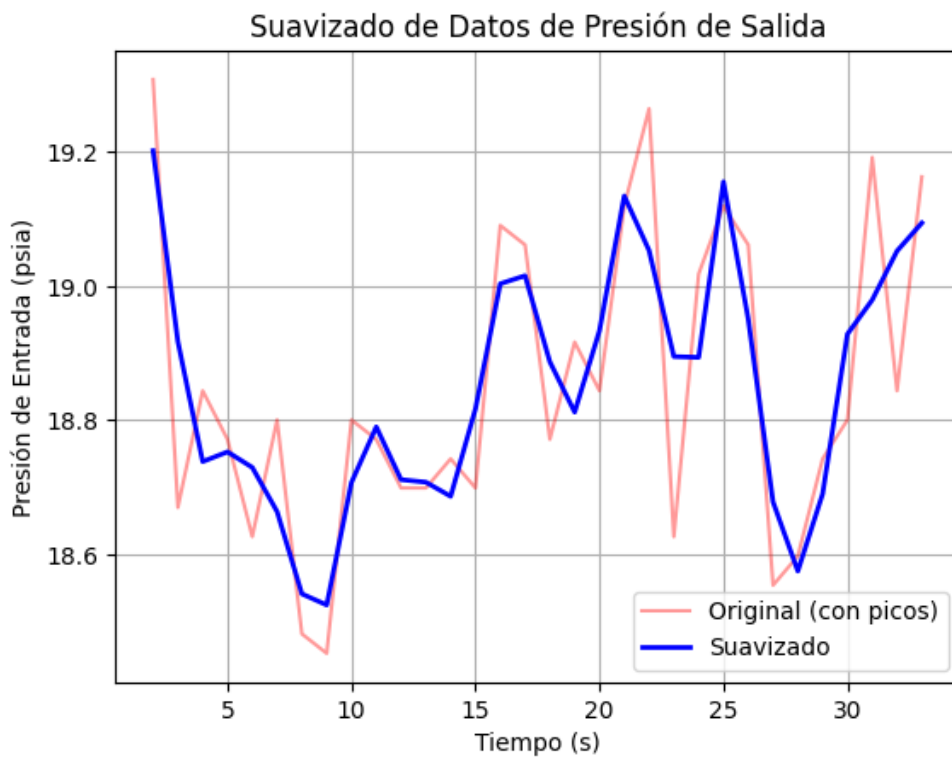


**Gráfica de datos suavizados de Caída de Presión de Salida (Toma 3)**

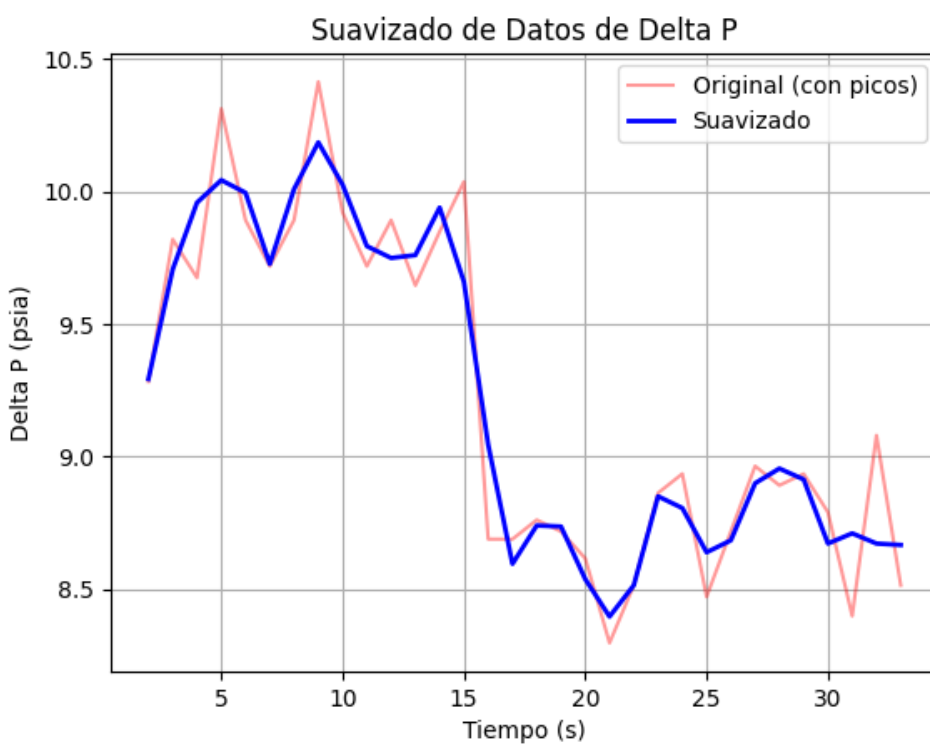


**Gráfica de datos suavizados de flujo (Toma 4)****Gráfica de datos suavizados de Presión de Entrada (Toma 4)**

### Gráfica de datos suavizados de Presión de Salida (Toma 4)

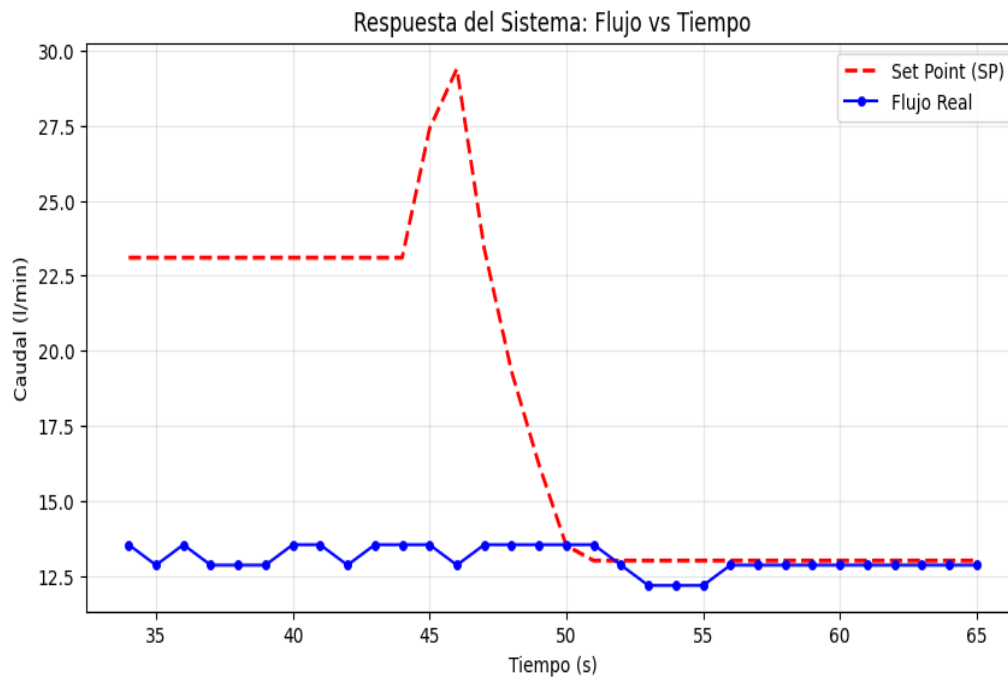


### Gráfica de datos suavizados de Caída de Presión de Salida (Toma 4)

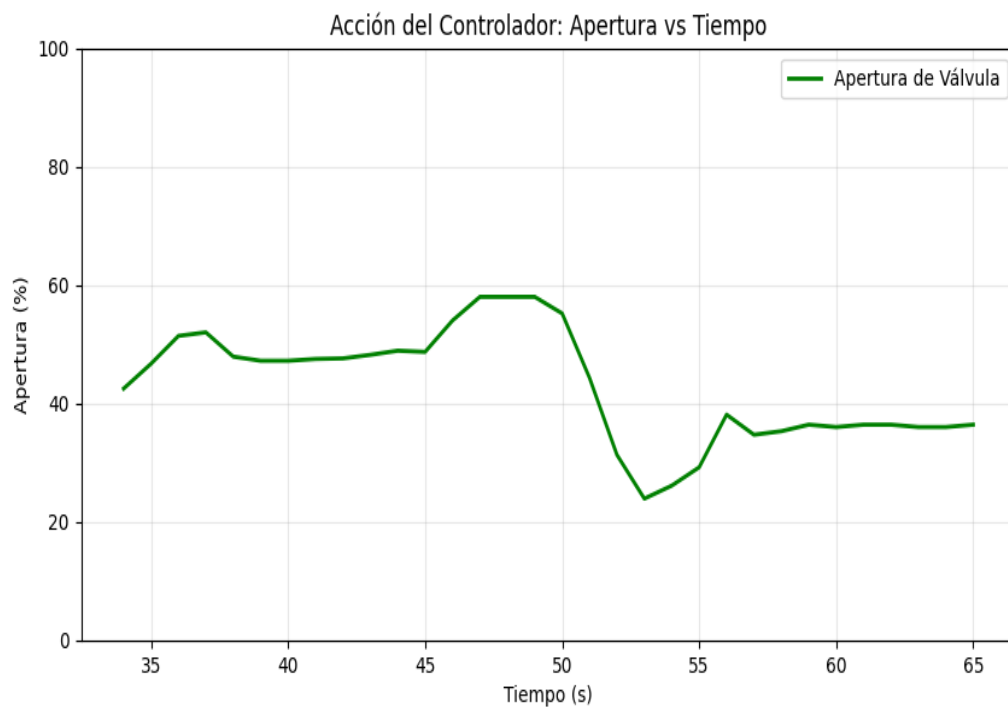


**Apéndice E**  
**Respuesta del controlador**

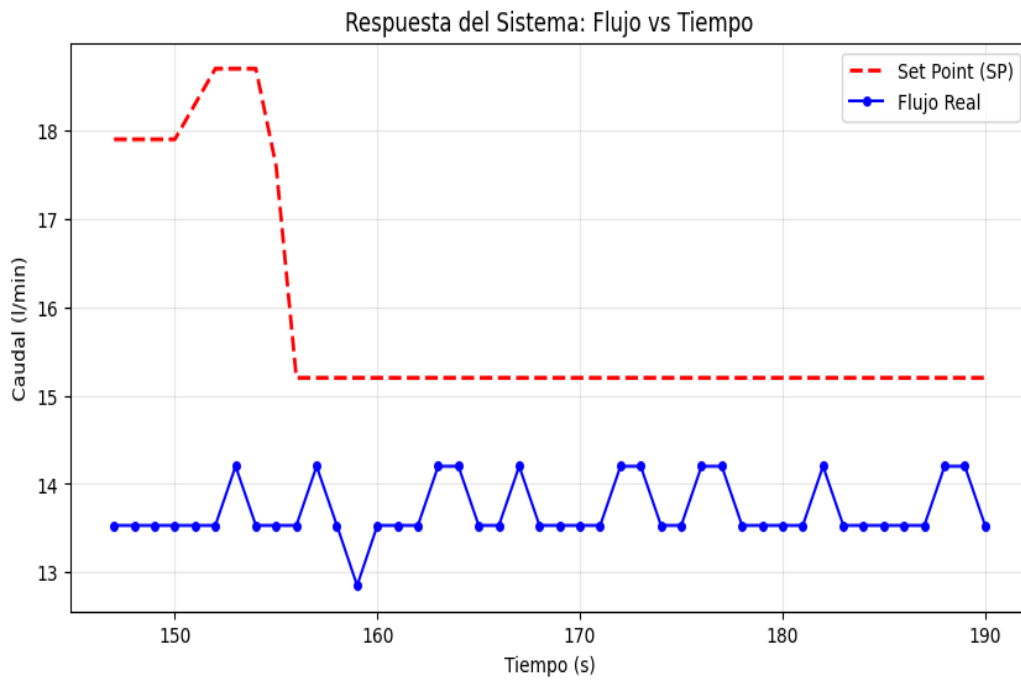
### Gráfica de respuesta del controlador a un set point de 13 L/min



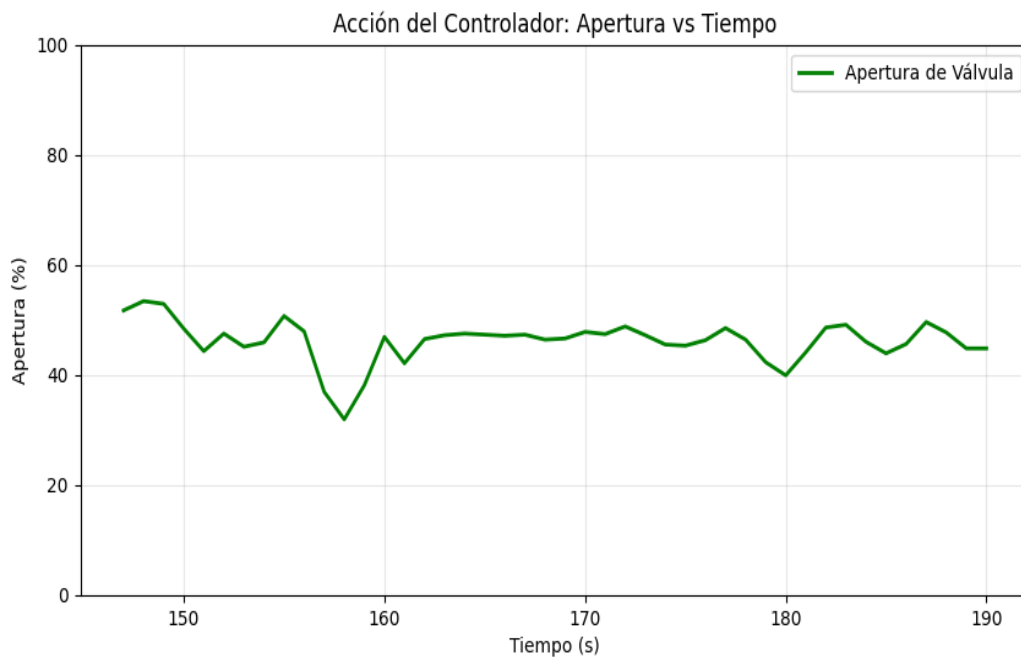
### Gráfica de respuesta del controlador a un set point de 13 L/min (Apertura de Válvula)



### Gráfica de respuesta del controlador a un set point de 15.2 L/min



### Gráfica de respuesta del controlador a un set point de 15.2 L/min (Apertura de Válvula)



**Apéndice F**  
**Demostraciones y manual**

## Manual de prácticas del equipo

	<b>Prácticas de Laboratorio de Dinámica y Control de Procesos</b>	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
---	---	---

### Práctica 1: “Caracterización estática de una válvula de globo en un sistema hidráulico automatizado”

1. **Objetivo de la práctica:** Determinar experimentalmente el coeficiente de válvula ( $C_v$ ) y el coeficiente de pérdida ( $K$ ) de una válvula de globo instalada en un sistema hidráulico automatizado, a partir de la medición del caudal, la caída de presión y el grado de apertura de la válvula, operando el sistema en régimen permanente.
2. **Alcance y duración de la práctica:** A presente práctica ha sido diseñada para ejecutarse dentro de una sesión corta de laboratorio, considerando criterios de eficiencia energética, uso académico del equipo y optimización del tiempo experimental.

#### Tiempo máximo de operación del equipo encendido: 7,5 minutos

Las explicaciones teóricas, revisión de conceptos, instrucciones del docente y preparación de hojas de registro se realizan con el equipo apagado y no forman parte del tiempo de operación considerado

### 3. Fundamento teórico resumido:

En condiciones de flujo permanente, el comportamiento de una válvula de control puede caracterizarse mediante el coeficiente de válvula  $C_v$ , el cual relaciona el caudal que atraviesa la válvula con la caída de presión asociada. Para un fluido incompresible como el agua, el coeficiente  $C_v$  se define como:

$$C_v = \frac{Q}{\Delta P^{0.5}}$$

donde:

- $Q$  es el caudal volumétrico (gpm),
- $\Delta P$  es la caída de presión en la válvula (psi).

Por otro lado, el coeficiente de pérdida  $K$  representa las pérdidas locales de energía introducidas por la válvula y se obtiene directamente a partir de su definición hidráulica, derivada de la ecuación de Bernoulli con pérdidas menores:

$$K = \frac{\Delta P}{0.5\rho v^2}$$

donde:

- $\Delta P$  es la caída de presión en la válvula (Pa),
- $\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),
- $v$  es la velocidad media del fluido en la sección de paso.

La velocidad del fluido se determina a partir del caudal volumétrico:

$$v = \frac{Q}{A}$$

siendo el  $A$  área transversal interna de la válvula:

$$A = \frac{\pi D^4}{4}$$

donde  $D$  es el diámetro interno de la válvula.

#### 4. Seguridad

Antes y durante la ejecución de la práctica, se deben cumplir las siguientes normas de seguridad:

- Verificar que todas las conexiones hidráulicas estén correctamente ajustadas.
- No ejecutar movimientos bruscos de apertura o cierre de la válvula.
- Mantener un lubricado correcto el acople hexagonal del mecanismo de la válvula.
- Evitar el contacto directo con partes eléctricas energizadas (Arduino, driver y motor).
- Tener precaución con el uso de las mangueras, ya que el flujo de agua puede generar salpicaduras.
- No superar los rangos de presión establecidos para el sistema hidráulico.

- Cumplir las normas generales del laboratorio de la ESPOL.

## 5. Materiales, equipos y software

### Equipos y materiales

- Bomba hidráulica
- Válvula de globo de ½”
- Motor paso a paso con driver
- Sensor de caudal
- Sensores de presión (entrada y salida)
- Tuberías y accesorios de PVC

### Equipos electrónicos

- Tarjeta Arduino
- Computador

### Software

- Arduino IDE
- Excel
- Python (procesamiento de datos)

## 6. Procedimiento experimental

### 6.1 Actividades previas (equipo apagado)

1. Escuchar la explicación del docente sobre el objetivo de la práctica.
2. Revisar las ecuaciones utilizadas para el cálculo de  $C_v$  y  $K$ .
3. Preparar las tablas de registro de datos.
4. Verificar de forma visual el estado del sistema hidráulico.

**Nota:** Estas actividades no implican consumo energético.

### 6.2 Ejecución experimental (equipo encendido – máximo 7,5 min)

1. Colocar la válvula en una apertura inicial baja ( $\approx 31,25\%$ ).
2. Encender la bomba hidráulica del sistema.
3. Esperar aproximadamente en un rango de 30–40 s hasta que el sistema alcance régimen permanente.
4. Registrar los siguientes datos:
  - Apertura de la válvula (%)
  - Caudal (L/min)
  - Presión de entrada (MPa)

- Presión de salida (MPa)
5. Repetir el procedimiento para los siguientes niveles de apertura:
    - 40 %
    - 50 %
    - 60 %
    - 75 %
  6. Para cada condición, realizar una medición estable, prevaleciendo rapidez y consistencia.

### 7. Registro de datos experimentales

Apertura (%)	Caudal (L/min)	Presión entrada (MPa)	Presión salida (MPa)

### 8. Cálculos solicitados

- a. Calcular la caída de presión en la válvula:

$$\Delta P = P_{\text{entrada}} - P_{\text{salida}}$$

- b. Convertir el caudal a unidades del SI (m<sup>3</sup>/s).
- c. Calcular el área transversal interna de la válvula:

$$A = \frac{\pi D^4}{4}$$

- d. Calcular la velocidad media del fluido:

$$v = \frac{Q}{A}$$

- e. Calcular el coeficiente de pérdida K por definición directa:

$$K = \frac{\Delta P}{0.5\rho v^2}$$

- f. Calcular el coeficiente de válvula Cv:

$$Cv = \frac{Q}{\Delta P^{0.5}}$$

## 9. Resultados a presentar

El estudiante deberá entregar:

- Tabla de valores de **C<sub>v</sub>**
- Tabla de valores de **K**
- Gráfica **Apertura vs Caudal**
- Gráfica **C<sub>v</sub> vs Apertura**
- Gráfica **K vs Apertura**

## 10. Preguntas de análisis

- ¿Cómo varía el coeficiente de pérdida K con el aumento de la apertura de la válvula?
- ¿Por qué el coeficiente K disminuye a medida que aumenta el área efectiva de paso?
- ¿El comportamiento experimental de K es coherente con la teoría de pérdidas locales?
- ¿Qué factores experimentales pueden influir en la precisión del cálculo de K?

### **Práctica 2: “Identificación dinámica y control PID del caudal en un sistema hidráulico automatizado”**

1. **Objetivo de la práctica:** Analizar de forma experimental la respuesta dinámica del caudal en un sistema hidráulico automatizado mediante experimentos de respuesta al escalón en la apertura de la válvula. Identificar un modelo dinámico de primer orden con tiempo muerto (FOPDT) que represente el comportamiento del sistema a analizar. Evaluar de manera cualitativa el desempeño de un controlador PID en la regulación del caudal.
2. **Alcance y duración de la práctica:** La presente práctica ha sido diseñada para ejecutarse dentro de una sesión corta de laboratorio, considerando criterios de eficiencia energética, uso académico del equipo y optimización del tiempo experimental.  
 Tiempo máximo de operación del equipo encendido: 7,5 minutos  
 Las explicaciones teóricas, revisión de conceptos, instrucciones del docente y preparación de hojas de registro se realizan con el equipo apagado y no forman parte del tiempo de operación considerado.  
 Tiempo máximo de operación del equipo encendido: 7,5 minutos  
 Las explicaciones de la teoría, revisión de conceptos, instrucciones dadas por el docente y preparación de hojas de registro se realizan con el equipo apagado y no forman parte del tiempo de operación considerado

### 3. Fundamento teórico resumido: (Haga un listado con lo empleado en la práctica).

En el análisis dinámico de sistemas de procesos, el comportamiento en el tiempo de una variable puede estudiarse por medio de ensayos de respuesta al escalón, los cuales permiten la caracterización de la dinámica del sistema ante cambios en la variable manipulada.

En sistemas hidráulicos, la relación dinámica entre el caudal y la apertura de la válvula puede aproximarse mediante un modelo de primer orden con tiempo muerto (FOPDT), cuya función de transferencia se expresa como:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_0 s}$$

donde:

- K es la ganancia del proceso,
- $\tau$  es la constante de tiempo,
- $t_0$  es el tiempo muerto del sistema.

Este tipo de modelo se usa frecuentemente en el diseño y la sintonización de controladores de tipo PID, debido a que permite la obtención de parámetros dinámicos representativos por medio de datos experimentales.

El controlador PID logra regular una variable del proceso del sistema por medio de la acción proporcional, integral y derivativa, mediante el ajuste de una variable manipulada para que de esta forma la variable controlada siga un valor deseado denominado set point (SP)

### 4. Seguridad

Antes y durante la ejecución de la práctica, se deben cumplir las siguientes normas de seguridad:

- Verificar que todas las conexiones hidráulicas y eléctricas estén correctamente ajustadas.
- No realizar cambios bruscos de apertura durante la operación del sistema.
- Evitar el contacto con partes eléctricas energizadas.
- No superar los rangos de presión y caudal establecidos.
- Mantener precaución con las mangueras debido a posibles salpicaduras.

- Cumplir las normas generales del laboratorio de la ESPOL.

## 5. Materiales, equipos y software

### Equipos y materiales

- Bomba hidráulica
- Válvula de globo de ½"
- Motor paso a paso con driver
- Sensor de caudal
- Sensores de presión

### Equipos electrónicos

- Tarjeta Arduino
- Computador

### Software

- Arduino IDE
- Excel
- Python
- MATLAB / Simulink (análisis posterior)

## 6. Procedimiento experimental

### 6.1 Actividades previas (equipo apagado)

- Escuchar la explicación del docente sobre el objetivo de la práctica.
- Revisar el concepto de respuesta al escalón y modelo FOPDT.
- Preparar las tablas para el registro de datos temporales.
- Verificar visualmente el estado del sistema hidráulico.

**Nota:** Estas actividades no implican consumo energético.

### 6.2 Ejecución experimental (equipo encendido – máximo 7,5 min)

1. Colocar la válvula en una **apertura inicial estable ( $\approx 31,25\%$ )**.
2. Encender la bomba hidráulica.
3. Esperar a que el sistema alcance régimen estacionario.
4. Aplicar un **cambio escalón** en la apertura de la válvula (por ejemplo, de 31,25 % a 50 %).
5. Registrar de forma continua:
  - Tiempo (s)
  - Caudal (L/min)
  - Apertura de la válvula (%)
6. Mantener la nueva apertura hasta que el caudal se estabilice.
7. Realizar, si el tiempo lo permite, un **cambio de set point** (ej.: SP = 9 L/min) con el controlador PID activo.

### 6.3 Cierre de la práctica

- Regresar la válvula a una apertura mínima.
- Apagar la bomba hidráulica.
- Desenergizar el sistema electrónico.
- Verificar que el equipo quede en condiciones seguras.

### 7. Registro de datos experimentales

Tiempo (s)	Apertura (%)	Caudal (L/min)

### 8. Cálculos solicitados

- Graficar **caudal vs tiempo** para la respuesta al escalón.
- Determinar gráficamente:
  - Ganancia del proceso K
  - Constante de tiempo  $\tau$
  - Tiempo muerto  $t_0$
- Ajustar los datos experimentales al modelo FOPDT:

$$Q(t) = K(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}})$$

- Comparar el comportamiento del sistema con control PID (si aplica).

### 9. Resultados a presentar

El estudiante deberá entregar:

- Curva de respuesta al escalón (caudal vs tiempo)
- Valores identificados de K,  $\tau$  y  $t_0$
- Comparación SP vs PV (si se activa el PID)
- Análisis cualitativo del desempeño del controlador

### 10. Preguntas de análisis

- ¿Cómo varía el coeficiente de pérdida K con el aumento de la apertura de la válvula?
- ¿Por qué el coeficiente K disminuye a medida que aumenta el área efectiva de paso?
- ¿El comportamiento experimental de K es coherente con la teoría de pérdidas locales?
- ¿Qué factores experimentales pueden influir en la precisión del cálculo de K?

### Referencias

- Crane Co. (2018). *Flow of fluids through valves, fittings, and pipe* (Technical Paper No. 410). Crane Co.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). *Process dynamics and control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2005). *Principles and practice of automatic process control* (3rd ed.). John Wiley & Sons

<b>Elaborado por: Melany Sánchez y Kevin Morocho</b>	<b>Ing. Química</b>
--	---------------------

### Demostración de la relación entre K y Cv

Partiendo de la definición de K:

$$\Delta P = \frac{K\rho v^2}{2}$$

Sabiendo la relación de Cv:

$$Q = Cv \left( \frac{\Delta P}{SG} \right)^{0.5}$$

Luego sabiendo que:

$$Q = Av$$

$$Q = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) v$$

Entonces esta última ecuación nos dice que:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Despejando  $\Delta P$  de las relaciones de Cv y K , nos queda:

$$\Delta P = \frac{K\rho v^2}{2}$$

$$\Delta P = \left( \frac{Q}{Cv} \right)^2 SG$$

Igualando las expresiones se tiene:

$$\Delta P = \Delta P$$

$$\frac{K\rho v^2}{2} = \left( \frac{Q}{Cv} \right)^2 SG$$

Recordaron la relación de la v y Q , para implementarla en la ecuaciones anterior.

$$\frac{K\rho \left( \frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2}{2} = \left( \frac{Q}{Cv} \right)^2 SG$$

$$\frac{16K\rho Q^2}{2\pi^2 D^4} = \frac{Q^2}{Cv^2} SG$$

$$\frac{8K\rho}{\pi^2 D^4} = \frac{1}{Cv^2} SG$$

Despejando K

$$K = \frac{\pi^2 SG D^4}{8\rho Cv^2}$$

Ahora el factor F:

$$F = \frac{\pi^2 SG}{8\rho}$$

Sabiendo que  $\rho=62.4 \text{ lb/ft}^3$  ,  $SG=1$  ,  $\pi=3.1416$  ,se puede llegar a

$$F = 894 \frac{\text{gpm}}{\text{psia in}^4}$$

Finalmente:

$$K = 894 \frac{D^4}{Cv^2}$$