

IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE DOS TANQUES ACOPLADOS

JOHAN SEBASTIÁN BLANCO SERRANO

MARIO DANIEL CHAPARRO PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2023

IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE DOS TANQUES ACOPLADOS

JOHAN SEBASTIÁN BLANCO SERRANO

MARIO DANIEL CHAPARRO PÉREZ

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

José Jorge Carreño Zagarra

PhD Ingeniero Electrónico

Codirectora

Diana Katheryn Poveda Rodríguez

MSc Ingeniera Electrónica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2023

DEDICATORIAS

A mis padres y hermanos cuyo amor, apoyo y sacrificio han sido la base de mi educación.

A mis queridas abuelas, Rosa y María, dos mujeres excepcionales cuyo amor inquebrantable y apoyo constante han sido mi faro de luz a lo largo de mi etapa académica. Su amor incondicional ha sido mi fuente inagotable de inspiración y aliento.

A mi grupo de estudio con los que compartí y aprendí bastante.

~ Sebastian Blanco

A mi familia, por haber estado presente en todo momento durante este proceso dando su apoyo incondicional.

~ Mario

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los docentes que durante todo el proceso académico nos nutrieron con conocimientos dándonos su guía y aprendizaje. Asimismo, a nuestros compañeros, que, sin el trabajo en equipo y ayuda mutua, no hubiera sido posible. También, a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos los espacios, herramientas y licencias para el desarrollo del proyecto.

Agradecemos a la empresa Automática y Robótica SION S.A.S por haber aportado económicamente para la realización de este Proyecto.

Agradecemos a nuestras familias por ser un pilar fundamental en nuestras vidas, por su apoyo incondicional.

Gracias totales a todas las personas que se involucraron en este proyecto, ya que con cualquier intervención o sugerencia fueron de gran ayuda.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1 PRELIMINARES	17
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	17
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo general.....	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	22
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	22
2.1.1 Sistema de tanques.	23
2.1.2 Sistema de control.	23
2.1.2.1 Placa Arduino UNO R3.	24
2.1.2.2 Interfaz Simulink.	25
2.1.3 Bomba sumergible.	25
2.1.3.1 Caracterización de la bomba.	26
2.1.4 Válvula ON/OFF.	27
2.1.5 Sensor de nivel.	28

2.1.5.1 Caracterización del sensor de nivel.....	30
2.1.6 Controlador L298n.....	30
2.1.7 Válvula manual de bola.....	32
2.2 DISEÑO CONCEPTUAL.....	32
2.3 ENSAMBLAJE DEL SISTEMA.....	33
2.3.1 Montaje de la estructura.....	34
2.4 MODIFICACIONES.....	35
2.5 MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL.....	36
2.6 CABLEADO DE ALIMENTACIÓN.....	36
2.6.1 Placa de Circuito Impreso.....	37
2.6.2 Configuración de componentes electrónicos.....	37
2.7 CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	39
2.7.1 Condiciones para la bomba.....	39
3 CARACTERIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y CÁLCULO DE PARÁMETROS	40
3.1 SISTEMAS DE NIVEL DE LÍQUIDO.....	40
3.1.1 Resistencia hidráulica.....	43
3.1.2 Capacitancia hidráulica.....	45
3.2 MODELO MATEMÁTICO.....	45

3.2.1 Modelo matemático de sistemas de fluidos.	45
3.2.2 Modelamiento y validación del sistema.....	51
3.3 CALCULO DE PARAMETROS.....	53
3.3.1 Capacitancia.	53
3.3.2 Resistencia hidráulica.	53
3.3.3 Estimación del modelo de caja gris MATLAB®.....	55
3.3.4 Obtención de la función de transferencia para el control del tanque superior.	58
3.3.5 Obtención de las funciones de transferencia para el control del tanque inferior.	59
4 SISTEMA DE CONTROL.....	61
4.1 CONTROL DE NIVEL EN EL TANQUE 2	61
4.1.1 Diseño PI Asignación de polos.	62
4.1.1.1 Control PI de un sistema de primer orden.	63
4.2 Diseño del controlador TANQUE SUPERIOR	64
4.2.1 Implementación del control en el modelo real del tanque superior.	65
4.3 METODO DE CONTROL PARA TANQUE INFERIOR MEDIANTE CONTROL EN CASCADA.....	66
4.3.1 Implementación del control en el modelo real del tanque inferior.	67
4.4 PROCEDIMIENTO OPERATIVO.....	69

5 DESCRIPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	70
6 CONCLUSIONES	71
7 RECOMENDACIONES	72
8 BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones Técnicas Arduino UNO R3.....	24
Tabla 2. Características de la bomba sumergible.	26
Tabla 3. Características de la válvula On/Off	27
Tabla 4. Características del sensor ultrasónico.....	29
Tabla 5. Características del controlador L298n	31
Tabla 6. Características de la válvula manual	32
Tabla 7. Listado de componentes electrónicos	38
Tabla 8. Cálculo de la capacitancia de cada tanque.	53
Tabla 9. Parámetros para la obtención de la resistencia hidráulica en la válvula manual.	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema general de tanques.....	22
Figura 2. Sistema de tanques.....	23
Figura 3. Placa Arduino UNO R3	24
Figura 4. Simulink. Toolbox especial de MATLAB®.....	25
Figura 5. Bomba de sumergible	25
Figura 6. Caracterización de la bomba.....	26
Figura 7. Valvula ON/OFF	27
Figura 8. Sensor ultrasónico HC-SR04	28
Figura 9. Caracterización del sensor ultrasónico.....	30
Figura 10. Controlador L298n.....	31
Figura 11. Válvula manual de bola 16mm	32
Figura 12. Concepto de diseño inicial.	33
Figura 13. Modelado de la estructura del sistema.....	34
Figura 14. Diseño conceptual modificado.	35
Figura 15. Caja de control ubicado en la parte posterior.....	36
Figura 16. PCB utilizada en la conexión.....	37
Figura 17. Diagrama de configuración	38
Figura 18. Variación del caudal de la bomba sumergible con respecto al PWM	39
Figura 19. Descarga de tanque abierto a la atmósfera.	41

Figura 20. Sistema de nivel de líquidos.....	45
Figura 21. Sistema de nivel de líquidos con interacción.....	48
Figura 22. Sistema de nivel de líquido con interacción en cascada.	49
Figura 23. Características de cada técnica de modelamiento	52
Figura 24. Comportamiento del caudal con respecto a la altura de referencia	54
Figura 25. Comportamiento del tanque Superior.....	56
Figura 26. Comportamiento del tanque Inferior.	56
Figura 27. Comportamiento del modelo matemático vs comportamiento real.....	57
Figura 28. Estimación del modelo Non Linear Mediante Caja Gris	58
Figura 29. Comportamiento de $G1(s)$ ante un escalón.....	59
Figura 30. Respuesta de la función $G1(s)$ al escalón.....	60
Figura 31. Respuesta de la función $G2(s)$ al escalón.....	60
Figura 32. Control PID para una planta.....	61
Figura 33. Diagrama de bloques de un control en cascada.	62
Figura 34. Respuesta al escalón por parte del modelo matemático antes y después de implementar el control PI.....	65
Figura 35. Diagrama de bloques para el control PI del tanque superior.....	65
Figura 36. Seguimiento de referencias del modelo matemático real en el tanque superior.	66
Figura 37. Respuesta del sistema de control en cascada ante un escalón.....	67
Figura 38. Diagrama de bloques para el control PI del tanque inferior.....	68
Figura 39. Seguimiento de referencias del modelo real tanque inferior.	68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Planos de la estructura del sistema	77
Anexo B. Paso a paso para diseñar un controlador con la herramienta "Sisotool"	84
Anexo C. Descripción económica del proyecto.	87

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE DOS TANQUES ACOPLADOS*

AUTORES: JOHAN SEBASTIAN BLANCO SERRANO

MARIO DANIEL CHAPARRO PÉREZ**

PALABRAS CLAVE: Control automático, Modelo de tanques acoplados, Nivel, Caudal.

DESCRIPCIÓN:

La formación en control automático desempeña un papel fundamental en la preparación de los ingenieros para enfrentar desafíos del mundo laboral. Sin embargo, muchas veces, la falta de acceso a bancos de pruebas adecuados limita las oportunidades prácticas para los estudiantes. Este proyecto se propone abordar esta limitación mediante la implementación de un sistema de control de nivel de líquido utilizando un sistema de tanques acoplados.

El objetivo principal es desarrollar un controlador PID efectivo y preciso para regular los niveles de líquido en los tanques. Este proyecto se enfoca en la instrumentación, caracterización, programación y montaje del sistema completo. Se abarcan aspectos prácticos, desde la caracterización de sensores y componentes hasta la programación y ajuste fino del controlador PID.

El resultado será un sistema de control funcional que no solo servirá como un recurso valioso para la empresa Automática y Robótica SION, sino que también contribuirá a la formación de los estudiantes en control automático. Este proyecto busca proporcionar un banco didáctico que ofrece experiencias prácticas en el diseño e implementación de sistemas de control, preparando a los estudiantes para enfrentar desafíos del mundo real en el campo del control automático.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: José Jorge Carreño Zagarra. Codirectora: Diana Katheryn Poveda Rodríguez

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION AND CONTROL OF A COUPLED TWO-TANK SYSTEM*

AUTHORS: JOHAN SEBASTIAN BLANCO SERRANO

MARIO DANIEL CHAPARRO PÉREZ**

KEYWORDS: Automatic Control, Coupled Tank Model, Level, Flow Rate.

DESCRIPCIÓN:

Training in automatic control plays a fundamental role in preparing engineers to face real-world challenges in the workforce. However, access to suitable testbeds is often limited, depriving students of practical opportunities. This project aims to address this limitation by implementing a liquid level control system using a coupled tank system.

The primary objective is to develop an effective and precise PID controller to regulate liquid levels in the tanks. This project focuses on instrumentation, characterization, programming, and assembly of the complete system. Practical aspects are covered, ranging from sensor and component characterization to programming and fine-tuning of the PID controller.

The result will be a functional control system that not only serves as a valuable resource for the company Automática y Robótica SION but also enhances students' education in automatic control. This project seeks to provide an educational testbed that offers practical experiences in designing and implementing control systems, preparing students to tackle real-world challenges in the field of automatic control.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: José Jorge Carreño Zagarra. Codirectora: Diana Katheryn Poveda Rodríguez

INTRODUCCIÓN

En décadas anteriores, obtener datos de un proceso en las máquinas completamente manuales de la época requería de personal altamente capacitado. Lo cual en algunos casos generaba errores al momento de tomar datos y retardo de tiempo a la hora de conseguir remediar estos errores. Posteriormente, el control automático se implementa en los procesos industriales para disminuir las desviaciones y aumentar la eficiencia y la calidad de los procesos realizados.

El control automático se basa en la manipulación de las variables necesarias para el proceso mediante el uso de instrumentos de medición y llevar sus resultados a una interfaz visual con el fin de regular o mejorar el funcionamiento de las diversas máquinas que se pueden encontrar en los campos industriales.

El control de nivel de un sistema de tanques acoplados es un ejemplo de un proceso necesario tanto en la vida cotidiana como en los procesos industriales tales como las fábricas de pulpa y papel, las plantas petroquímicas y las instalaciones de tratamiento de agua. En donde, resumidamente, el líquido de un sistema se transporta y se acumula en un tanque para posteriormente transportarse a otro de forma controlada. Por lo cual, requieren que estos procesos se lleven de forma automática.

Como dice PÉREZ IZQUIETA, “los sistemas de control de nivel de depósitos además de en el ámbito industrial se encuentran en aspectos cotidianos que van desde elementos sencillos como el control del nivel de líquido en la cisterna de un inodoro hasta elementos complejos como el control del nivel del lago artificial Silveretta Stausse”¹; donde se evidencia la importancia del control de estos procesos.

La implementación de estas tecnologías es motivo por el cual los profesionales hoy en día requieren de un mayor grado de conocimiento y la Universidad Industrial de

¹ PÉREZ IZQUIETA, Sara. CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS [en línea]. Trabajo de Grado. Pamplona: Universidad Pública de Navarra, 2011 [consultado el 25, noviembre, 2022]. p. 6. Disponible en: < <http://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/4176>>.

Santander por medio de la adecuación de aulas promueve que los estudiantes mediante el uso de elementos didácticos fortalezcan estas competencias.

El presente trabajo de grado aborda un tema de gran relevancia en el ámbito de la ingeniería y la automatización industrial: el desarrollo y análisis de sistemas de control para el nivel de líquido. Además, contribuye a la implementación de nuevos bancos de pruebas, en línea con el enfoque de Automática y Robótica SION, enriqueciendo así la formación en control automático

El contenido del trabajo se divide en ocho capítulos: el primer capítulo abarca el planteamiento y manejo de referencias para la elaboración del proyecto. Para el segundo se realiza una descripción de la estructura y componentes que conforman el sistema. En el tercer capítulo, se caracterizan los elementos (Bomba, sensores y válvulas), se proporciona la forma con la que se identifican los modelos matemáticos y cálculo de estos. En el cuarto, se presenta la programación del sistema de control y aborda la implementación del controlador PID. En el quinto se evidencia una lista a detalle con los elementos del presupuesto requeridos para la elaboración del sistema. En el sexto y séptimo se presentan conclusiones y recomendaciones obtenidas a través del desarrollo y análisis detallado de este proyecto. Para finalmente en el octavo presentar la bibliografía utilizada para el desarrollo del proyecto.

1 PRELIMINARES

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de control de nivel son fundamentales en numerosas aplicaciones industriales, desde la gestión de tanques de almacenamiento hasta la regulación de procesos químicos y manufactureros.

En la actualidad, los recursos didácticos que se utilizan para ofrecer experiencias prácticas a los estudiantes que ven cursos como sistemas mecatrónicos, ingeniería de control o cursos afines a estos, se encuentra limitado debido al alto costo que significa adquirirlos. Esta falta de equipamiento adecuado para el control de procesos restringe la formación práctica de los estudiantes, lo que a menudo se traduce en dificultades al enfrentarse a desafíos del mundo real en el ámbito de la automatización y el control automático.

La implementación de recursos para automatización y control para el uso didáctico en las universidades se evidencia en los proyectos “Control del nivel de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas”², “Implementación de esquemas de regulación automática basados en la variación de apertura de la servo-válvula y la velocidad de giro de la bomba, para el banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos del laboratorio de STAF UIS”³ y “Montaje eléctrico, electrónico y control computarizado de

² ACOSTA GALVIS, Mauricio; GÓMEZ MALAGON, Luis Arturo. Control del nivel de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.

³ TÉLLEZ FLÓREZ, Carlos Andrés; VÁSQUEZ HENAO, Gabriel Augusto. Implementación de esquemas de regulación automática basados en la variación de apertura de la servo-válvula y la velocidad de giro de la bomba, para el banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos del laboratorio de staf UIS. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>

máquinas de ensayos Instron del laboratorio de potencia fluida de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander”⁴.

Dentro de la elaboración de soluciones educativas para sistemas de nivel de líquidos sobresale el trabajo de grado “Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos”⁵ se incorpora un control a un prototipo de proceso industrial a escala. También en “Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de LabVIEW”⁶ se realiza un módulo que facilita el estudio de sistemas reales de instrumentación y control mediante el uso de software. En Colombia se distinguen unos cuantos trabajos, incluido el trabajo “Desarrollo del sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería”⁷ el cual propone una solución a partir de un control de nivel para máquinas de lavado. Además, el trabajo de grado “Diseño y montaje de un control de nivel para una envasadora de lácteos”⁸ desarrolla un sistema de control para automatizar las maquinas encargadas de envasar productos lácteos.

En la Universidad Industrial de Santander se han llevado a cabo proyectos de grado referentes al sistema de nivel de líquidos en tanques, algunos de estos se encuentran “Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el

⁴ CAMACHO FLOREZ, Emmanuel Joseph; PARADA GONZÁLEZ, Luis Carlos. Montaje eléctrico, electrónico y control computarizado de máquinas de ensayos instron del laboratorio de potencia fluida de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2019. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>

⁵ BENITEZ MEJÍA, Diego Santiago. Diseño y control de nivel de líquidos. [En línea]. Trabajo de grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1994. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en:<<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/51113/1/T2298.pdf>>

⁶ LEYES FRANCO Jennifer Beatriz; NAVARRETE DÍAZ, Darío Rafael. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de LabVIEW. [En línea]. Trabajo de grado. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/44272>>

⁷ ARANGO RESTREPO, Sandra Milena. Desarrollo del sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería. [En línea]. Trabajo de grado. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2008. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <<https://www.yumpu.com/es/document/view/13197086/1-desarrollo-del-sistema-de-control-de-nivel-para-un-tanque-surtidor->>

⁸ GIRALDO BETANCUR, Indira Marcela. Diseño y montaje de un control de nivel para una envasadora de lácteos. [En línea]. Trabajo de grado. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2004. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69899>>

laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS”⁹, “Control de nivel para un sistema de tanques en cascada empleando un PLC Siemens S7-1200”¹⁰ y “Instrumentación y puesta en marcha de un sistema de tanques rectangulares para realizar el control de nivel empleando el PLC Compactlogix 1769-L32E”¹¹ se realizaron montajes que cumplen características similares al sistema propuesto en el presente proyecto, los cuales se encuentran enfocados en la automatización del control de nivel de los tanques, además de contribuir a la formación de los estudiantes con estos dispositivos propuestos en los laboratorios.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se vive en un mundo donde la creciente globalización, los altos estándares de calidad y producción establecen la base principal para que los ingenieros se enfoquen profundamente en el control automático. La empresa Automática y Robótica SION S.A.S. se dedica a la investigación y desarrollo experimental en el campo de las ciencias naturales y la ingeniería. Cuenta con la necesidad de construir e implementar un sistema de dos tanques acoplados en donde se apliquen técnicas de control robusto para realizar prácticas relacionadas al campo de la Ingeniería de Control, buscando así enlazar la empresa con la academia para plasmar los conocimientos adquiridos en las aulas.

El control de nivel y caudal entre tanques de almacenamiento interconectados en serie es una necesidad común en diversos procesos industriales. Actualmente se han

⁹ PEÑARANDA, Claudia Yaneth; SILVA, Wilson Reinaldo y GÓMEZ ARIAS, Eulices. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014. [Consultado 7 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>

¹⁰ ACELAS SUÁREZ, Silvia Johanna; MENDOZA DÍAZ, Ana Milena. Control de nivel para un sistema de tanques en cascada empleando un PLC Siemens S7-1200. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016. [Consultado 7 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>

¹¹ ROBLES RODRIGUEZ, Imer Alberto; GALVIS CHACÓN, Javier Augusto. Instrumentación y puesta en marcha de un sistema de tanques rectangulares para realizar el control de nivel empleando el PLC compactlogix 1769-L32E. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018. [Consultado 7 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>

implementado sistemas de control mediante simulaciones en laboratorios virtuales, pero poco se cuenta con laboratorios o dispositivos físicos e interactivos en donde los estudiantes del campo del control y automatización puedan manipular las variables para ver cómo influye el comportamiento de las técnicas de control en un sistema de este tipo.

Por este motivo, con el apoyo de la empresa Automática y Robóticas SION S.A.S., se propone este trabajo en donde se busca desarrollar e implementar un sistema de dos tanques acoplados que permita la identificación, el análisis y el control de las variables que intervienen utilizando técnicas de control. Además, que pueda contribuir con la enseñanza del control automático, ofreciendo a los estudiantes la oportunidad de interactuar con un sistema real, aplicar sus conocimientos teóricos en un entorno práctico y adquirir experiencia valiosa en el diseño y la implementación de sistemas de control.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de dos tanques acoplados de bajo costo para la validación de técnicas de control.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar un mecanismo que permita regular el nivel de los tanques mediante el uso de electroválvulas y sensores ultrasónicos teniendo en cuenta las siguientes especificaciones:
Mecanismo impulsado por una mini bomba de agua permitiendo el flujo del fluido por accionamiento electromecánico.

- El espacio de trabajo empleado para el sistema es aproximadamente 30cmx30cm de área por 100cm de altura.
- La bomba trabaja entre 18 a 20 [W] y entrega un flujo de entre aproximadamente 10 a 12,5 [L/min].
- Diseñar un controlador clásico para el control de nivel en el sistema de tanques que permita un rápido seguimiento de las referencias aún en presencia de perturbaciones externas.
- Efectuar un sistema de comunicación interactivo entre el sistema de dos tanques acoplados y un computador a través del software matemático MATLAB®, de tal forma que se puedan visualizar los resultados analizados.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

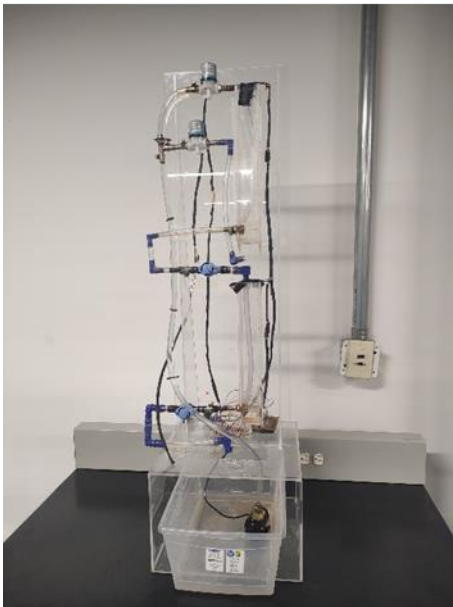
En el presente capítulo se describe el sistema con el cual se realiza el control del nivel del fluido, además que proporciona una descripción a detalle de las características de las válvulas, sistema de bombeo, sensores e implementos usados para el control.

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

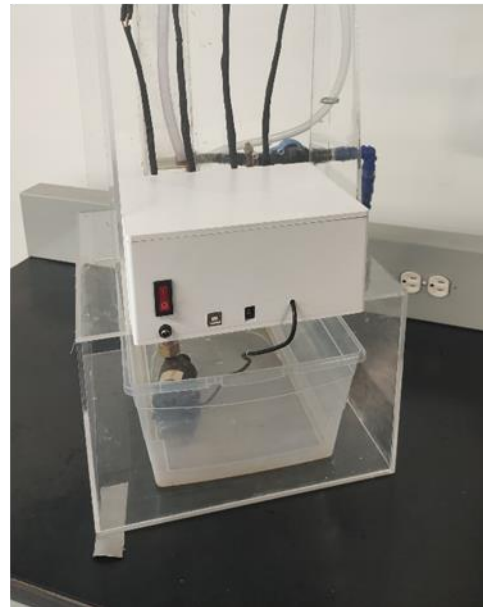
El sistema lo conforma una estructura compuesta por dos tanques de igual tamaño contruidos en acrílico con base cuadrada y un reservorio para la adición y sustitución del fluido tal como se puede ver en la Figura 1a. Además de un sistema de bombeo que funciona mediante el implemento de una placa Arduino UNO que recibe los comandos de operación mediante el computador, estos componentes ubicados en una caja de control, como se observa en la Figura 1b

Figura 1. Sistema general de tanques

(a) Tanques

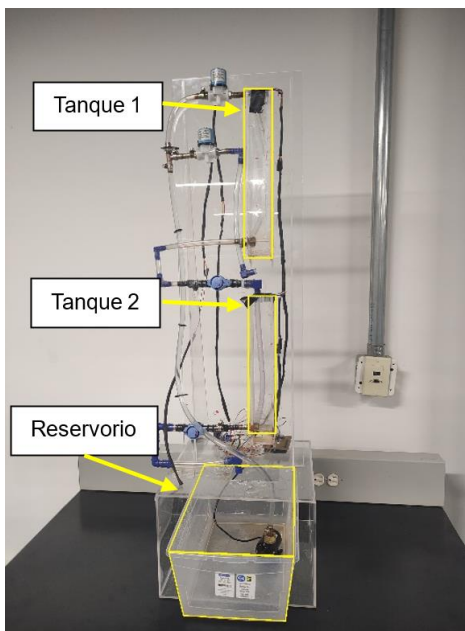


(b) Caja de control



2.1.1 Sistema de tanques. Está conformado por dos tanques fijos de base cuadrada dispuestos verticalmente como lo muestra la Figura 2. La base de los tanques tiene un área de 48×48 [mm²] y una altura de 300 [mm] para una capacidad de 480 [mL] en cada tanque (tomando la base y restando el espesor de las paredes de los tanques 4 [mm]). Cada tanque cuenta con un orificio en su base para la conexión de la manguera y paso del fluido entre ellos. Además, cuenta con un reservorio extraíble de base rectangular de 376×241 [mm²] y 140 mm de altura y una capacidad máxima de 9 [L].

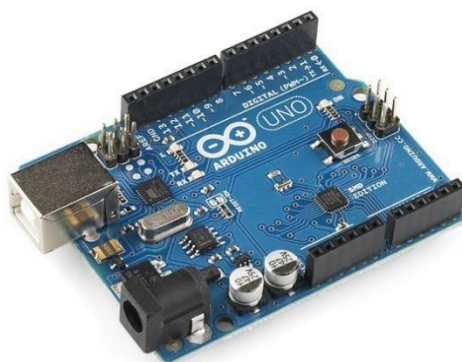
Figura 2. Sistema de tanques



2.1.2 Sistema de control. El sistema de control se compone principalmente de la interacción entre la placa Arduino UNO R3 y la interfaz de Simulink en MATLAB®. En conjunto, esta combinación de hardware y software permite la implementación de estrategias de control avanzadas y la capacidad de ajustar y mejorar el sistema de tanques acoplados de manera eficiente. El sistema de control desempeña un papel central en la regulación del nivel de líquido en los tanques, asegurando su estabilidad y precisión en diversas condiciones operativas.

2.1.2.1 Placa Arduino UNO R3. El componente central con el que se llevará a cabo el proceso de control de nivel es la placa de desarrollo Arduino UNO. Esta placa se caracteriza por su versatilidad y accesibilidad en el desarrollo de sistemas electrónicos y proyectos de automatización. Entre sus atributos más destacados se encuentran su entorno de desarrollo integrado (IDE) de fácil uso y su amplio conjunto de pines digitales y analógicos, que permiten la interacción con una variedad de sensores y actuadores. Este microcontrolador es altamente adaptable y puede ser personalizado para cumplir con los requisitos específicos de control de nivel en el sistema.

Figura 3. Placa Arduino UNO R3



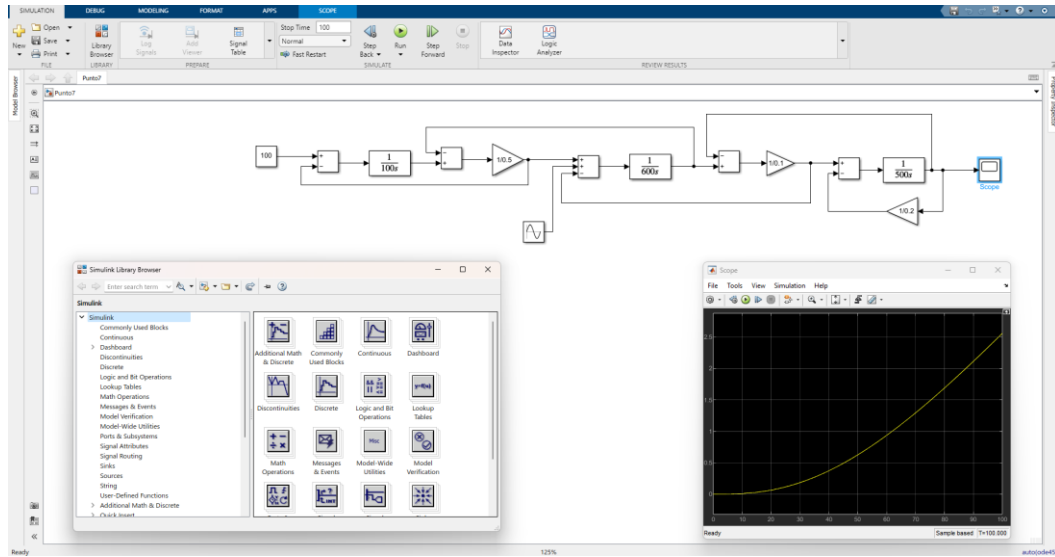
Algunas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas Arduino UNO R3

Característica	Valor
Microcontrolador	ATmega328P
Velocidad de reloj	16 MHz
Voltaje de trabajo/entrada	5 V / 7,5-12 V
Corriente DC pin de E/S	40 mA
Corriente DC para 3.3 V Pin	50 mA
Memoria	32 KB Flash (0,5 KB utilizados por el bootloader), 2KB SRAM y 1KB Eeprom
Pines (Digitales, PWM, Analógicos)	20 (14,6,6)
Dimensiones	68,6 x 53,4 mm

2.1.2.2 Interfaz Simulink. Esta herramienta versátil es utilizada en ingeniería y ciencias aplicadas para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos.

Figura 4. Simulink. Toolbox especial de MATLAB®



2.1.3 Bomba sumergible. Se dispone con una bomba de agua sumergible genérica como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Bomba de sumergible



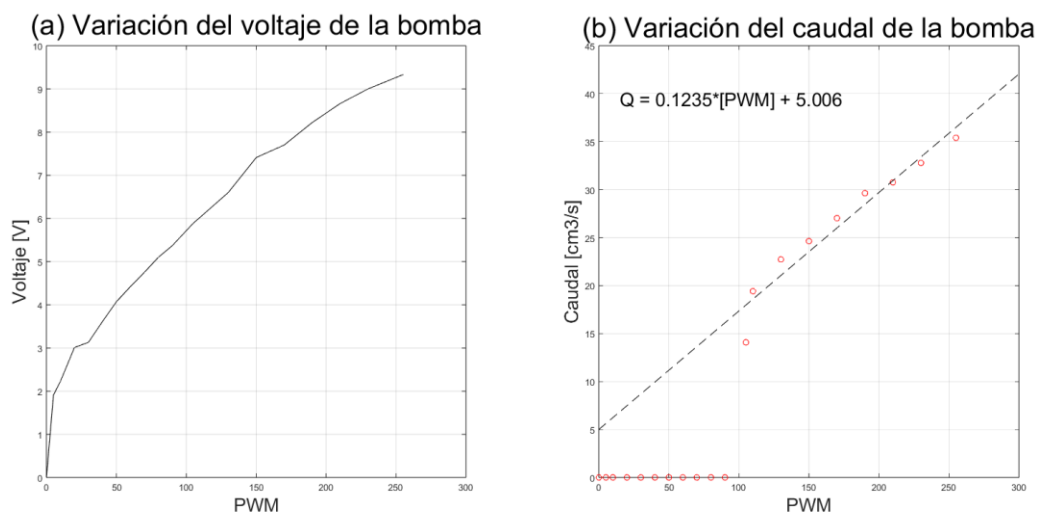
Algunas de las características de la bomba sumergible se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de la bomba sumergible.

Característica	Valor
Tensión de operación	DC 12 V
Potencia	20 W
Frecuencia	60 Hz
Caudal máximo	13,33 L/min
Cabeza máxima	5 m

2.1.3.1 Caracterización de la bomba. La bomba de agua utilizada en este montaje fue sometida a unas pruebas experimentales con el fin de obtener su desempeño al momento de transportar el fluido. Para esto se ajustó el PWM, se tomó el voltaje y el tiempo de llenado para un recipiente de 1 [L]*. Posteriormente estos tiempos se promediaron y se halló el caudal en [L/s] para cada altura establecida como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Caracterización de la bomba



* Para la toma de la medida del tiempo se utilizó un cronómetro estándar con resolución de 1 [cs].

2.1.4 Válvula ON/OFF. Se tienen en cuenta varias válvulas solenoide de referencia SLWS1 normalmente cerrada como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Válvula ON/OFF



Esta válvula cuenta con dos vías todo o nada con características detalladas en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de la válvula On/Off

Característica	Valor
Tensión de operación	DC 12 V
Potencia	4.8 W
Frecuencia	60 Hz
Tamaño del puerto	1/4"
Temperatura Fluido	0 – 80 °C
Presión de operación	0 - 0,7 MPa
Peso	115 g

2.1.5 Sensor de nivel. Con el fin de monitorear el nivel de flujo de manera precisa y económica, se seleccionaron los sensores ultrasónicos HC-SR04 como se muestra en la Figura 8. Estos sensores utilizan tecnología de ultrasonido para determinar la distancia de un objeto dentro de un rango específico. Estos sensores están compuestos por un transductor que actúa como transmisor convirtiendo en pulsos de sonido ultrasónico la señal eléctrica y un transductor que actúa como receptor escuchando los pulsos previamente transmitidos.

Figura 8. Sensor ultrasónico HC-SR04



El sensor HC-SR04 opera de manera sencilla pero efectiva para medir distancias. Cuando se desea medir la distancia a un objeto, se envía una señal de activación al sensor configurando el pin TRIG (disparador) en un estado ALTO durante un breve período de 10 microsegundos (μ s). En respuesta a esta señal, el sensor emite ocho pulsos ultrasónicos a una frecuencia de 40 kHz en forma de ráfaga. Esto crea una serie de ondas ultrasónicas que se propagan a través del aire en dirección al objeto que se desea medir. Simultáneamente, el pin ECHO cambia a un estado ALTO, marcando el inicio de la recepción de la señal de eco.

Cuando estos pulsos ultrasónicos encuentran un objeto, son reflejados de vuelta hacia el sensor. El pin ECHO cambia a un estado bajo tan pronto como detecta esta señal reflejada. El sensor mide cuidadosamente el tiempo que ha transcurrido desde el disparo inicial hasta la recepción del eco. Dado que la velocidad del sonido en el aire es constante, el sensor utiliza este tiempo para calcular la distancia al objeto de manera

precisa. Cuanto menor sea el tiempo de eco, más cerca se encuentra el objeto del sensor. En resumen, el HC-SR04 utiliza el tiempo de viaje de pulsos ultrasónicos para determinar la distancia a un objeto y ofrece esta distancia como resultado de la medición.

Los sensores ultrasónicos HC-SR04 ofrecen una solución confiable y de bajo costo para el monitoreo del nivel de agua en los tanques. Su salida consiste en una señal eléctrica proporcional a la distancia medida, lo que facilita su integración con el sistema de control y permite tomar decisiones precisas para regular el caudal de entrada y salida de agua mediante las válvulas correspondientes en cada tanque.

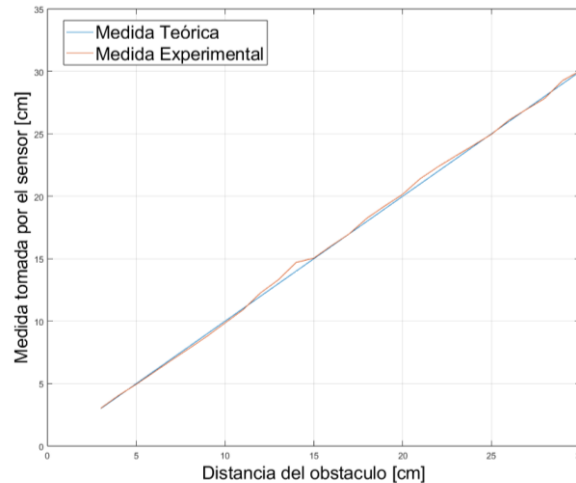
Algunas características del sensor HC-SR04 se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del sensor ultrasónico

Característica	Valor
Tensión de operación	5 V DC
Corriente de operación	15 mA
Frecuencia	40 KHz
Alcance máximo	4 m
Alcance mínimo	2,00 cm
Precisión de alcance	3,00 mm
Angulo de detección	15 °
Señal de entrada de disparo	10 µs pulso TTL
Dimensiones	45 x 20 x 15 mm

2.1.5.1 Caracterización del sensor de nivel. Con el fin de analizar y comprobar la salida del sensor ultrasónico, se montó un obstáculo frente al sensor en 28 posiciones diferentes, variando la distancia entre el sensor y el obstáculo. Para cada posición, se registraron 3 valores suministrados por el sensor*. Luego, se calculó el promedio de estos valores, lo que permitió establecer una relación lineal entre el valor promedio de la distancia obtenida con el sensor y la distancia teórica como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Caracterización del sensor ultrasónico



2.1.6 Controlador L298n. El controlador L298n mostrado en la Figura 10 es el módulo que permite controlar el sentido y la velocidad de motores. El funcionamiento básico del controlador L298N se basa en el uso de señales lógicas provenientes de un microcontrolador o un sistema de control para controlar los motores conectados.

* Para realizar las mediciones se empleó un flexómetro convencional con resolución de 1 [mm] y para la toma de la distancia se realizó una conexión del sensor con el Arduino utilizando una protoboard.

Figura 10. Controlador L298n



El controlador L298N también requiere de una fuente de alimentación externa para suministrar la energía necesaria para los motores.

En la Tabla 5 se muestran algunas características que posee este controlador.

Tabla 5. Características del controlador L298n

Característica	Valor
Tensión de operación	DC 5 V
Corriente máxima	2 A por canal
Potencia de salida	25 W
Corriente de control	36 mA
Temperatura de operación	-20°C ~ 135°C
Peso	30 g
Dimensiones	43 x 43 x 27 mm

2.1.7 Válvula manual de bola. Se tiene en cuenta una mini válvula de bola como se observa en la Figura 11.

Figura 11. Válvula manual de bola 16mm



Algunas de las características de la válvula se muestran en la Tabla 6.

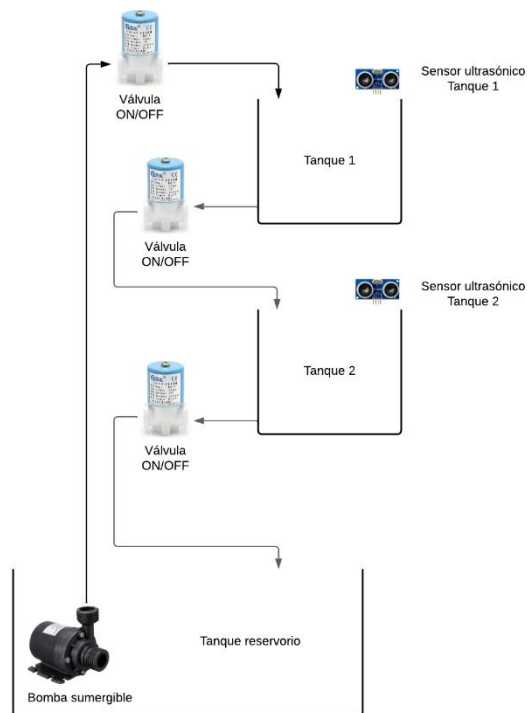
Tabla 6. Características de la válvula manual

Característica	Valor
Material	PVC
Dimensiones	5,6 x 5,6 x 2,8 [cm]
Tamaño del puerto	16 mm
Tipo de fluido	Agua

2.2 DISEÑO CONCEPTUAL

Se propone un esquema del sistema considerando los elementos dispuestos para el montaje, conociendo la forma de operación de estos elementos para la ayuda del control del nivel como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Concepto de diseño inicial.



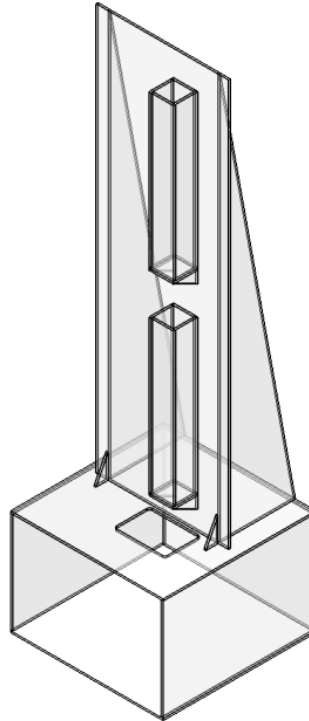
La operación del sistema se basa en tomar agua del Tanque reservorio que previamente ha sido suministrada manualmente. Desde este reservorio llevar el agua a la entrada del Tanque 1, una válvula On/Off es ubicada para comunicar la salida del Tanque 1 con la entrada del Tanque 2, a la salida del Tanque 2 se ubica otra válvula On/Off para comunicarse con el Tanque reservorio, de esta forma lograr cerrar el circuito de circulación del fluido en los tanques.

2.3 ENSAMBLAJE DEL SISTEMA

El ensamble se realizó de forma parcial, iniciando con el montaje de la estructura (Tanques, bomba de agua, tuberías, accesorios) y luego el montaje del sistema de control (Arduino UNO, L298N, HC-SR04 y su respectivo cableado), a continuación, se describen el proceso para la realización del montaje.

2.3.1 Montaje de la estructura. Para llevar a cabo el ensamblaje partiendo del esquema planteado (Figura 12) se realizó un diseño a detalle utilizando el programa SolidWorks para obtener cada pieza con medidas determinadas, el resultado se observa en la Figura 13. Y los planos requeridos para su fabricación se presentan en el Anexo A.

Figura 13. Modelado de la estructura del sistema.



Con este diseño se prosiguió con el corte y ensamblado del acrílico con un espesor de 4 [mm]. Este montaje tiene todas sus partes de acrílico unidas.

Se verifica que no haya fugas en los tanques, se seleccionan las mangueras de un cuarto de pulgada para interconectar los tanques con los elementos descritos a continuación:

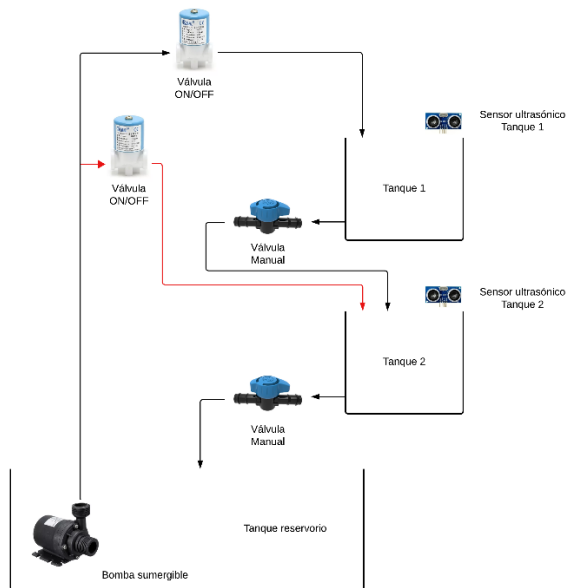
- En el tanque reservorio se instala la bomba.
- En la entrada del tanque 1 se instala una válvula on/off.
- En la salida del tanque 1 se instala una válvula on/off para comunicar con el tanque 2.

- En la salida del tanque 2 se instala una válvula on/off para comunicar con el tanque reservorio.

2.4 MODIFICACIONES

Dentro del proceso de montaje se decidió cambiar las electroválvulas utilizadas a las salidas de cada tanque por válvulas manuales de tipo bola, para que, al momento de operación, el caudal de salida se mantenga fijo de acuerdo con el porcentaje de apertura de la válvula manual. Por lo tanto, el montaje final queda como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Diseño conceptual modificado.



En la Figura 14 también se observa una configuración que será evaluada para el desarrollo de un sistema de tanque simple.

Los elementos quedan finalmente comunicados de la siguiente forma:

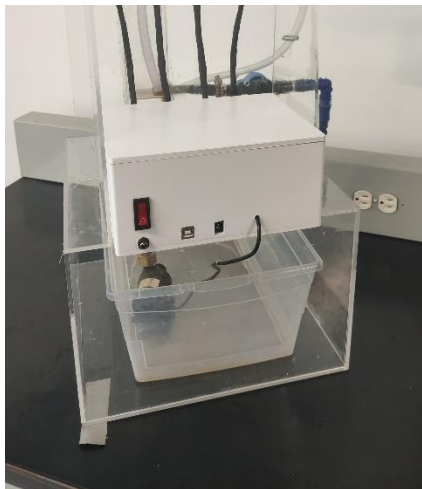
- En el tanque reservorio se instala la bomba.
- En la entrada del tanque 1 se instala una válvula on/off.

- En la salida del tanque 1 se instala una válvula manual de globo para comunicar con el tanque 2.
- En la salida del tanque 2 se instala una válvula manual de globo para comunicar con el tanque reservorio.
- En la línea de bomba se instala una válvula on/off para comunicar con la entrada del tanque 2.

2.5 MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL

El montaje de la caja de control se ubica en la parte posterior de la estructura (Figura 15) y a su vez para que opere con normalidad debe estar asociado a un computador el cual cuenta con el programa elaborado para la variar nivel de fluido en cada tanque y observar el tiempo en que logra la estabilidad del sistema.

Figura 15. Caja de control ubicado en la parte posterior



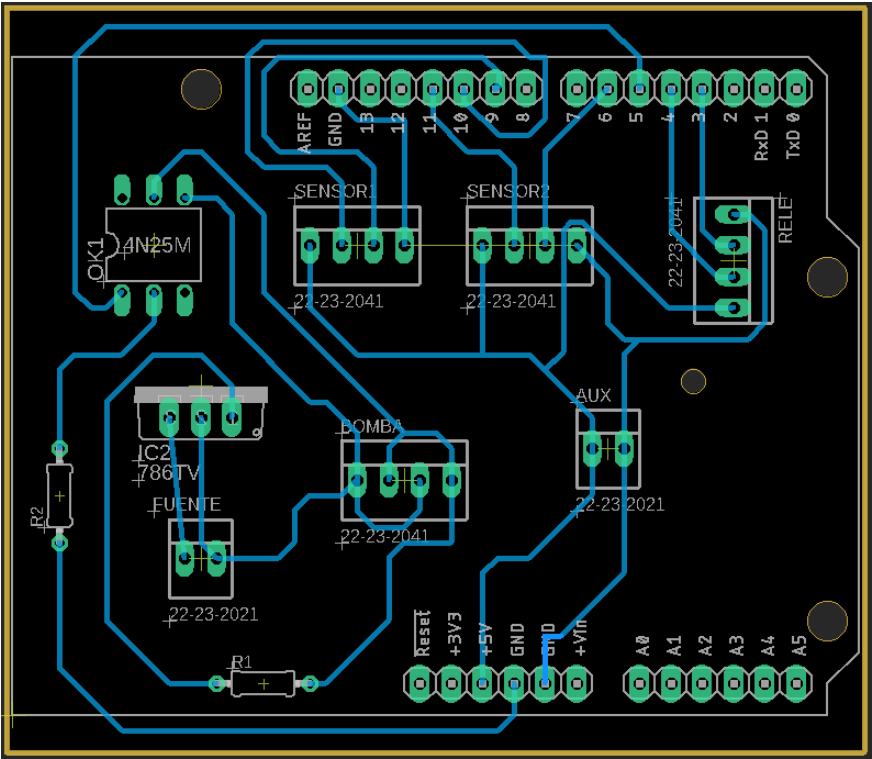
2.6 CABLEADO DE ALIMENTACIÓN

Las conexiones del sistema se organizaron de la siguiente forma:

Para la alimentación se utilizó una fuente de 12V, la cual suministra energía a la bomba y a las dos válvulas On/Off.

2.6.1 Placa de Circuito Impreso. Para organización y eficiencia del sistema, se ha diseñado y fabricado una Placa de Circuito Impreso (PCB) personalizada. Esta PCB se ha desarrollado específicamente para este proyecto con el objetivo de simplificar y ordenar las conexiones eléctricas entre los componentes y el Arduino. Como se muestra en la Figura 16, la PCB actúa como una plataforma centralizada donde se encuentran los componentes clave y las conexiones eléctricas están cuidadosamente trazadas y etiquetadas. Esta solución no solo reduce la complejidad del cableado, sino que también mejora la fiabilidad del sistema al minimizar las posibilidades de conexiones erróneas. Además, permite un acceso más rápido y sencillo para mantenimiento y pruebas.

Figura 16. PCB utilizada en la conexión



2.6.2 Configuración de componentes electrónicos. Los elementos electrónicos que se eligieron para la puesta en marcha tienen una conexión como se muestra en la Figura 17 y se nombran en la Tabla 7.

Figura 17. Diagrama de configuración

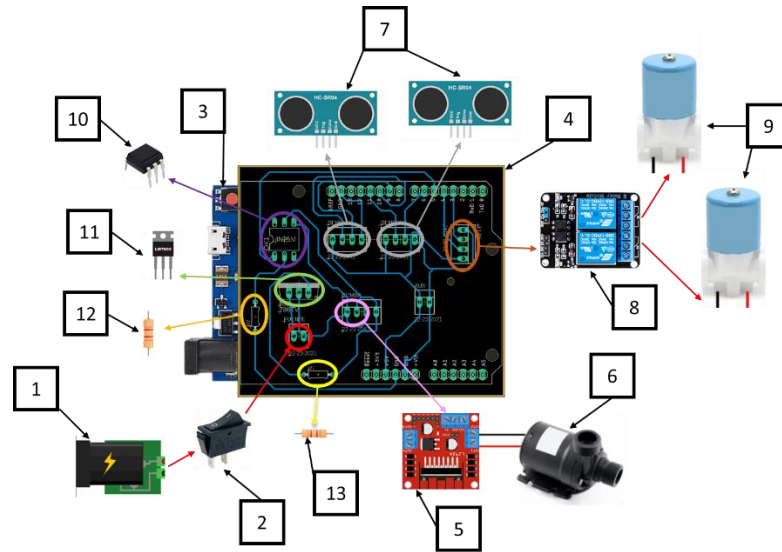


Tabla 7. Listado de componentes electrónicos

Número	Componente
1	Fuente DC 12V
2	Switch ON/OFF
3	Arduino UNO R3
4	PCB
5	L298N
6	Bomba sumergible 12V
7	Sensor Ultrasónico HC-SR04
8	Modulo Relé 2 canales
9	Válvula Solenoide 12V
10	Optoacoplador 4N25M
11	Regulador de tensión LM7805
12	Resistencia 220Ω
13	Resistencia 10000Ω

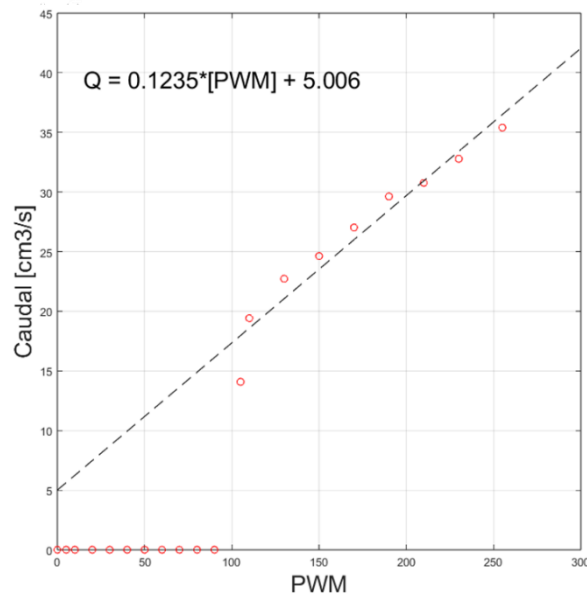
2.7 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Finalizada la etapa del montaje del sistema, se realizaron pruebas con el fin de establecer las condiciones con las cuales la bomba de agua

2.7.1 Condiciones para la bomba. Antes de poner en marcha a la bomba primero se debe verificar que la válvula on/off se encuentre energizada y así evitar una sobrepresión en la línea de la bomba lo que provoque que posteriormente aumenten las fugas.

La bomba trabaja y da el caudal según la caracterización que se hizo para la bomba (ver Figura 18). En la figura se puede apreciar que la bomba tiene un punto muerto entre 0 y 105 PWM, ya que no alcanza la altura necesaria para abastecer de fluido al sistema, por lo que se limita a trabajar con un PWM entre 105 y 255.

Figura 18. Variación del caudal de la bomba sumergible con respecto al PWM



3 CARACTERIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y CÁLCULO DE PARÁMETROS

Este capítulo se enfoca en el proceso de obtención de la función de transferencia que describa adecuadamente el comportamiento del sistema en estudio. En un principio, se presentan los sistemas de nivel de líquido ampliamente empleados en los procesos de control. Luego, explica los fundamentos teóricos y conceptuales necesarios para comprender la identificación del modelo, como los diferentes tipos de modelos y las ecuaciones que los describen.

3.1 SISTEMAS DE NIVEL DE LÍQUIDO

“Al analizar sistemas que implican el flujo de líquidos, resulta necesario clasificar el flujo en dos categorías: laminar y turbulento, basado en el número de Reynolds”¹². Los sistemas que poseen un flujo laminar pueden ser representados mediante el uso de ecuaciones diferenciales lineales.

En muchos procesos industriales, el flujo de líquidos ocurre a través de tuberías y tanques interconectados, y en estos casos, el flujo tiende a ser turbulento en lugar de laminar. Los sistemas que involucran flujo turbulento generalmente se describen mediante ecuaciones diferenciales no lineales. Sin embargo, si la operación se limita a una determinada región, es posible linealizar estas ecuaciones no lineales.

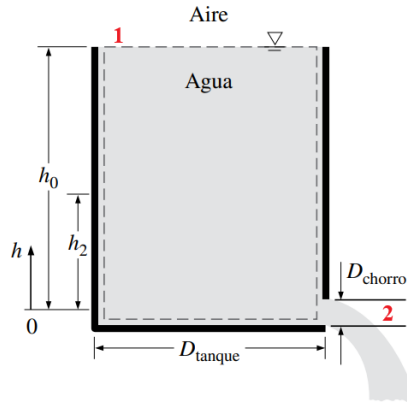
Considerando un sistema de descarga de un tanque abierto a la atmósfera, como se muestra en la Figura 19. Se tienen en cuenta las siguientes consideraciones de acuerdo con el principio de Bernoulli:

- El flujo es incompresible e irrotacional (excepto muy cerca de las paredes).

¹² O. KATSUHIKO, Ingeniería de Control Moderna, 5.a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010, p. 101.

- El agua drena con lentitud suficiente como para que se pueda considerar aproximadamente como estacionario.
- Las pérdidas debidas a las irreversibilidades en la región de la salida del agua se aprecian.

Figura 19. Descarga de tanque abierto a la atmósfera.



Fuente: ÇENGEL, Y.A. CIMBALA, J.M. Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4.^a ed. México D.F: McGraw Hill., 2018

Se aplica la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2, en donde el punto 1 se ubica en la parte superior del tanque y el punto 2 en el agujero de la parte inferior del tanque. Quedando de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (3. 1)$$

El tanque al encontrarse abierto a la atmósfera, P_1 y P_2 son iguales al tratarse de la presión atmosférica, lo que anularía ambos términos de la ecuación; v_1 se considera cero ya que el sistema inicia desde un estado de reposo, además de que el diámetro del tanque es demasiado grande en relación con el diámetro de salida; z_2 es considerado el punto de referencia de altura, por consecuencia el valor es cero. Con estas consideraciones, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$z_1 = \frac{v_2^2}{2g}$$

Donde, despejando v_2 , se tiene que:

$$v_2 = \sqrt{2gz_1} \quad (3. 2)$$

La cual describe la ecuación de Torricelli. Entonces, el flujo de salida de un tanque para el caso de una sección transversal S es:

$$Q = vS$$

Reemplazando v , se tiene que:

$$Q = S\sqrt{2gH}$$

Agrupando S y g en un solo término ya que se trata de valores constantes, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$Q = K\sqrt{H} \quad (3. 3)$$

donde Q : Caudal del líquido en estado estable, m^3/seg

K : Coeficiente, $m^{2,5}/\text{seg}$

H : Altura en estado estacionario, m

De manera general, si el flujo pasa por una válvula de control en estado estacionario, el caudal que atraviesa la válvula se expresa a continuación:

$$Q_v = K_v A_s \sqrt{\Delta P} \quad (3. 4)$$

Donde,

Q_v : Flujo a través de una válvula.

K_v : Coeficiente para el flujo de una válvula.

A_s : Área de paso.

ΔP : Presión diferencial a través de la válvula.

En donde se observa que cuando la diferencia de presión a través de la válvula es constante, el caudal a través de la válvula es proporcional al área de apertura de la válvula. En la práctica se utilizan válvulas con un comportamiento que permiten linealizar el caudal de acuerdo con el porcentaje de apertura que la válvula posea. Dejando como resultado la siguiente expresión:

$$Q_s = K_v a \sqrt{H} \quad (3.5)$$

Donde,

$$K_v: S\sqrt{2g}$$

a : Porcentaje de apertura de la válvula.

3.1.1 Resistencia hidráulica. “La resistencia R para el flujo de líquido en tal tubo se define como el cambio en la diferencia de nivel (la diferencia entre el nivel de líquido en los dos tanques) necesaria para producir un cambio de una unidad en el caudal”¹³, es decir,

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de nivel, m}}{\text{cambio en la velocidad del flujo, } \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}}$$

¹³ Ibid., p. 101.

Como la relación entre el caudal y la diferencia de nivel es distinta flujos laminares y flujos turbulentos, en lo sucesivo se consideran ambos casos.

Si el flujo a través de esta restricción es laminar, la relación que existe entre el caudal en estado estacionario y la altura en estado estacionario en el nivel de la restricción se obtiene por:

$$Q = KH$$

donde Q : Caudal del líquido en estado estacionario, m³/seg

K : Coeficiente, m²/seg

H : Altura en estado estacionario, m

La resistencia R_l para el flujo laminar se obtiene como:

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q}$$

Si el flujo es turbulento a través de la restricción, el caudal en estado estacionario se obtiene como se expresa en la ecuación (3. 3):

La resistencia R_t para el flujo turbulento se obtiene a partir de:

$$R_t = \frac{dH}{dQ}$$

Derivando la ecuación (3. 3) se obtiene:

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH$$

Se tiene que

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q}$$

Por lo tanto,

$$R_t = \frac{2H}{Q}$$

Si los cambios en la altura y el caudal, a partir de sus valores respectivos en estado estacionario son pequeños, es válido realizar esta linealización.

3.1.2 Capacitancia hidráulica. “La capacitancia C de un tanque se define como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado, para producir un cambio de una unidad en el potencial (altura)”¹⁴.

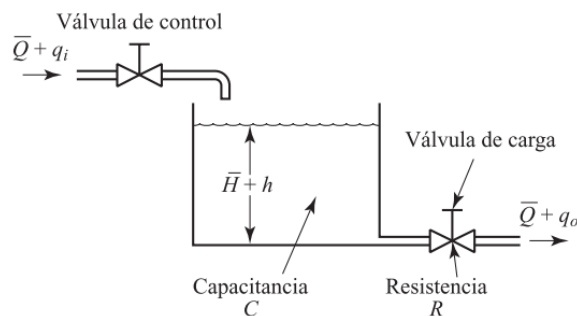
$$C = \frac{\text{cambio en el líquido almacenado, m}^3}{\text{cambio en la altura, m}}$$

Debe señalarse que la capacidad (m^3) y la capacitancia (m^2) son distintas. Para este caso, el área transversal del tanque es su capacitancia. Si esta es constante, la capacitancia se mantiene constante para cualquier nivel.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

3.2.1 Modelo matemático de sistemas de fluidos. Considérese el sistema que aparece en la Figura 20.

Figura 20. Sistema de nivel de líquidos



Fuente: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5.^a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010

¹⁴ Ibid., p. 103.

Las variables se definen del siguiente modo:

\bar{Q} : caudal en estado estable (antes de que haya ocurrido un cambio), m^3/seg

q_i : desviación pequeña de la velocidad de entrada de su valor en estado estable, m^3/seg

q_o : desviación pequeña de la velocidad de salida de su valor en estado estable, m^3/seg

\bar{H} = altura en estado estable (antes de que haya ocurrido un cambio), m

h = desviación pequeña de la altura a partir de su valor en estado estable, m

Para tener el modelo matemático se parte del principio de conservación de la masa, que, aplicado a la dinámica de un tanque, se obtiene:

$$V_{\text{almacenado}} = V_{\text{entra}} - V_{\text{sale}} \quad (3.6)$$

El volumen de un tanque se expresa cómo:

$$V = AH$$

Donde,

A : Área de la sección transversal, m^2

H : Altura, m

Para este caso, el área del tanque es constante, y esta corresponde a la capacitancia hidráulica, por lo tanto:

$$\frac{dV}{dt} = C \frac{dH}{dt}$$

“A partir de la suposición de que el sistema es lineal o linealizado, la ecuación diferencial de este sistema se obtiene del modo siguiente. Como el caudal de entrada menos el

caudal de salida durante el pequeño intervalo de tiempo dt es igual a la cantidad adicional almacenada en el tanque”¹⁵, se aprecia que:

$$C dh = (q_i - q_o)dt$$

Partiendo de la definición de resistencia, la relación que existe entre q_o y h se alcanza por medio de

$$q_o = \frac{h}{R}$$

La ecuación diferencial para este sistema para un valor constante de R se convierte en

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (3. 7)$$

Nótese que RC es la constante del tiempo del sistema. Utilizando la transformada de Laplace en ambas partes de la ecuación (3. 7), y se considera la condición inicial de cero, se obtiene

$$(RCs + 1)H(s) = RQ_i(s) \quad \text{donde} \quad H(s) = \mathcal{L}\{h\} \quad \text{y} \quad Q_i(s) = \mathcal{L}\{q_i\}$$

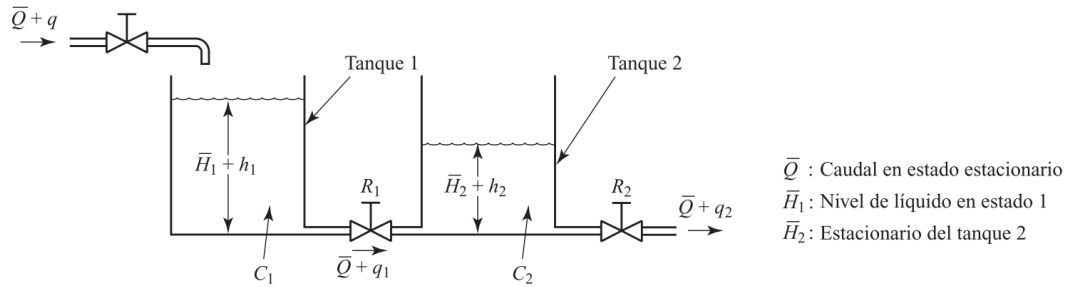
Si q_i es considerada la entrada y h la salida, la función de transferencia del sistema es:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (3. 8)$$

Si se considera el sistema como uno en el que interactúan dos tanques como se muestra en la Figura 21. La función de transferencia de la planta no se deriva del producto de ambas funciones de transferencia de primer orden.

¹⁵ Ibid., p. 103.

Figura 21. Sistema de nivel de líquidos con interacción.



Fuente: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5.^a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010

A partir de este punto, se supondrán únicamente pequeñas variaciones de las variables respecto a sus valores en estado estable. Empleando la simbología establecida en la Figura 21, se obtienen las siguientes ecuaciones para este sistema:

$$\frac{h_1 - h_2}{R_1} = q_1 \quad (3.9)$$

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 \quad (3.10)$$

$$\frac{h_2}{R_2} = q_2 \quad (3.11)$$

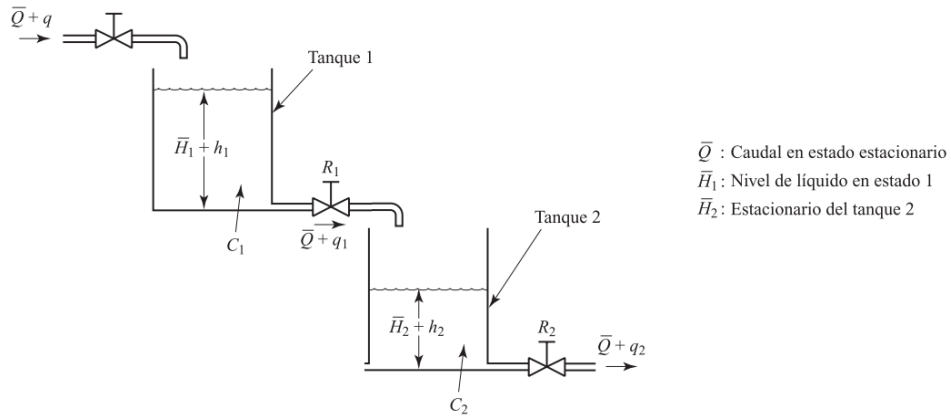
$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 \quad (3.12)$$

Si q se toma como la entrada y q_2 como la salida, la función de transferencia del sistema es:

$$\frac{Q_2(s)}{Q(s)} = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2 s^2 + (C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2) s + 1} \quad (3.13)$$

Para este caso, la configuración de tanques trabajada es una de tanques en cascada como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Sistema de nivel de líquido con interacción en cascada.



Suponiendo de igual forma únicamente pequeñas variaciones de las variables respecto a sus valores en estado estacionario. De acuerdo con los símbolos establecidos en la Figura 22, se obtienen las siguientes ecuaciones para este sistema en cascada:

Para el tanque 1,

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 \quad (3.14)$$

$$q_1 = K_{v1} a_1 \sqrt{h_1} \quad (3.15)$$

Reemplazando el valor de q_1 la ecuación queda de la siguiente forma:

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - K_{v1} a_1 \sqrt{h_1} \quad (3.16)$$

Del mismo modo para el tanque 2,

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 \quad (3.17)$$

$$q_2 = K_{v2} a_2 \sqrt{h_2} \quad (3.18)$$

Reemplazando el valor de q_2 la ecuación queda de la siguiente forma:

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = K_{v1} a_1 \sqrt{h_1} - K_{v2} a_2 \sqrt{h_2} \quad (3.19)$$

Donde $K_{v1} = K_{v2}$ ya que para el sistema trabajado las válvulas son de la misma referencia.

Una vez identificadas las ecuaciones que representan el sistema, se procede a identificar los estados $[x]$, entradas $[u]$ y salidas $[y]$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}$$

$$u = [q_i]$$

$$y = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}$$

Se definen dos salidas, pero para el sistema propuesto solo se desea controlar una salida a la vez.

Luego se obtiene las derivadas de los estados, buscando obtener la siguiente ecuación:

$$\dot{x}_1 = Ax + Bu \quad (3. 20)$$

Por lo tanto:

$$\dot{x}_1 = \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{C_1} [q_i - q_1] = \frac{1}{C_1} \left[K_B u - \frac{x_1}{R_1} \right]$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{C_2} [q_1 - q_2] = \frac{1}{C_2} \left[\frac{x_1}{R_1} - \frac{x_2}{R_2} \right]$$

Escribiendo nuevamente la ecuación (3. 20) en forma de matrices se tiene qué:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_2} & -\frac{1}{R_1 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_B \\ C_1 \\ 0 \end{bmatrix} [u] \quad (3. 21)$$

Con la ecuación obtenida, ahora se busca obtener la ecuación de salidas, se tiene qué:

$$y = Cx + Du \quad (3.22)$$

Si se desea h_1 como salida, se tiene que:

$$[y_1] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + [0][u] \quad (3.23)$$

Por otra parte, si se quiere h_2 como salida, se tiene que:

$$[y_1] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + [0][u] \quad (3.24)$$

3.2.2 Modelamiento y validación del sistema. La obtención de la ecuación de transferencia que define el sistema se realizó empleando el modelo de caja gris.

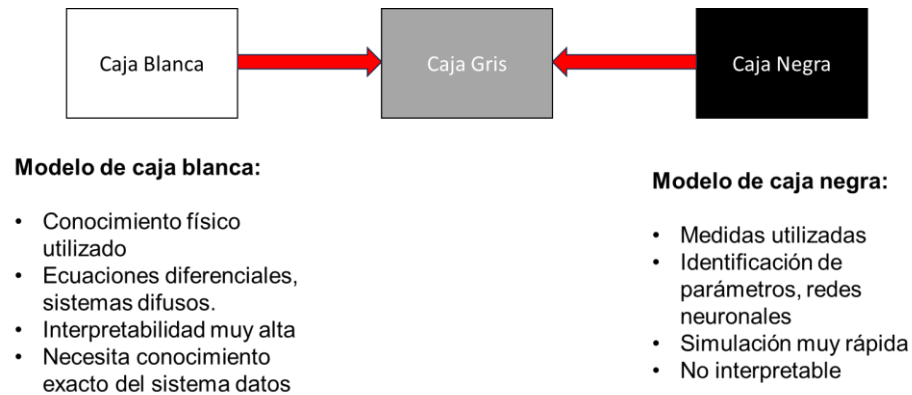
El modelo de caja gris combina algunas estructuras teóricas con datos para completar el modelo. Las construcciones teóricas pueden variar desde información sobre la fluidez de los resultados hasta modelos que solo requieren valores de parámetros de los datos o la literatura existente. Por lo tanto, casi todos los modelos son modelos de caja gris, a diferencia de los modelos de caja negra, que no asumen una forma de modelo, o de los modelos de caja blanca, que son puramente teóricos.

Por supuesto, las nociones de modelos de caja blanca y caja negra son idealistas. En realidad, el modelado siempre es algo intermedio entre estos dos puntos de vista extremos: incluso si tenemos alguna idea estructural de nuestro sistema real y queremos aplicar el modelado de caja blanca, a menudo no conocemos los parámetros exactos en las ecuaciones derivadas. Estos parámetros deben identificarse mediante mediciones y optimización. O, de manera reversible, el conjunto de modelos posibles para el modelado de caja negra a menudo está guiado por algún conocimiento sobre el comportamiento fenomenológico del sistema dado. En todos los casos, en realidad estamos utilizando un tipo de modelo llamado modelo de caja gris, que constituye una mezcla entre esquemas de modelo de caja blanca y caja negra.¹⁶

¹⁶ HAUTH, Jan. Grey-Box Modelling for Nonlinear Systems. [En línea]. Tesis doctoral. Kaiserslautern: Fachbereich Mathematik der Universität Kaiserslautern, 2008. [Consultado 26 septiembre 2023]. Disponible en: < <https://kluedo.ub.rptu.de/frontdoor/index/index/year/2008/docId/2045>>

Lo anterior se puede visualizar en la Figura 23.

Figura 23. Características de cada técnica de modelamiento



Los diversos tipos de modelado presentan ventajas y desventajas. Las estructuras del modelado de caja blanca ofrecen modelos altamente precisos. Sin embargo, a medida que la complejidad del sistema real aumenta, también lo hace la complejidad del modelo, lo que resulta en mayores esfuerzos en términos de tiempo y costos tanto para su implementación como para su ejecución. Por otro lado, los modelos de caja negra, que no son interpretables, a menudo requieren menos esfuerzo en comparación. La desventaja de este tipo radica en la dificultad para incorporar diversos tipos de conocimiento fenomenológico o cualitativo que generalmente se posee sobre el sistema real. Esto puede dar lugar a parámetros mal ajustados.

Los modelos de caja gris brindan la posibilidad de incluir tanto conocimiento físico para el modelado estructural como conocimiento de datos para la elección, identificación y adaptación de los parámetros incluidos.

3.3 CALCULO DE PARAMETROS

3.3.1 Capacitancia. La capacitancia, como se mencionó anteriormente, corresponde al área transversal del tanque. Los tanques tienen una base rectangular, por lo tanto, su capacitancia se determina de la siguiente forma:

$$C = A = a \cdot l \quad [cm^2]$$

La capacitancia para cada uno de los tanques se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Cálculo de la capacitancia de cada tanque.

Tanque	Ancho [cm]	Largo [cm]	Capacitancia [cm ²]
Tanque 1	4	4	16
Tanque 2	4	4	16

3.3.2 Resistencia hidráulica. La obtención de las resistencias hidráulicas se obtuvo de la siguiente manera:

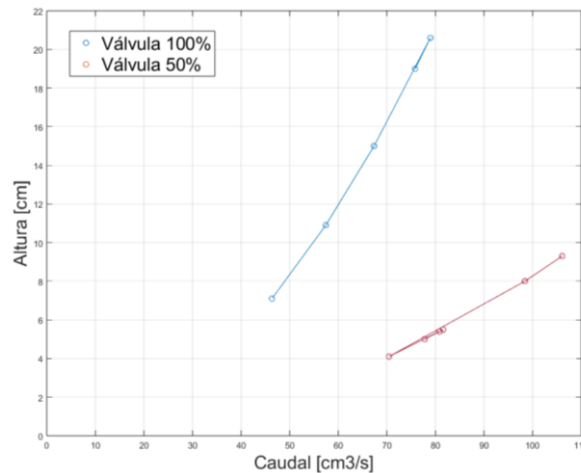
Para la salida del Tanque 1 se configuró la válvula manual completamente abierta y se varió la señal PWM hasta llegar al estado estacionario en cada caso. Luego se tomó dato de la altura estable para cada valor de PWM y utilizando la ecuación (3. 5) se calcularon los valores para el caudal. Obteniendo los datos evidenciados en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros para la obtención de la resistencia hidráulica en la válvula manual.

PWM	Altura [cm]	Caudal [cm ³ /s]
130	5	77,79
150	5,4	80,84
170	5,5	81,59
190	4,1	70,44
210	4,1	70,44
230	8	98,36
255	9,3	106,1

Se repitió el mismo proceso cerrando la válvula a la mitad y se realizó un gráfico observando cómo se comporta el caudal de acuerdo con la altura. Los resultados se aprecian en la Figura 24.

Figura 24. Comportamiento del caudal con respecto a la altura de referencia



En la Figura 24 se puede observar que la tendencia del comportamiento es aproximadamente lineal y dado que la resistencia está dada por la expresión

$$R_h = \frac{dH}{dQ},$$

la resistencia podría tomarse constante a cualquier altura para cada válvula.

Para este caso, la resistencia se deja expresada en función de la altura del tanque utilizando (3. 3):

$$R_h = \frac{H}{K_v \cdot a \cdot \sqrt{H}} = \frac{\sqrt{H}}{K_v \cdot a} \quad (3. 25)$$

3.3.3 Estimación del modelo de caja gris MATLAB®. Para realizar la estimación del sistema se utilizó la herramienta *Grey-Box Model Estimation**, la cual estima coeficientes de ecuaciones diferenciales, en diferencias y en espacio de estados lineales y no lineales. Específicamente se utilizó “*nlgreyest*”, donde se estiman los parámetros del modelo de caja gris no lineal.

Para alimentar el modelo de caja gris se realizó un muestreo del sistema durante aproximadamente 180 segundos, en donde se recopilaron 6190 datos de PWM, altura del tanque 1 o superior y altura del tanque 2 o inferior.

Las variables que se querían estimar era el porcentaje de apertura de las válvulas (a_1 , a_2) expresado en área y medido en $[cm^2]$, donde se aproximó un valor de 0.2827 $[cm^2]$ correspondiente al 100% de apertura de la válvula, sin embargo, este valor varía ya que se tienen accesorios y estos generan pérdidas, turbulencias y cambios en el flujo de nuestro sistema, lo cual afecta el comportamiento de este.

En el apartado “Estimate Nonlinear Grey-Box Model” de MATLAB® se describe como se debe estructurar.

Utilizando las ecuaciones (3. 10) y (3. 12) se describió el modelo en salidas y estados

$$dx = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{A_1}\right) \cdot (k \cdot u(1) - a_1 \sqrt{2g \cdot x(1)}) \\ \left(\frac{1}{A_2}\right) \cdot (a_1 \sqrt{2g \cdot x(1)} - a_2 \sqrt{2g \cdot x(2)}) \end{bmatrix} \quad (3. 26)$$

$$y = \begin{bmatrix} x(1) + 3 \\ x(2) + 3 \end{bmatrix} \quad (3. 27)$$

De lo cual se obtuvo los resultados que se observan en la Figura 25 y Figura 26:

* Software de MathWorks®, Documentación: <https://la.mathworks.com/help/ident/grey-box-model-estimation.html?s_tid=CRUX_lftnav>

Figura 25. Comportamiento del tanque Superior.

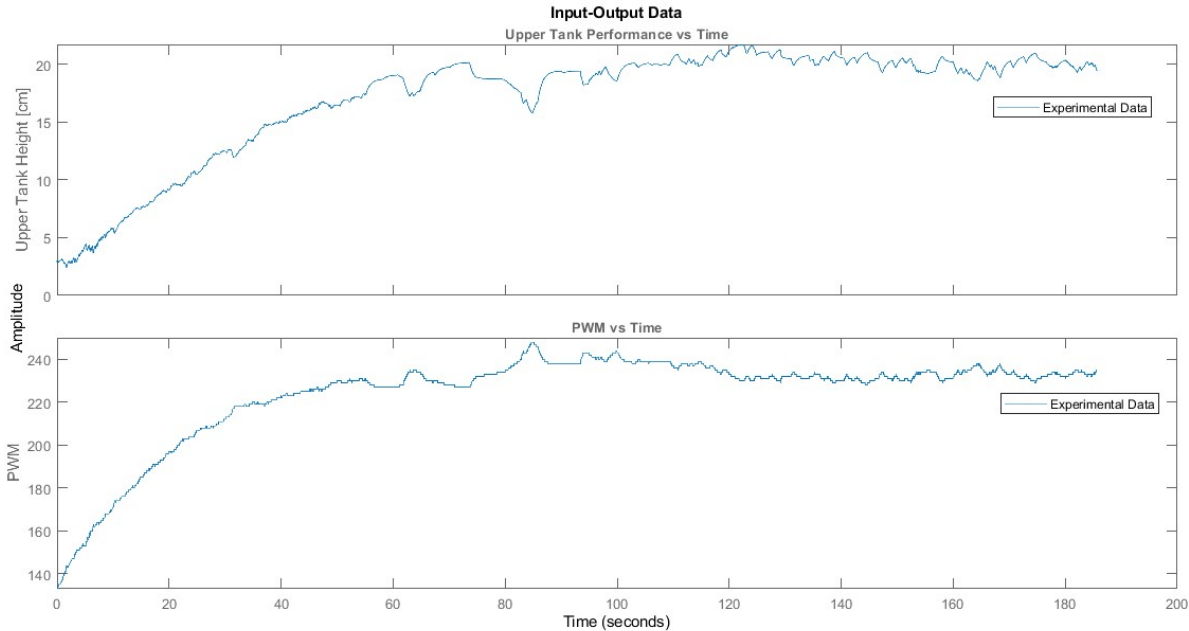
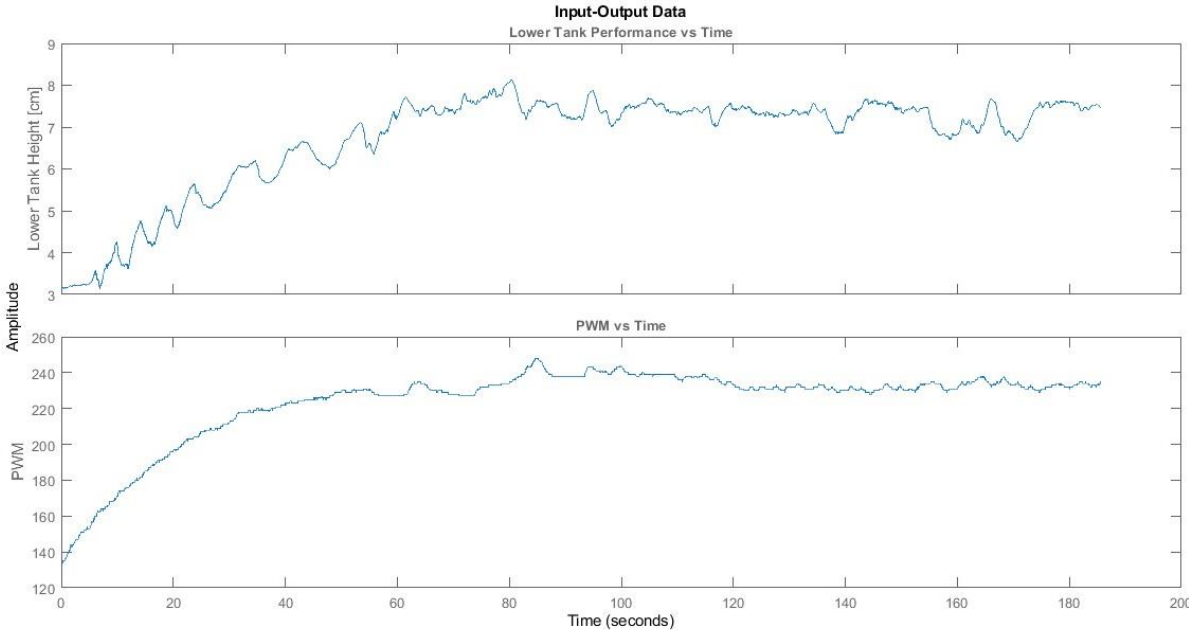
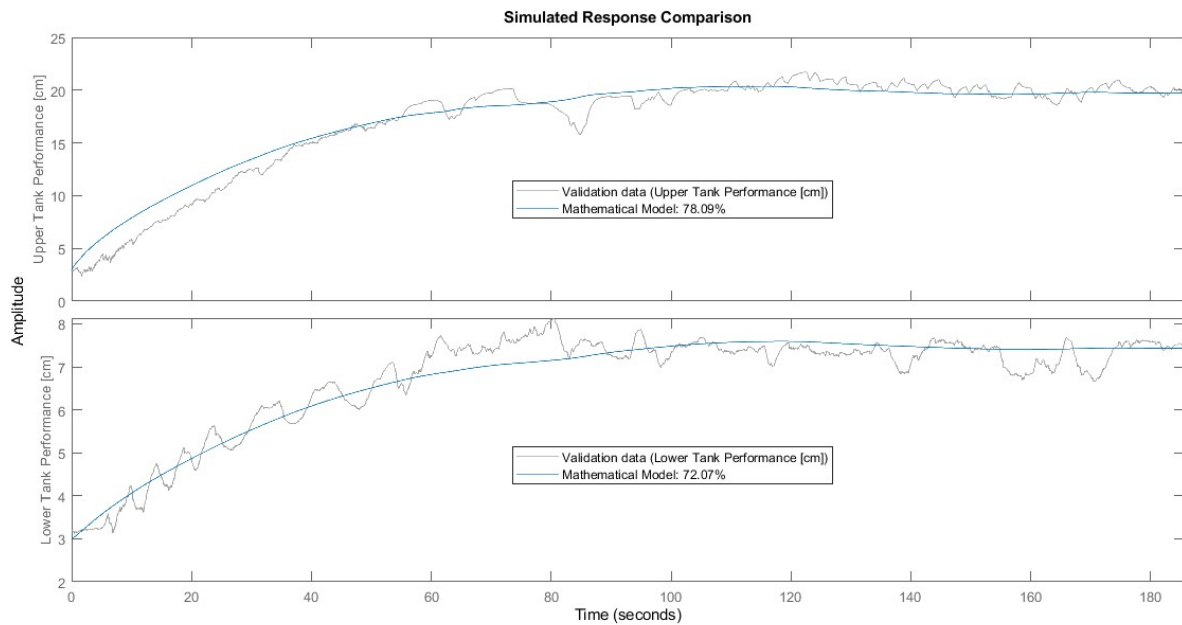


Figura 26. Comportamiento del tanque Inferior.



Posteriormente se procesaron los datos recopilados y se obtuvo una validación del modelo matemático con respecto al comportamiento que el sistema tiene en realidad, esto se observa a detalle en la Figura 27.

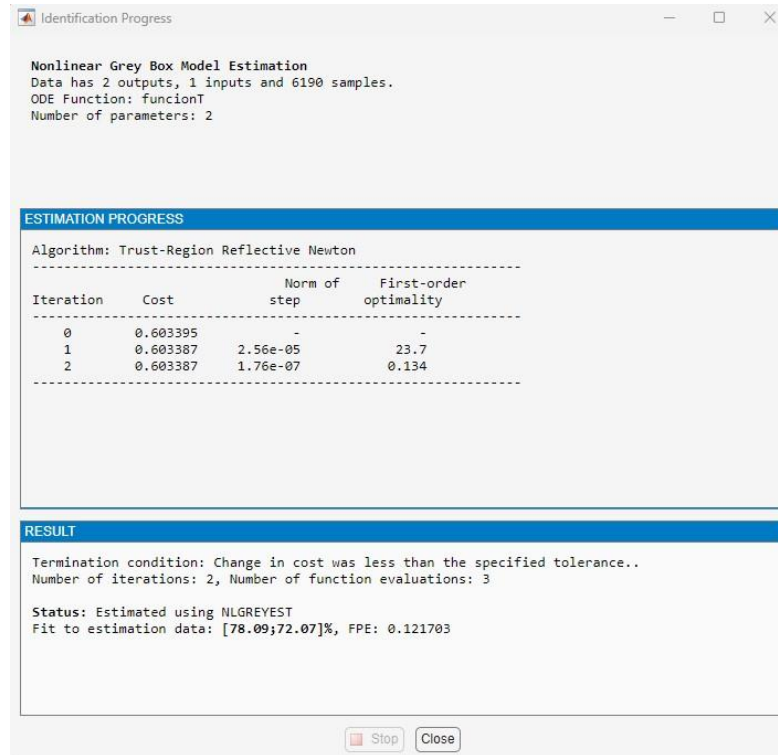
Figura 27. Comportamiento del modelo matemático vs comportamiento real



Como se aprecia en la Figura 27 este modelado se obtuvo un porcentaje de confiabilidad e identificación para el Tanque 1 del 78,09% y para el Tanque 2 del 72,07%.

Dichos resultados los realizó el software utilizando el algoritmo de la Región de Confianza Reflectiva de Newton como se ve en la Figura 28 con el fin de estimar y comparar el comportamiento real con el modelo matemático.

Figura 28. Estimación del modelo Non Linear Mediante Caja Gris



En la estimación se utilizaron valores para las áreas de paso a_1 y a_2 iguales a $0,2827 [cm^2]$, sin embargo, para que el modelo se acercara al sistema real, el software estimó estas áreas con los siguientes valores:

$$a_1 = 0,1587 [cm^2]$$

$$a_2 = 0,3084 [cm^2]$$

3.3.4 Obtención de la función de transferencia para el control del tanque superior.

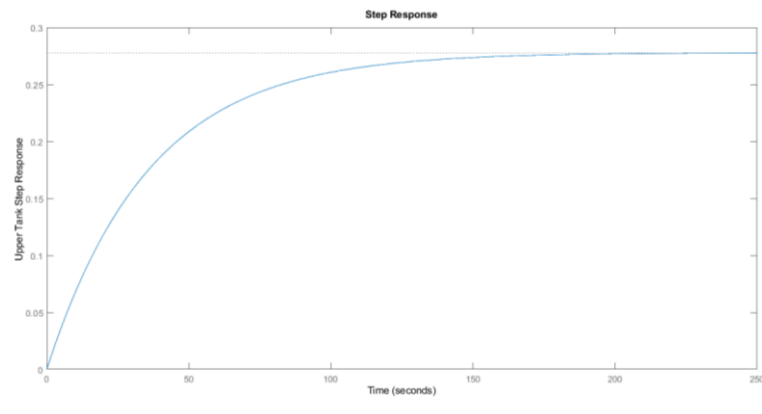
Para obtener la función de transferencia del sistema se alimentó la representación del sistema en espacio de estados con los valores reales y estimados.

Utilizando la herramienta “*ss2tf*” de MATLAB® los espacios de estados se expresa la función de transferencia y poniendo como salida h_1 , se tiene la siguiente función de transferencia.

$$G_{1(s)} = \frac{h_1}{q_i} = \frac{0,007719}{s + 0.04912} \quad (3. 28)$$

El comportamiento de las funciones de transferencia aplicando un escalón es el siguiente:

Figura 29. Comportamiento de G1(s) ante un escalón.



3.3.5 Obtención de las funciones de transferencia para el control del tanque inferior. Para este caso se utilizó el mismo método que se ocupó para el control del tanque superior y se obtuvo las siguientes funciones:

$$G_{1(s)} = \frac{h_1}{q_i} = \frac{0,007719}{s + 0.06341} \quad (3. 29)$$

$$G_{2(s)} = \frac{h_2}{q_i} = \frac{0,006341}{s + 0.2395} \quad (3. 30)$$

Al extraer los polos de las funciones de transferencia se tiene que:

$$s = -0.06341$$

$$s = -0.2395$$

Lo cual indica que se trata de un sistema estable con comportamiento exponencial.

El comportamiento de estas funciones de transferencia aplicando un escalón es el siguiente:

Figura 30. Respuesta de la función G1(s) al escalón

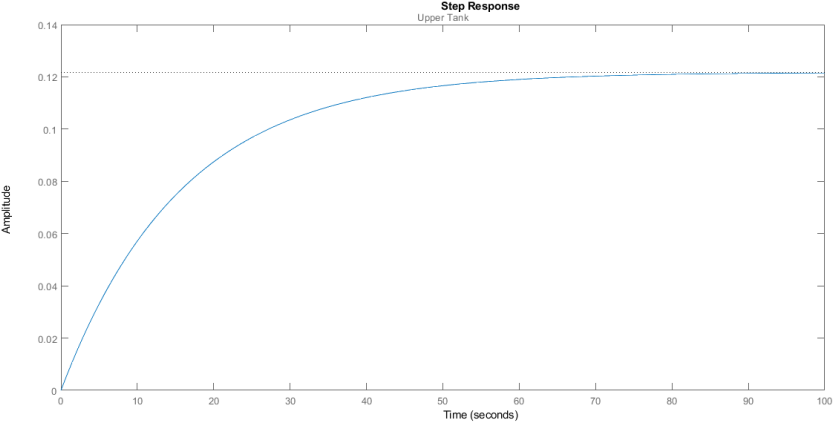
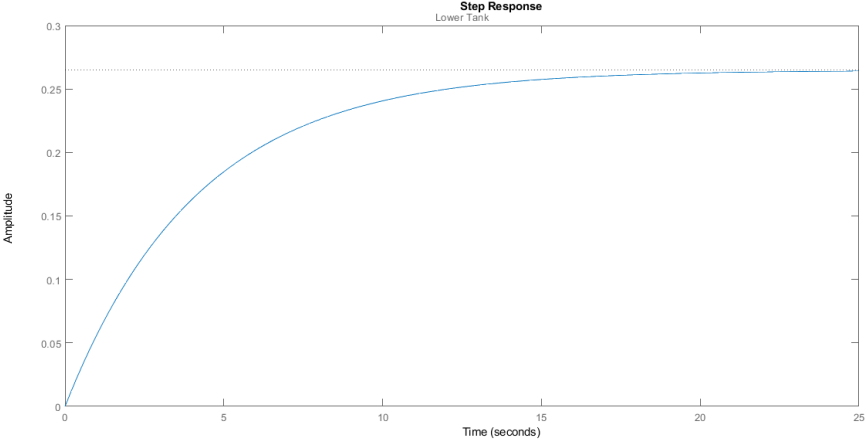


Figura 31. Respuesta de la función G2(s) al escalón



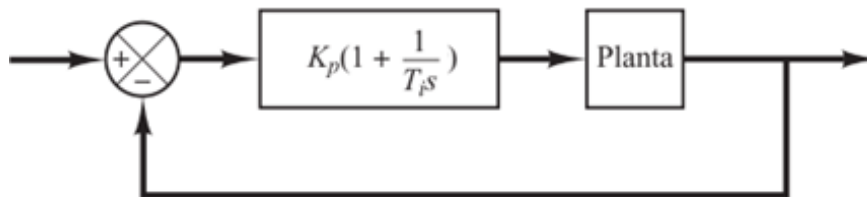
4 SISTEMA DE CONTROL

En este capítulo se expone el proceso implementado para el control de nivel. La obtención de los parámetros del controlador PID parte del modelo que se obtuvo en el capítulo 3. Para el diseño se aplican técnicas de control básico y con la ayuda de MATLAB®* se evidencia su comportamiento.

4.1 CONTROL DE NIVEL EN EL TANQUE 2

Para realizar un control en el nivel del tanque 2 se diseñó un controlador PI. “La utilidad de los controles PI estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control.”¹⁷, es decir, en muchos procesos donde se requiera un control, los controladores PI (básicos y modificados) han llegado a ser la opción que aporta una regulación suficientemente buena.

Figura 32. Control PI para una planta.



Fuente: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5.^a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010

El control en cascada es una estrategia de control compuesta por dos o más lazos de control por retroalimentación que mejora de manera significativa el desempeño del lazo de control, este tipo de control es muy común y útil en las industrias de proceso.

* Software de MathWorks®

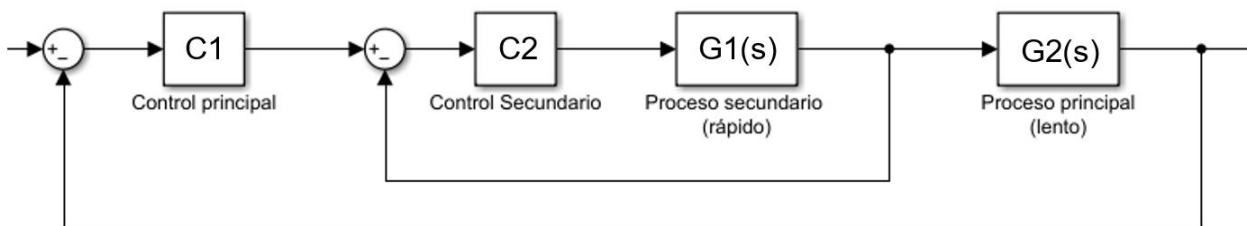
¹⁷ O. KATSUHIKO, Ingeniería de Control Moderna, 5.a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010, p. 567.

Se recomienda la aplicación de un control en cascada en situaciones donde los procesos sean altamente rigurosos, presenten múltiples etapas, tengan una respuesta lenta, se vean afectados por numerosas perturbaciones o involucren mallas de control anidadas.

En términos generales, el controlador que regula la variable principal se conoce como el controlador maestro, mientras que el que controla la variable secundaria se denomina controlador secundario o esclavo.

Un aspecto crucial al momento de diseñar un sistema de control en cascada es garantizar que el circuito secundario tenga una respuesta más rápida que el circuito primario, lo cual es un requisito lógico.

Figura 33. Diagrama de bloques de un control en cascada.



Ahora, se presenta el proceso de diseño de un controlador PID mediante la técnica de Asignación de polos.

4.1.1 Diseño PI Asignación de polos.

Muchas propiedades de un sistema en lazo cerrado se expresan por sus polos. La idea con la asignación de polos es diseñar un controlador que da un sistema en lazo cerrado con polos en lazo cerrado deseados. El método requiere un modelo completo del proceso. Sujeto a algunas condiciones técnicas es posible encontrar un controlador que da los polos en lazo cerrado deseados, a condición de que el controlador sea suficientemente complejo¹⁸.

En el proceso de asignación de polos, es esencial simplificar el modelo matemático del sistema controlado mediante métodos de aproximación. Esto implica seleccionar cuidadosamente los polos del sistema, que son puntos críticos en el dominio de la

¹⁸ ASTROM, Karl; HAGGLUND, Tore. Control PID avanzado, 1.a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2009, p. 184.

frecuencia que afectan la respuesta del sistema. La elección precisa de los polos es fundamental para garantizar que el modelo aproximado sea válido en las frecuencias relevantes para los polos seleccionados.

Además, es importante considerar los puntos donde la función de transferencia se anula y también influyen en la respuesta del sistema, especialmente en lo que respecta a la respuesta al punto de consigna. Los ceros que surgen del controlador pueden estar influenciados por la ponderación de la señal de referencia, lo que agrega un nivel adicional de complejidad en el diseño del controlador PI.

4.1.1.1 Control PI de un sistema de primer orden. Supóngase que el proceso se puede describir por el siguiente modelo de primer orden.

$$P(s) = \frac{K_p}{1 + sT}$$

que solo posee dos parámetros, la ganancia del proceso K_p y la constante de tiempo T . Sea el proceso controlado por un controlador PI estándar con ponderación del punto de consigna,

$$C(s) = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right)$$

El sistema de lazo cerrado es de segundo orden. La función de transferencia del lazo es

$$G_\ell = P(s)C(s) = \frac{K_p K (1 + sT_i)}{sT_i(1 + sT)}$$

Y el polinomio característico

$$s^2 + \left(\frac{1 + K_p K}{T} \right) s + \frac{K_p K}{T T_i} \quad (4. 1)$$

Como explican los autores Astrom y Hagglund¹⁹ “El sistema de lazo cerrado posee dos polos a los que se les puede dar valores arbitrarios por una elección apropiada de la

¹⁹ Ibid., p. 185.

ganancia K y del tiempo integral T_i del controlador. Ahora supóngase que los polos en lazo cerrado se caracterizan por su amortiguamiento relativo ζ y su frecuencia ω_0 . El polinomio característico en lazo cerrado entonces se hace

$$s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2 \quad (4.2)$$

Identificando los coeficientes de iguales potencias de s en (4.1) y (4.2) se obtiene

$$K = \frac{2\zeta\omega_0T - 1}{K_p}$$

$$T_i = \frac{2\zeta\omega_0T - 1}{\omega_0^2T}$$

$$k_i = \frac{K}{T_i} = \frac{\omega_0^2T}{K_p}$$

Es conveniente usar parámetros ω_0 y ζ como parámetros de diseño; ω_0 determina la velocidad de respuesta y ζ determina la forma de la respuesta.

4.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR TANQUE SUPERIOR

Utilizando la teoría del control PI para un sistema de primer orden se procedió a desarrollar el compensador para el primer tanque, de acuerdo con su función de transferencia (3.28).

Como criterios de diseño del controlador se optó por dar un tiempo de establecimiento de 50 [s] y se espera tener un máximo pico de 5%.

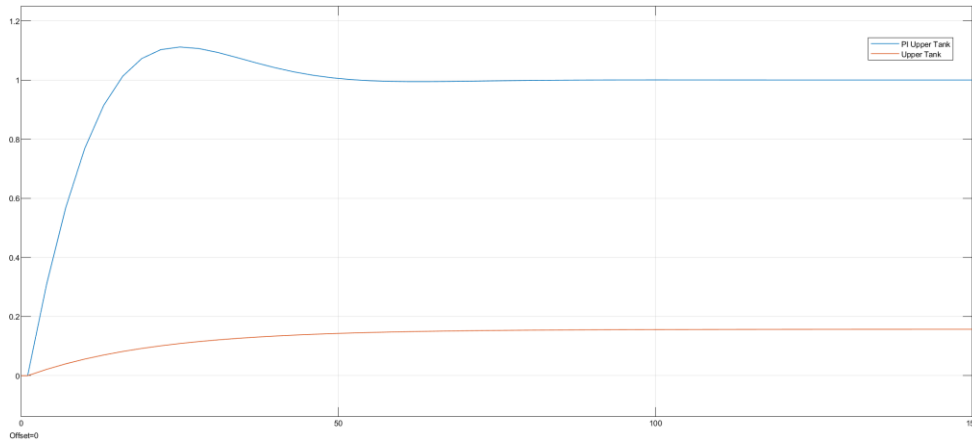
Con lo cual se obtuvieron las siguientes ganancias para el compensador:

$$P = 14,3650$$

$$I = 1,7410$$

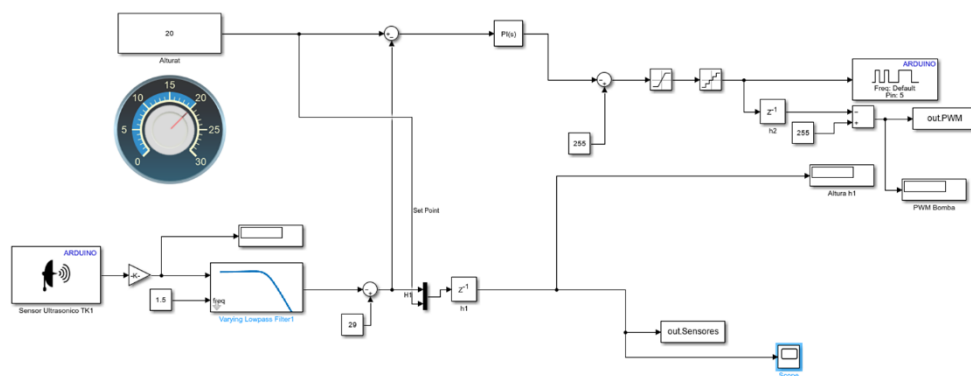
Implementado el controlador al lazo cerrado, se logra ver que el controlador cumple con las consideraciones de diseño, como se ve en la Figura 34.

Figura 34. Respuesta al escalón por parte del modelo matemático antes y después de implementar el control PI



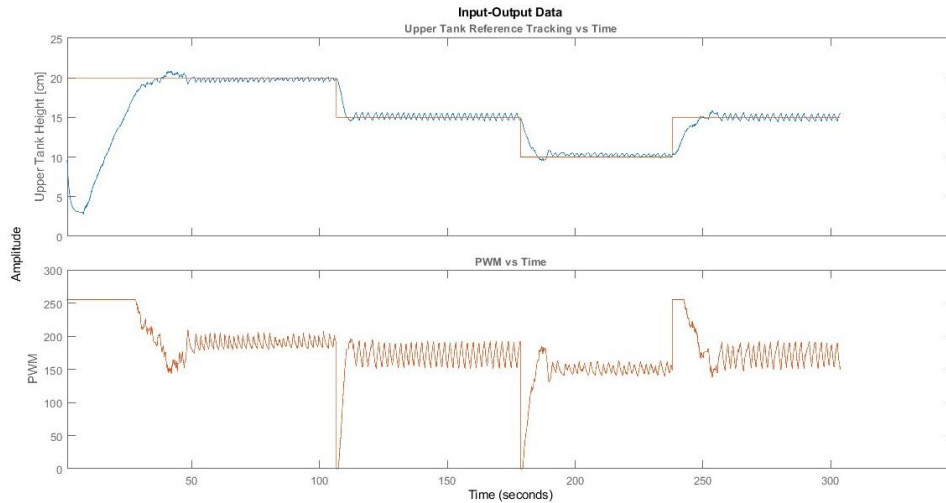
4.2.1 Implementación del control en el modelo real del tanque superior. Para realizar el control del tanque superior se utilizó la herramienta de MATLAB® “*Simulink Support Package for Arduino Hardware*” mediante un diagrama de bloques para establecer la implementación del control en el sistema real, el cual se observa en la Figura 35.

Figura 35. Diagrama de bloques para el control PI del tanque superior.



Con esto se hizo una prueba para el seguimiento de referencias de control de nivel en el tanque superior como se observa en la Figura 36.

Figura 36. Seguimiento de referencias del modelo matemático real en el tanque superior.



En la Figura 36 se observa una buena respuesta del sistema con la implementación del controlador. Inicialmente se estableció una referencia de 20 [cm] de nivel, el cual fue alcanzado y se estableció pasados los 100 segundos. Posteriormente, se disminuyó la referencia a 15 [cm] y el sistema se estableció en poco tiempo, luego se realizaron otras variaciones a la referencia y el sistema tuvo buena respuesta a cada una de las asignadas.

4.3 METODO DE CONTROL PARA TANQUE INFERIOR MEDIANTE CONTROL EN CASCADA

Para la obtención de las funciones de transferencia se tuvo en cuenta el hecho de que la planta trabaja en cascada, en donde el proceso principal es el control del tanque inferior y es lento debido a que el fluido debe pasar primero por el tanque superior, el cual es el proceso secundario.

En la sintonización del controlador se utilizó la herramienta de MATLAB® “*sisotool*”, la cual permite diseñar controladores de una única entrada y salida (SISO). En el Anexo B se describe el proceso que se llevó a cabo para obtener las ganancias de los controladores del proceso, los cuales son los siguientes:

$$P_1 = 17.73$$

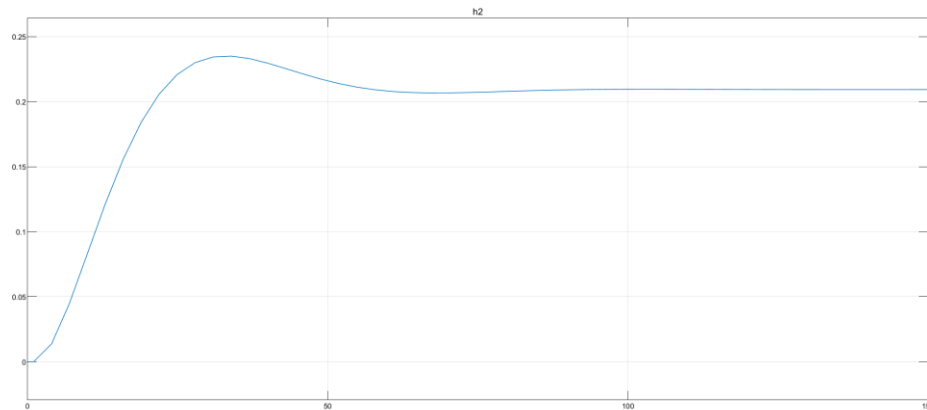
$$I_1 = 0.6$$

$$P_2 = 18.18$$

$$I_2 = 0.6$$

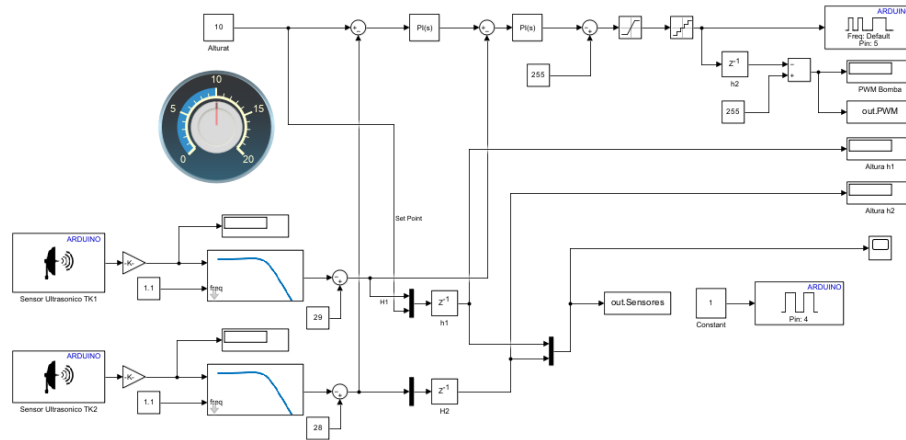
Implementando los controladores, el proceso ya se encuentra en condiciones de seguir una referencia asignada. Un ejemplo de esto se puede ver en la Figura 37 en la cual se pone a prueba el sistema para llegar a una referencia unitaria.

Figura 37. Respuesta del sistema de control en cascada ante un escalón.



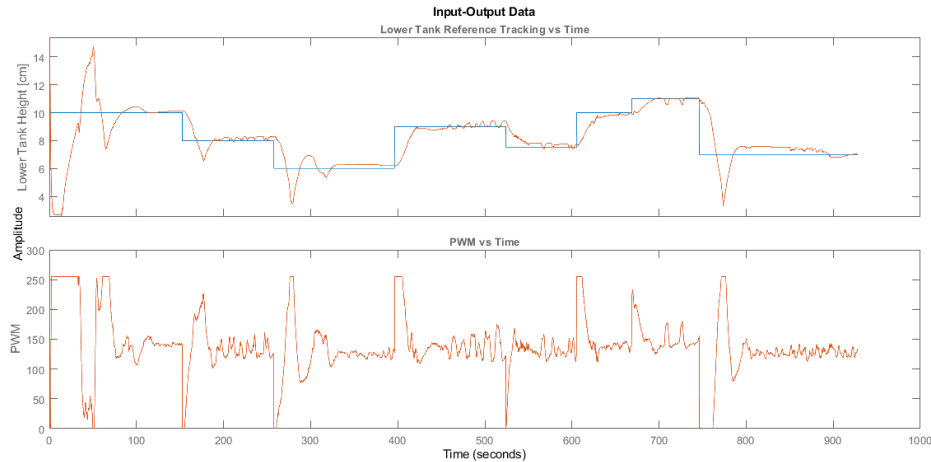
4.3.1 Implementación del control en el modelo real del tanque inferior. Para realizar el control del tanque inferior se utilizó nuevamente la herramienta de MATLAB® “Simulink Support Package for Arduino Hardware” mediante el diagrama de bloques en el que se implementó el control para el sistema real. Como se ve en la Figura 38.

Figura 38. Diagrama de bloques para el control PI del tanque inferior.



Asimismo, se realizó una prueba para el seguimiento de distintas referencias en un periodo de tiempo, como se muestra en la Figura 39.

Figura 39. Seguimiento de referencias del modelo real tanque inferior.



En la Figura 39 se observa el seguimiento de referencias. Iniciando con un valor deseado de nivel de 10 [cm], se evidencia un sobrepico pronunciado y luego se estabiliza el sistema. Posteriormente se tuvo en cuenta nuevas referencias y el sistema logró estabilizar cada una de estas.

Para la operación de este sistema se mantuvo la válvula de salida del tanque inferior con una apertura del 50%.

4.4 PROCEDIMIENTO OPERATIVO

Para llevar a cabo el proceso de control para el tanque superior de manera adecuada, es necesario verificar las siguientes condiciones:

- Mantener un área de trabajo despejada y limpia.
- Verificar que el tanque reservorio cuente con una capacidad de agua que sumerja por completo a la bomba para evitar que la bomba no succione en vacío.
- Abrir las válvulas manuales al 100%.
- Abrir el modelo de Simulink correspondiente “TK1” y establecer comunicación entre el Arduino y el computador.
- Verificar que el interruptor en la caja de control se encuentre apagado.
- Conectar el sistema al suministro de energía.
- Iniciar la marcha de la interfaz de Simulink.
- Verificar que la lectura inicial de los sensores sea la correcta.
- Cambiar la posición del interruptor de la caja de control a encendido.
- Observar a tiempo real la respuesta del sistema mediante el “scope” del programa.
- Apagar el sistema. Para esto se pone nuevamente el interruptor de la caja de control en apagado, se detiene la simulación y se desconecta la fuente del suministro eléctrico.

Para llevar a cabo el proceso de control en el tanque inferior se realizan los mismos pasos exceptuando que en este caso:

- La válvula ubicada a la salida del tanque inferior debe estar un 50% abierta.
- El modelo de Simulink correspondiente a este modelo es “TK2”, se abre y se establece la comunicación entre el Arduino y el computador.

5 DESCRIPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

A continuación, se proporciona una explicación estructurada y detallada sobre el análisis económico contemplado en la realización de este proyecto de grado. En este análisis, se describen los diversos elementos que componen los costos de producción, que incluyen materia prima, costos de insumos, prototipo, licencias de desarrollo, servicios y recursos humanos.

En el Anexo C se detallan las inversiones realizadas para la compra de todos los componentes y materiales requeridos en la construcción de la planta.

Los implementos transformables, no transformables, consumibles y el mecanizado de la estructura fueron patrocinados por la empresa Automática y Robóticas SION S.A.S. Las licencias de MATLAB® y SolidWorks fueron dispuestas por la Universidad, mientras que el transporte, luz e internet fue aportado por los tesistas.

Además, se ha demostrado una gestión económica eficiente y responsable. Inicialmente, se estableció un presupuesto estimado de \$11,612,700 para cubrir los costos asociados con la adquisición de componentes, materiales, mano de obra y otros recursos necesarios. Sin embargo, en el Anexo C refleja que la ejecución del proyecto se llevó a cabo de manera efectiva, lo que resultó en un gasto total significativamente menor al presupuesto inicial. Esta gestión económica prudente no solo refleja la eficiencia en la planificación y ejecución del proyecto, sino que también proporciona una base sólida para futuros desarrollos y optimizaciones en términos de costos.

6 CONCLUSIONES

El presente proyecto de control cumplió satisfactoriamente su objetivo principal de diseñar y construir un sistema de dos tanques acoplados de bajo costo para la validación de técnicas de control en un sistema real.

Se logró desarrollar un mecanismo efectivo para regular el nivel de los tanques a pesar de utilizar válvulas manuales en lugar de las electroválvulas propuestas inicialmente, no obstante, este proyecto sienta las bases para futuras mejoras y desarrollos.

El controlador clásico implementado demostró ser altamente efectivo en la regulación del nivel del líquido en los tanques. Durante las pruebas, el sistema exhibió una respuesta rápida y precisa a las referencias establecidas, lo que es esencial en aplicaciones donde se requiere un control de nivel constante y robusto.

La correcta implementación de un sistema de comunicación interactiva mediante la herramienta “Simulink” de MATLAB® ha demostrado ser fundamental para el monitoreo y análisis de los datos generados por el sistema de tanques. Los datos obtenidos pueden ser fácilmente transferidos y visualizados, lo que ha facilitado en gran medida la comprensión y evaluación del comportamiento del sistema en diferentes condiciones de operación.

7 RECOMENDACIONES

- Con base en el desarrollo del proyecto, se recomienda establecer un límite máximo de variación del nivel de 25 cm en cada tanque. Es importante mantener esta restricción con el fin de garantizar un control efectivo y estable del nivel de cada tanque. Asimismo, contribuirá a prevenir posibles desbordamientos, minimizando los riesgos de desperdicio de agua y algún daño en los componentes electrónicos.
- Con el fin de prevenir posibles daños en ciertos componentes eléctricos, particularmente en la bomba, se sugiere realizar un reemplazo periódico del agua. Esto se debe a que el sistema se encuentra expuesto a la presencia de impurezas ambientales como el polvo, pequeños insectos, entre otros. Mantener una adecuada calidad del agua a través de su renovación contribuirá a garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil de los componentes involucrados.
- Se propone el diseño de prácticas que permitan a los estudiantes realizar experimentos y descubrir por sí mismos las relaciones entre las variables y los efectos de los distintos parámetros de control en tiempo real.
- Se sugiere desarrollar un manual de operaciones y mantenimiento preventivo para el sistema. Este manual debe ser una guía práctica que facilite la operación adecuada de los sistemas y ayudará a prevenir posibles problemas y fallas en el funcionamiento.

8 BIBLIOGRAFÍA

ACELAS SUÁREZ, Silvia Johanna; MENDOZA DÍAZ, Ana Milena. Control de nivel para un sistema de tanques en cascada empleando un PLC Siemens S7-1200. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016. [Consultado 7 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>

ACOSTA GALVIS, Mauricio; GÓMEZ MALAGON, Luis Arturo. Control del nivel de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998. 100p.

ASTROM, Karl; HAGGLUND, Tore. Control PID avanzado, 1.a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2009, 488p.

ARANGO RESTREPO, Sandra Milena. Desarrollo del sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería. [En línea]. Trabajo de grado. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2008. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <<https://www.yumpu.com/es/document/view/13197086>>

BENITEZ MEJÍA, Diego Santiago. Diseño y control de nivel de líquidos. [En línea]. Trabajo de grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1994. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en:< <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5113/1/T2298.pdf>>

CAMACHO FLOREZ, Emmanuel Joseph; PARADA GONZÁLEZ, Luis Carlos. Montaje eléctrico, electrónico y control computarizado de máquinas de ensayos instron del laboratorio de potencia fluida de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad

Industrial de Santander. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2019. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>

ÇENGEL, Y.A. CIMBALA, J.M. Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4.^a ed. México D.F: McGraw Hill., 2018

GIRALDO BETANCUR, Indira Marcela. Diseño y montaje de un control de nivel para una envasadora de lácteos. [En línea]. Trabajo de grado. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2004. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: < <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69899>>

HAUTH, Jan. Grey-Box Modelling for Nonlinear Systems. [En línea]. Tesis doctoral. Kaiserslautern: Fachbereich Mathematik der Universität Kaiserslautern, 2008. [Consultado 26 septiembre 2023]. Disponible en: < <https://kluedo.ub.rptu.de/frontdoor/index/index/year/2008/docId/2045>>

LEYES FRANCO Jennifer Beatriz; NAVARRETE DÍAZ, Darío Rafael. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de LabVIEW. [En línea]. Trabajo de grado. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: < <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/44272>>

MCIELECTRONICS; ¿Cómo funciona el sensor ultrasónico HC-SR04 y cómo se conecta con Arduino? [Sitio Web]. Santiago; Paguayo [Consulta 20 abril 2023]. Disponible en:

<https://cursos.mcielectronics.cl/2022/12/06/como-funciona-el-sensor-ultrasonico-hc-sr04-y-como-se-conecta-con-arduino/>

O. KATSUHIKO, *Ingeniería de Control Moderna*, 5.^a ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010, 904p.

PEÑARANDA, Claudia Yaneth; SILVA, Wilson Reinaldo y GÓMEZ ARIAS, Eulices. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014. [Consultado 7 abril 2023]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>

PÉREZ IZQUIETA, Sara. CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS [en línea]. Trabajo de Grado. Pamplona: Universidad Pública de Navarra, 2011 [consultado el 25, noviembre, 2022]. p. 6. Disponible en: <<http://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/4176>>.

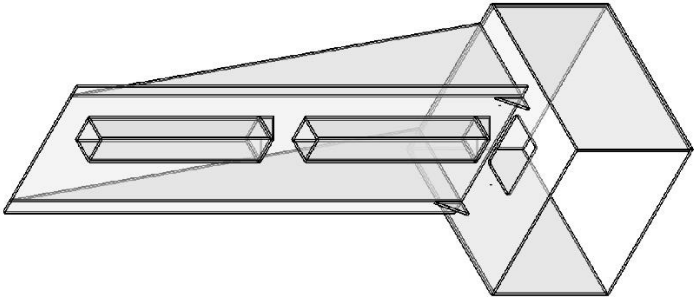
ROBLES RODRIGUEZ, Imer Alberto; GALVIS CHACÓN, Javier Augusto. Instrumentación y puesta en marcha de un sistema de tanques rectangulares para realizar el control de nivel empleando el PLC compactlogix 1769-L32E. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018. [Consultado 7 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>


SMITH, C. CORRIPIO, A. Control Automático de procesos: Teoría y Práctica (1a. Ed.). Limusa Wiley. 1991.

TÉLLEZ FLÓREZ, Carlos Andrés; VÁSQUEZ HENAO, Gabriel Augusto. Implementación de esquemas de regulación automática basados en la variación de apertura de la servoválvula y la velocidad de giro de la bomba, para el banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos del laboratorio de staf UIS. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016. [Consultado 6 abril 2023]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/>>

ANEXOS

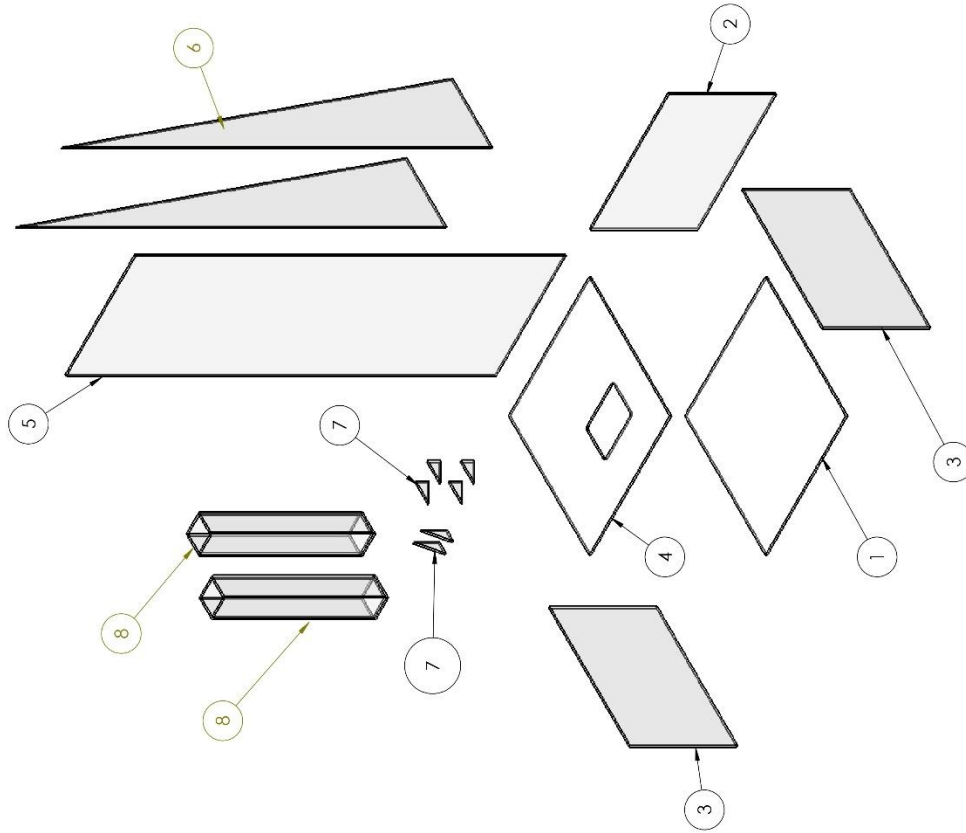
Anexo A. Planos de la estructura del sistema



	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FECHA: 1/09/2023	TÍTULO: SISTEMA DE TANQUES ACORLADOS ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:5	AUTOR: SEBASTIAN BLANCO - JABRIO CHAPARRO
UNIDADES: MM	REVISAS: xxxxx
A3	HOJA: 1/7

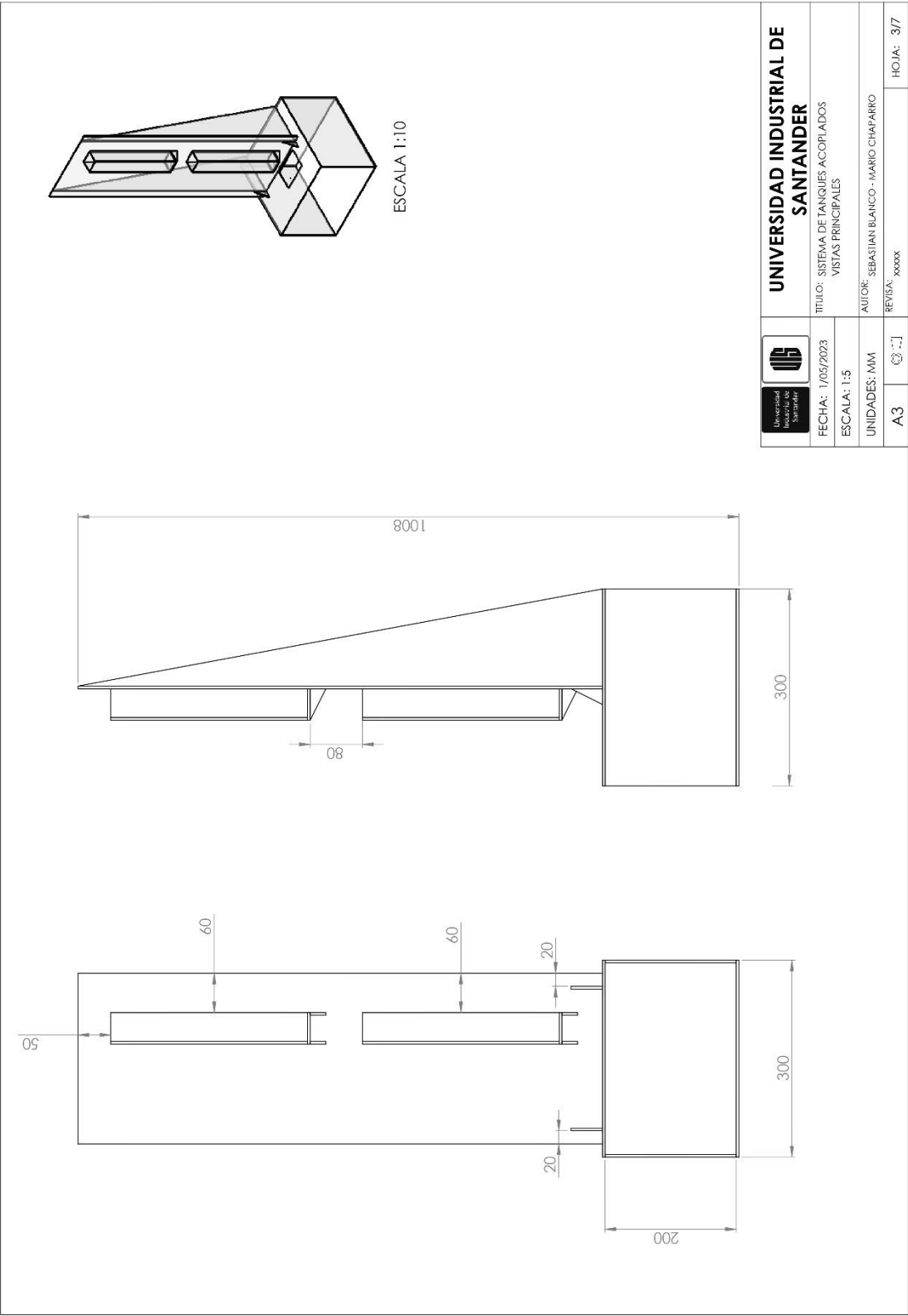
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Nota: El espesor del material es de 4mm

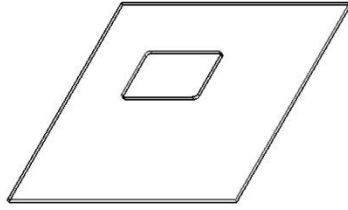
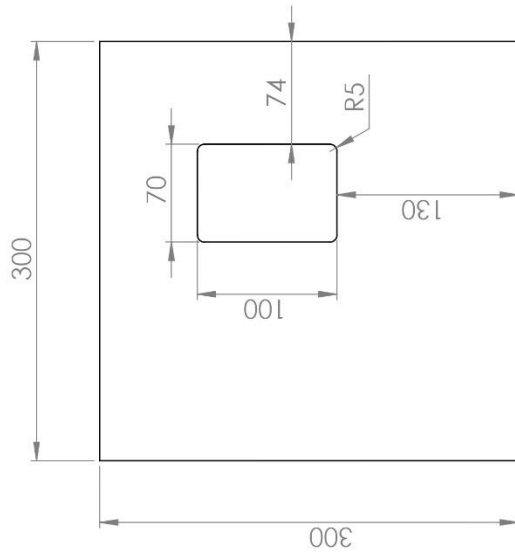


8	TANQUES	2	Ensamble
7	SOPORTES	6	Triangular 48 x 27
6	SOPORTES TRASEROS	2	Triangular 148 x 800
5	LAMINA VERTICAL	1	240 x 800
4	PLACA SUPERIOR	1	300 x 300
3	PLACA TRASERA	1	292 x 200
2	PLACAS LATERALES	2	300 x 200
1	PLACA BASE	1	300 x 300
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			
TÍTULO: SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS EXPLOSIONADO DEL SISTEMA			
FECHA: 1/05/2023			
ESCALA: 1:6			
UNIDADES: MM			
AUTOR: SEBASTIAN BLANCO - MARIO CHAPARRO			
REVISÁ: xxxxx			
A3			HOJA 2/17

Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.






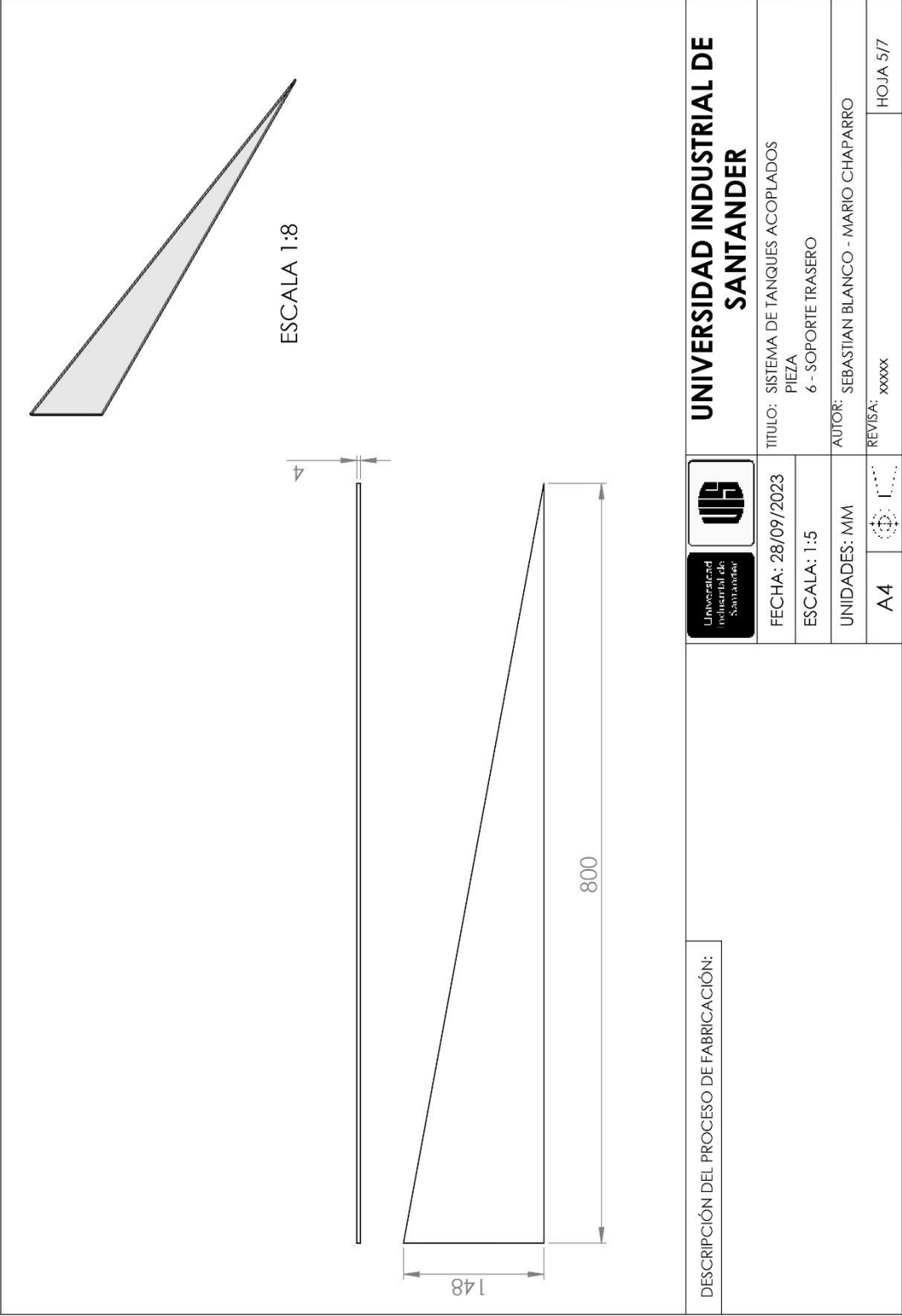
Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.



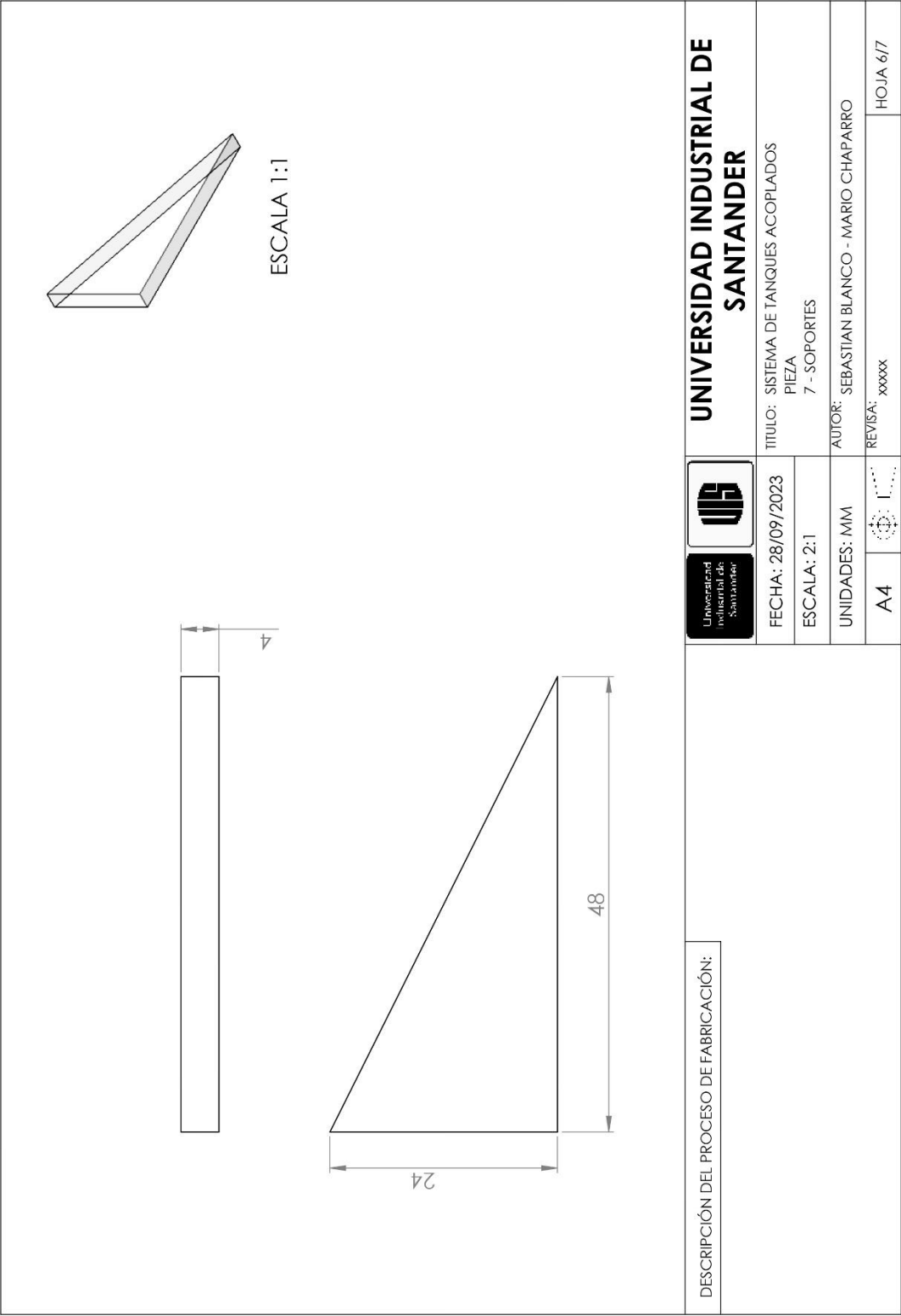
ESCALA 1:6

Nota: Redondeos de 5mm en el agujero

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:		 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
		FECHA: 28/09/2023	TITULO: SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS		
		ESCALA: 1:4	PIEZA 4 - PLACA SUPERIOR		
		UNIDADES: MM	AUTOR: SEBASTIAN BLANCO - MARIO CHAPARRO		
A4			REVISIA: xxxxx		HOJA 4/7



Producto SOLIDWORKS Educativa. Solo para uso en la enseñanza.



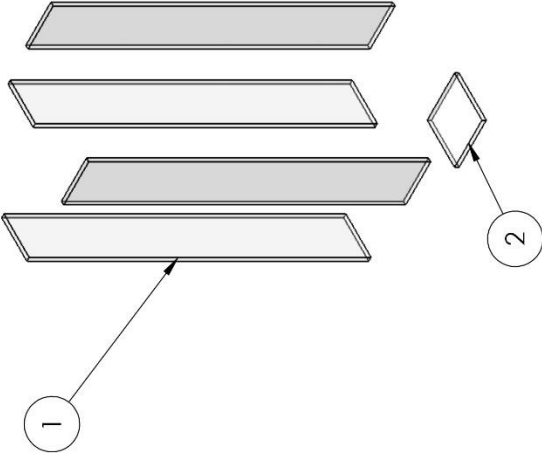




Diagram showing exploded view of components. Callout 1 points to a side panel, and callout 2 points to a diamond-shaped gasket.

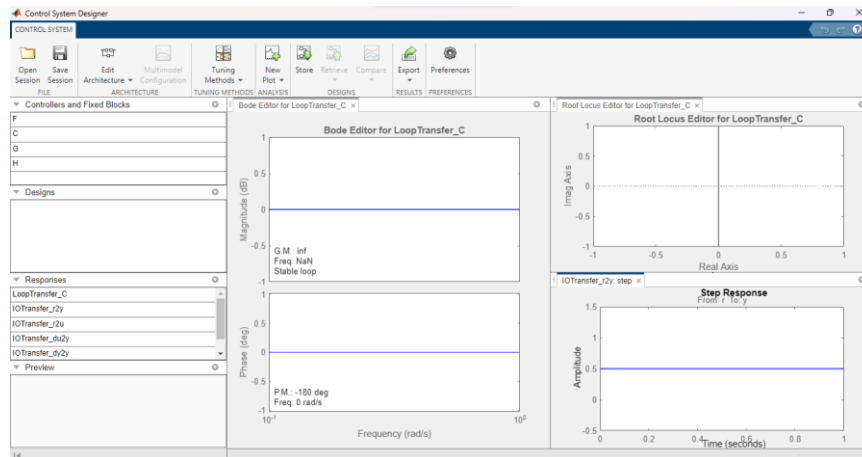


3D perspective view of the assembled rectangular tank.

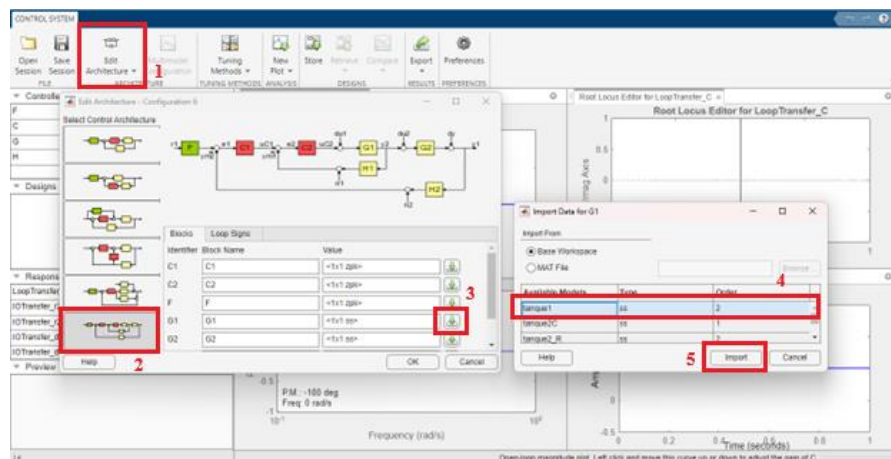
8.2	TAPA INFERIOR	2	48 x 48
8.1	LAMINA LATERAL	8	44 x 300
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT.	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
TÍTULO: SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS			
FECHA: 28/09/2023			
ENSAMBLE			
ESCALA: 1:4			
UNIDADES: MM			
AUTOR: SEBASTIAN BLANCO - MARIO CHAPARRO			
REVISIÓN: xxxxx			
A4			HOJA 7/7

Anexo B. Paso a paso para diseñar un controlador con la herramienta "Sisotool"

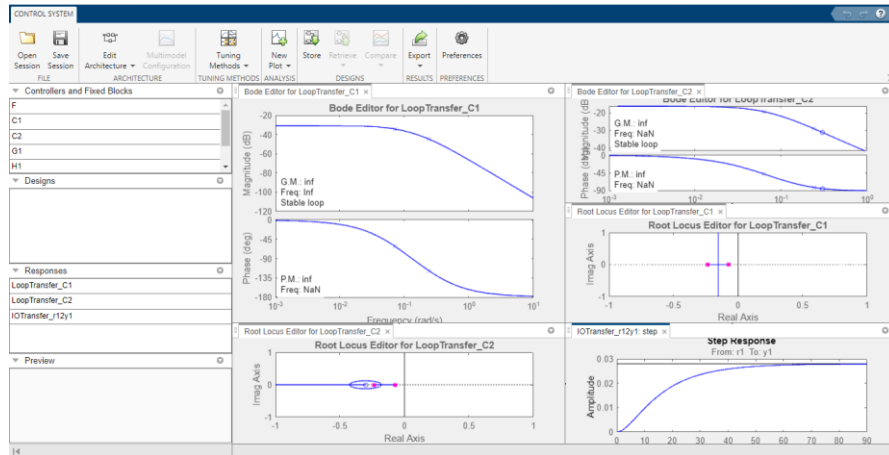
Una vez conocidas las ecuaciones de transferencias se ejecuta la herramienta en el "editor". La cual abrirá la siguiente pestaña:



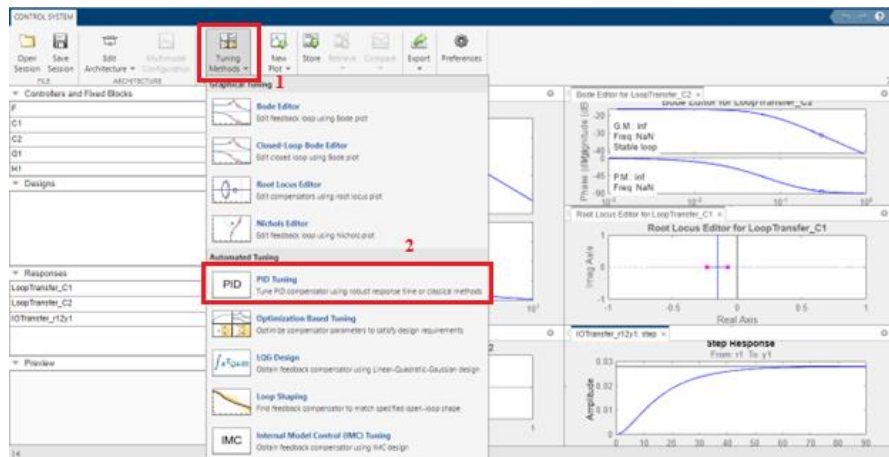
De allí se ingresa en "Edit Architecture", se selecciona la opción 5 que corresponde a un lazo de control en cascada, luego, en la opción de G1 que corresponde a la función de transferencia secundaria se selecciona en la flecha para importar la función correspondiente. En este caso, se selecciona la función de transferencia "tanque1" y se importa. Se realiza el paso 3, 4 y 5 para la función de transferencia G2, la cual corresponde a "tanque2C" y esta representa nuestro sistema principal. Luego se le da en "OK"



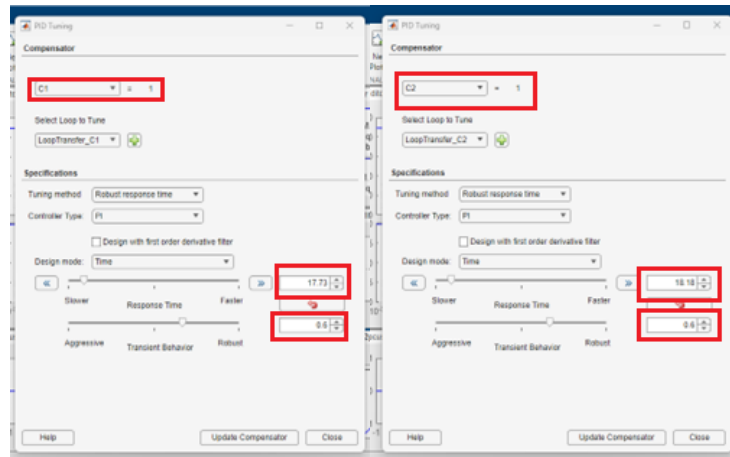
Posteriormente se cargan todos los parámetros del sistema



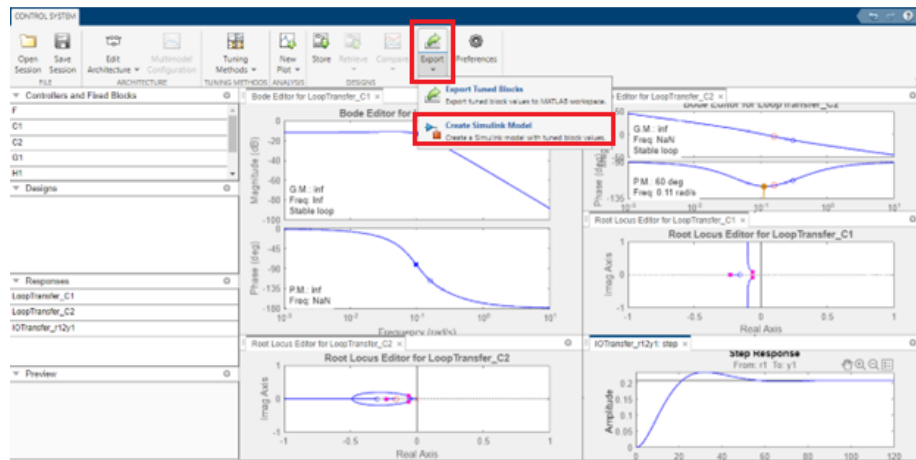
A continuación se selecciona la herramienta “Tuning Methods” y luego en “PID Tuning”



Donde se pueden observar las ganancias PI sintonizadas automáticamente para los controladores C1 y C2.



Para finalmente exportar el modelo a Simulink para ver la dinámica del proceso.



Anexo C. Descripción económica del proyecto.

MODULO	TIPO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
TRANSFORMABLES				
Acrílico transparente 4 mm	Lámina	1	\$ 260.000	\$ 260.000
Manguera 1/2" x 1 m	PVC	2	\$ 3.500	\$ 7.000
Manguera 1/4" x 1 m	PVC	2	\$ 2.500	\$ 5.000
SUBTOTAL				\$ 272.000
NO TRANSFORMABLES				
Bomba	Centrifuga	1	\$ 111.200	\$ 111.200
Sensor Ultrasónico	HC-SR04	2	\$ 10.000	\$ 20.000
Electroválvula 1/4"	Conexión rápida	2	\$ 29.800	\$ 59.600
Válvula	Manual de bola	2	\$ 3.000	\$ 6.000
Controlador bomba	L298N	1	\$ 14.000	\$ 14.000
Fuente	12V	1	\$ 18.000	\$ 18.000
Arduino UNO	R3	1	\$ 80.000	\$ 80.000
SUBTOTAL				\$ 308.800
CONSUMIBLES				
Cable	Eléctrico	5	\$ 3.000	\$ 15.000
Soldadura	100g	1	\$ 20.000	\$ 20.000
SUBTOTAL				\$ 35.000
SERVICIOS				
Transporte	-	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Mecanizado	Corte y ensamble	1	\$ 150.000	\$ 150.000
Luz	-	1	\$ 300.000	\$ 300.000
Internet	-	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Licencia Matlab	-	1	\$ 4.500.000	\$ 4.500.000
Licencia SolidWorks	-	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
SUBTOTAL				\$ 7.250.000
RECURSOS HUMANOS				
Director	Sueldo	35	\$ 40.000	\$ 1.400.000
Codirectora	Sueldo	35	\$ 40.000	\$ 1.400.000
SUBTOTAL				\$ 2.800.000
SUBTOTAL DEL PROYECTO				\$ 10.665.800
IMPREVISTOS				
Accesorios	Codo 12 mm	2	\$ 3.000	\$ 6.000
Accesorios	Racores 5/16	6	\$ 3.000	\$ 18.000
Silicona	Sellante Adhesivo	1	\$ 39.900	\$ 39.900
SUBTOTAL				\$ 63.900
TOTAL, DEL PROYECTO				\$ 10.729.700