

**Diseño y construcción de un banco didáctico para regular el nivel de cuatro tanques
dinámicamente acoplados mediante control automático**

Esteban Henry Sánchez Gómez, Mateo Vanegas Rivero

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Mecánicos

Director

Carlos Borrás Pinilla

Doctor en Ingeniería Mecánica

Codirector

Helio Sneyder Esteban Villegas

Magíster en Ingeniería Mecánica

Codirector

Yennifer Yuliana Ríos Díaz

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2023

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado en especial a Dios, mi familia y amigos que me han apoyado y acompañado en todo el proceso de manera incondicional, es un privilegio y un orgullo contar con ellos.

Esteban Sánchez

DEDICATORIA

A mi señor Dios todo poderoso, dueño de mi fe y esperanza, quien guía mis pasos para ser mejor cada día en cada aspecto de mi vida.

A mi padre Rodolfo Vanegas Soto por su apoyo incondicional y su confianza en mí, por enseñarme las cualidades que debe tener un hombre para ser buen hijo,

A mi abuelo Enrique Vanegas quien me enseñó a soñar con cosas grandes, a trabajar y dar lo mejor de mí, a demostrar que sin importar lo difícil que sea la vida siempre se puede ser mejor.

A mi abuela Ana Delia Soto por su amor y cariño incondicional, por ser la mujer santa de mi vida.

A mi hermano David Vanegas quien creció conmigo y vivió cada dolor, cada alegría, por ser mi confidente y mi apoyo en cada paso que doy

A mi hermana Ana Isabella Vanegas a quien amo con todo mi corazón y extraño con cada fuerza de mi alma, este y los logros venideros serán por ti amada hermana.

A ti Sofía Mejía Noguera, quien me ha dado los mejores años de mi vida, por toda la paciencia

A Reynaldo Arturo Mejía y Fanny Noguera Bonilla, porque sin ser mi familia me trataron como un hijo y me dieron tanto amor y cariño que espero la bendición de Dios para algún día retribuir tanto amor.

A Helio Sneyder Esteban Villegas, por su ayuda incondicional en el proyecto de grado, por cada consejo y regaño, sobre todo por la amistad y las tardes de chisme y trabajo duro.

Al profesor Fabian Horacio Diaz por brindar su apoyo, conocimiento y experiencia a mi proceso académico.

A mis amigos queridos y todos los que participaron activamente en mi vida en estos últimos años.

Mateo Vanegas Rivero

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a mi familia, por su apoyo y sabiduría tanto moral como económico en todo el proceso.

A nuestro director, el ingeniero y docente Carlos Borrás Pinilla por su supervisión, apoyo y conocimientos brindados la etapa de culminación de la carrera.

A nuestro codirector Helio Sneyder Esteban Villegas por su tiempo, paciencia y conocimientos transmitidos en todas las etapas del proyecto.

A los técnicos de la escuela Freddy, Henry y César por el apoyo brindado en la construcción con la mejor de las disposiciones

A mi compañero de trabajo de grado, Mateo Vanegas, por su incansable responsabilidad, paciencia, tiempo, profesionalismo, compromiso y apoyo que hicieron una pieza clave en el desarrollo del presente proyecto de forma satisfactoria.

A mis amigos por ser un pilar importante a nivel emocional que me posibilitaron seguir adelante, en especial a Nicolás Barrios por ser aquel que siempre está presente.

Muchas gracias a los compañeros y profesores que tuve a lo largo de la carrera por brindaron su granito de arena para llegar hasta esta etapa.

Esteban Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor PhD. Carlos Borrás Pinilla por el apoyo y la confianza depositada, por su amplio conocimiento y disposición para lograr un trabajo de alta calidad e impacto a la Escuela De Ingeniería Mecánica De La Universidad Industrial De Santander.

A los docentes de la Universidad Industrial de Santander por guiarnos en el camino de la moralidad, la ética, la academia y la investigación enfocada la Ingeniería.

A nuestros padres por su esfuerzo y dedicación, por cada ayuda emocional y económica brindada con el fin de alcanzar este logro tan añorado.

Mateo Vanegas Rivero

Tabla de contenido

Resumen.....	1
Abstract	2
1. Planteamiento del Problema.....	4
1.1 Justificación.....	5
1.2 Alcance.....	6
2. Objetivos.....	7
2.1 Objetivo General	7
2.2 Objetivos Específicos	7
3. Antecedentes	8
4. Marco Teórico	10
4.1 Ultrasonido	10
4.2 Radiométrica.....	11
4.3 Fluidos	12
• Fluidos ideales.....	12
• Fluidos newtonianos.....	13
• Fluidos no newtonianos	13
4.3.1 Número de Reynolds	14
4.4 Requerimientos Generales en los Sistemas De Control.....	15
4.4.1 Estabilidad.....	15
4.4.2 Exactitud	15
4.4.3 Velocidad de Respuesta.....	16
4.5 Estructura de un Sistema de Control	16
4.5.1 Sistema de Control Lineal	17
4.5.2 Sistema De Control No Lineal	17
4.5.3 Sistema en Lazo Abierto	17
4.5.4 Sistema en Lazo Cerrado.....	18
4.6 PID	18
4.6.1 PID Interactivo.....	20
4.6.2 PID Paralelo (No Interactivo).....	21
4.6.3 Sistemas Lineales Invariantes en el Tiempo.....	22
4.6.4 Control en Cascada	25
4.7 Diagrama de Bode	26
4.8 Filtro Butterworth	27

4.9 Ecuación del Controlador.....	28
4.9.1 Sintonización por Asignación de Polos	29
5. Metodología.....	32
6. Modelo Dinámico del Sistema de Control de Cuatro Tanques Acoplados.....	34
6.1 Sistemas de Control de Nivel para Procesos de Producción Industrial Multivariable	34
6.2 Dimensionamiento y Requerimientos del Módulo de Tanques Acoplados.....	35
6.2.1 Diseño y Análisis Estructural.....	38
6.3 Selección de Componentes.....	41
6.3.1 Actuadores.....	41
6.3.2 Modulo Driver.....	43
6.3.3 Sensores de Nivel.....	45
6.3.4 Procesador Arduino Mega 2560	45
6.3.5 Caudalímetro.....	47
6.4 Especificación y Descripción de la Planta	47
6.4.1 Distribución de Caudales y Recorrido Hidráulico	49
6.4.2 Sistema Electrónico.....	50
6.4.3 Caracterización Dinámica de las Bombas	52
7. Modelo Matemático de Tanques Acoplados	57
7.1 Sistema Dinámico de la Configuración de Cuatro Tanques Acoplados.....	59
8. Control PID de los Cuatro Tanques Acoplados	62
8.1 Identificación del Proceso Mediante Simulación y Validación Experimental	65
8.2 Sintonización del Controlador	74
8.2.1 Linealización del Modelo Matemático.....	78
8.2.1.1 Tanques Superiores.....	83
8.2.1.2 Tanques Inferiores.....	94
9. Conclusiones	110
10. Recomendaciones	113
11. Referencias bibliográficas	114
12. Apéndices	117

Tabla de Figuras

Figura 1 <i>Medición de nivel por ultrasonido</i>	11
Figura 2 <i>Medición de nivel radiométrica</i>	12
Figura 3 <i>Flujos y número de Reynolds</i>	14
Figura 4 <i>Esquema general de un sistema de control</i>	16
Figura 5 <i>Sistema de control en lazo cerrado con control PID</i>	18
Figura 6 <i>Diagrama de bloques PID interactivo</i>	20
Figura 7 <i>Diagrama de bloques PID paralelo</i>	21
Figura 8 <i>Escalonado lineal</i>	22
Figura 9 <i>Sistemas invariantes en el tiempo</i>	23
Figura 10 <i>Sistemas lineales invariantes en el tiempo</i>	23
Figura 11 <i>Sistemas LTI en cascada o serie</i>	24
Figura 12 <i>Sistemas LTI en paralelo</i>	25
Figura 13 <i>Control en cascada</i>	26
Figura 14 <i>Diagrama de Bode</i>	27
Figura 15 <i>Respuesta de un filtro Butterworth</i>	28
Figura 16 <i>Sistema de tanques acoplados</i>	35
Figura 17 <i>Tanques de acrílico</i>	37
Figura 18 <i>Armazón del banco de tanques acoplados</i>	37

Figura 19 <i>Estructura del banco de tanques acoplados</i>	38
Figura 20 <i>Diagrama esfuerzo deformación</i>	39
Figura 21 <i>Análisis de tensiones</i>	40
Figura 22 <i>Factor de seguridad</i>	41
Figura 23 <i>Bomba uno</i>	42
Figura 24 <i>Bomba dos</i>	43
Figura 25 <i>Driver puente H</i>	44
Figura 26 <i>Sensor ultrasónico</i>	45
Figura 27 <i>Arduino Mega 2560</i>	46
Figura 28 <i>Sensor de caudal</i>	47
Figura 29 <i>Esquema general del sistema de control de cuatro tanques</i>	48
Figura 30 <i>Caudales del sistema y recorrido del fluido</i>	49
Figura 31 <i>PCB</i>	51
Figura 32 <i>Diagrama electrónico PCB</i>	51
Figura 33 <i>Diagrama de bloques para la caracterización de la bomba mediante señal PWM y lectura de alturas</i>	52
Figura 34 <i>Caracterización Bomba uno</i>	54
Figura 35 <i>Caracterización Bomba dos</i>	56
Figura 36 <i>Diagrama de bloques para el sistema de cuatro tanques acoplados</i>	61
Figura 37 <i>Diagrama de bloques para la obtención de datos experimentales</i>	67

Figura 38 <i>Modelo a escala de la válvula de bola en Solidworks</i>	68
Figura 39 <i>Área de la elipse según su grado de estrangulamiento</i>	69
Figura 40 <i>Semiejes de la elipse</i>	69
Figura 41 <i>Datos experimentales de la planta estabilizada para los tanques uno y dos</i>	71
Figura 42 <i>Datos experimentales de la planta estabilizada para los tanques tres y cuatro</i>	72
Figura 43 <i>Identificación y comparación del modelo matemático y el real de los tanques uno y dos</i>	73
Figura 44 <i>Identificación y comparación del modelo matemático y el real de los tanques tres y</i> <i>cuatro</i>	74
Figura 45 <i>Simulación de la planta para validar la sintonización de los tanques uno y tres</i>	75
Figura 46 <i>Simulación de la planta para validar la sintonización de los tanques dos y cuatro</i>	76
Figura 47 <i>Curva de respuesta de escalón unitario</i>	77
Figura 48 <i>Matriz A y B espacio de estados para el tanque uno</i>	79
Figura 49 <i>Respuesta de escalón unitario para el tanque uno</i>	85
Figura 50 <i>Medición de tiempo muerto</i>	86
Figura 51 <i>Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque</i> <i>uno</i>	88
Figura 52 <i>Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque uno</i>	88
Figura 53 <i>Respuesta y comportamiento real del sistema tanque uno</i>	89
Figura 54 <i>Matriz A y B espacio de estados para el tanque tres</i>	81

Figura 55 <i>Respuesta de escalón de la función transferencia para el tanque tres</i>	90
Figura 56 <i>Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque tres</i>	91
Figura 57 <i>Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque tres</i>	92
Figura 58 <i>Respuesta y comportamiento real del sistema tanque tres</i>	92
Figura 59 <i>Arquitectura de control para la dinámica de los tanques acoplados</i>	95
Figura 60 <i>Modelo en simulink del control en cascada para los tanques superior e inferior</i>	96
Figura 61 <i>Interfaz de sisotool toolbox para la ubicación de polos y ceros tanques uno y dos</i>	97
Figura 62 <i>Lugar de raíces y ceros del sistema para el compensador tanque uno</i>	98
Figura 63 <i>Lugar de raíces y ceros del sistema para el compensador tanque dos</i>	98
Figura 64 <i>Respuesta de escalón unitario de la función transferencia compensada para el sistema de control de la altura uno y altura dos</i>	99
Figura 65 <i>Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque dos</i>	101
Figura 66 <i>Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque dos</i>	101
Figura 67 <i>Respuesta y comportamiento real del sistema tanque dos</i>	102
Figura 68 <i>Interfaz de sisotool toolbox para la ubicación de polos y ceros tanques tres y cuatro</i>	103
Figura 69 <i>Lugar de las raíces y ceros del sistema para el compensador tanque tres</i>	104
Figura 70 <i>Lugar de las raíces y ceros del sistema para el compensador tanque cuatro</i>	104

Figura 71 <i>Respuesta de escalón unitario de la función transferencia compensada para el sistema de control de la altura tres y altura cuatro</i>	105
Figura 72 <i>Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque dos</i>	107
Figura 73 <i>Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque cuatro</i>	108
Figura 74 <i>Respuesta y comportamiento real del sistema tanque cuatro</i>	108
Figura 75 <i>Banco didáctico para regular el nivel de cuatro tanques dinámicamente acoplados</i> .	63

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Requerimientos del sistema</i>	36
Tabla 2 <i>Especificaciones de la bomba uno</i>	42
Tabla 3 <i>Especificaciones de la bomba dos</i>	43
Tabla 4 <i>Especificaciones del driver</i>	44
Tabla 5 <i>Especificaciones Arduino Mega 2560</i>	46
Tabla 6 <i>Datos Bomba uno</i>	53
Tabla 7 <i>Datos Bomba dos</i>	55
Tabla 8 <i>Parámetros de la planta</i>	66
Tabla 9 <i>Áreas seccionales para las válvulas de salida</i>	70
Tabla 10 <i>Datos de sintonización por Ziegler-Nichols tanque uno</i>	87
Tabla 11 <i>Índice de rendimiento del controlador para el tanque uno</i>	90
Tabla 12 <i>Datos de sintonización por Ziegler-Nichols tanque tres</i>	91
Tabla 13 <i>Índice de rendimiento del controlador para el tanque tres</i>	93
Tabla 14 <i>VARIABLES de entrada y salida de cada tanque</i>	96
Tabla 15 <i>Ganancias tanque dos</i>	100
Tabla 16 <i>Índice de rendimiento del controlador para el tanque dos</i>	103
Tabla 17 <i>Ganancias tanque cuatro</i>	106
Tabla 18 <i>Índice de rendimiento del controlador para el tanque dos</i>	109

Lista de Apéndices

Apéndice A Código caudal	117
Apéndice B Función T	118
Apéndice C Identificación	119
Apéndice D Modelo matemático, linealización y espacio de estados para tanque superior e inferior	120
Apéndice E Matrices de estado tanque uno	121
Apéndice F Matrices de estado tanque tres.....	121
Apéndice G Manual de operación.....	121

Resumen

Título: Diseño y construcción de un banco didáctico para regular el nivel de cuatro tanques dinámicamente acoplados mediante control automático¹

Autores: Esteban Henry Sánchez Gómez, Mateo Vanegas Rivero

Palabras clave: Diseño, control de flujo, automatización PID, monitoreo, nivel.

Descripción: Este proyecto de grado tiene como objetivo general brindar a los estudiantes de Ingeniería Mecánica una herramienta didáctica que complemente la formación académica en el ámbito de control automático de procesos, relacionando de manera integral la teoría y la práctica enfocada al diseño e implementación de sistema de control automático para procesos industriales. El módulo de laboratorio didáctico permite la interacción de los estudiantes con un sistema de control de nivel de cuatro tanques que asemeja las condiciones reales de medición, monitoreo y dominio de las variables de un proceso industrial, entre las que se incluyen la regulación de niveles de un fluido en tanques y demás parámetros de funcionamiento. Por tal razón, se realizó el modelo dinámico del sistema de cuatro tanques acoplados, posteriormente se linealizó el modelo matemático en busca de los puntos de equilibrio del sistema con el fin de implementar satisfactoriamente un sistema de control, este modelo fue validado mediante el software de programación MATLAB comprobando una correcta aproximación de los parámetros de ajuste planteados para el sistema.

¹ Trabajo de grado

** Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director:

Abstract

Title: Design and construction of a didactic bench to regulate the level of four dynamically coupled tanks by means of automatic control.

Authors: Esteban Henry Sánchez Gómez, Mateo Vanegas Rivero

Keywords: Design, flow control, PID automation, monitoring, level.

Description: This project aims to provide students of mechanical engineering with a didactic tool that complements the academic training in the field of automatic process control, integrally relating theory and practice focused on the design and implementation of automatic control systems for industrial processes. The didactic laboratory module allows students to interact with a four-tank level control system that resembles the real conditions of measurement, monitoring and control of the variables of an industrial process, such as the regulation of fluid levels in tanks and other operating parameters. The dynamic model of the system of four coupled tanks was made, and then the mathematical model was linearized in search of the equilibrium points of the system in order to satisfactorily implement a control system. This model was validated by programming software MATLAB, which verified a correct approximation of the adjustment parameters proposed for the system.

Introducción

A nivel mundial la industrialización y la obligación de satisfacer las necesidades de las comunidades consumistas incentivan al sector industrial a optimizar sus procesos productivos con el objetivo de garantizar la competitividad de sus productos. Teniendo en cuenta lo anterior, la formación integral de los Ingenieros Mecánicos depende de la capacidad de relacionar correctamente los conocimientos teórico-prácticos que garanticen su intervención y aporte a tecnologías aplicadas a la automatización de procesos industriales, esto gracias a la apropiación de estrategias pedagógicas. Sin embargo, el Laboratorio de Control y Sistemas Dinámicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander (UIS) carece de herramientas didácticas disponibles para el estudio de sistemas de control automático, por cual, se llevó a cabo el diseño y construcción de un módulo de control de nivel de cuatro tanques acoplados como un sistema prototipo de un problema básico de control de procesos industriales.

El prototipo mencionado se desarrolló mediante la implementación de sensores, actuadores, microcontrolador y una interfaz de comunicación que permite la interacción de los usuarios con las variables a controlar. Su funcionamiento es posible gracias a la descripción del sistema multivariable que rige el comportamiento del sistema de tanques acoplados que permitió obtener un modelo matemático que fue linealizado y representado en espacio de estados obteniendo la función de transferencia del sistema de control.

1. Planteamiento del Problema

Los requerimientos industriales actuales han fomentado la optimización y desarrollo procesos de producción, por lo que la formación académica integral de Ingenieros Mecánicos capaces de intervenir y aportar a dichos procesos hace parte fundamental del desarrollo sostenible de una sociedad. Teniendo en cuenta lo anterior, es primordial la implementación de métodos pedagógicos que relacionen los conocimientos teóricos con la practica enfocada a la familiarización con entornos laborales y situaciones reales en procesos de producción como el control de nivel de un fluido en tanques acoplados.

Sin embargo, en la actualidad existen problemáticas relacionadas con la carencia de equipos y módulos didácticos de aprendizaje para materias afines al control de procesos y automatización en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS. Estas dificultades podrían contribuir a la deficiencia en la calidad de los futuros egresados, incumpliendo con la misión y visión de la Universidad, por lo cual, se hace necesaria la construcción y montaje de prototipos de control automático que simulen y satisfagan necesidades industriales reales, entre las que se incluyen el control de niveles en tanques de almacenamiento de insumos líquidos.

Por lo cual, este proyecto de grado busca contribuir directamente sobre la formación y el desarrollo de aptitudes de los estudiantes, garantizando la interacción y manejo de sistemas automáticos de control, específicamente la mantención automática de niveles de fluidos en tanques acoplados. Este equipo didáctico por construir estará constituido por un bastidor donde se ubicarán tres tanques acoplados con su respectivo módulo de control (analógico y digital), adicionalmente se requerirá un método de adquisición de datos que deberá ser ensamblado a la par con el módulo

de control. El modelo didáctico estará conformado por cuatro tanques acoplados alimentado por dos bombas hidráulicas de corriente directa.

1.1 Justificación

Los fundamentos teóricos son una base muy importante ya que permite conocer a ciencia cierta el funcionamiento de lo que se estudia, en la rama del control es importante debido a que generalmente se cuenta con softwares que ayudan a facilitar el trabajo del usuario, los estudiantes cuentan con las explicaciones teóricas y generalmente de programación, por lo que es ampliamente importante que estos conocimientos se vean reflejados de alguna forma a cómo sería en realidad. Allí es donde la parte experimental tiene su utilidad, en esta se puede comparar los datos teóricos con los prácticos.

Se necesita disponer de plantas que hagan posible las mediciones en tiempo real y la posibilidad de modificar variables que afecten el comportamiento para lograr identificar las respuestas que se generen con una variedad de cambios y con esto, realizar un correcto modelado de un sistema que parametrize las variables que están en él.

Una solución didáctica y con fines académicos para un sistema de control es la implementación de un sistema de tanques, este permite el desarrollo de prácticas que familiaricen al estudiante con lo que sucede en la industria y a corroborar los conocimientos teóricos.

Desarrollar el prototipo busca que la comunidad universitaria cuente con la oportunidad de realizar prácticas, modificaciones y análisis que beneficien a los laboratorios y al estudiantado.

1.2 Alcance

El propósito de este proyecto es la construcción y desarrollo de un módulo didáctico que permita a los estudiantes la interacción con métodos de control e instrumentación de un sistema autónomo de control de nivel de cuatro tanques acoplados dinámicamente dispuesto para el Laboratorio de Control y Sistemas Dinámicos de la Universidad Industrial de Santander.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar y construir un banco didáctico de laboratorio que proporcione a los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander interactuar con un sistema de control a escala empleando control PID, basado en sistemas de control industrial para la regulación del nivel de cuatro tanques dinámicamente acoplados; permitiendo la familiarización de los estudiantes con procesos industriales y la adquisición de conocimientos sobre el control y monitoreo de variables.

2.2 Objetivos Específicos

Modelar y simular el sistema de control de nivel de cuatro tanques acoplados dinámicamente en función de las características de funcionamiento de un proceso de control automático industrial mediante la plataforma de programación y cálculo numérico MATLAB, aplicado a un módulo didáctico de laboratorio: Tanques de dimensiones 40x15[cm], dos bombas hidráulicas DC y sensores ultrasónicos.

Diseñar el control PID de acuerdo con el comportamiento intrínseco del proceso a controlar, y su respectiva sintonización con Simulink de MATLAB.

Implementar y validar el sistema de control PID construyendo el módulo didáctico funcional, de fácil manejo y movilidad.

Desarrollar manuales de operación del módulo didáctico para la guía posterior de futuras prácticas de laboratorio.

3. Antecedentes

Los procesos industriales que requieren de tecnologías que permitan el control y monitoreo de parámetros de almacenaje y manejo de fluidos esenciales en sus respectivos procesos de producción se evidencian en sectores como: el tratamiento de aguas, la petroquímica, industria gasífera y alimentaria, donde el control dinámico de los procesos en función de la finalidad de cada insumo dentro del proceso de producción requiere la implementación de un controlador automático que optimice las tareas del proceso de producción.

A nivel académico se ha buscado fortalecer la interacción teórico práctica con situaciones reales de automatización industrial enfocada al control de nivel de fluidos; en un reciente estudio de Torres y Chanoluisa (2015) se desarrolló el diseño y construcción de una planta de llenado de tanques a escala implementando sistemas de control automático, dando como resultado el mejoramiento de los laboratorios de automatización de la Universidad Politécnica Salesiana, brindándoles a los estudiantes las herramientas para fortalecer sus conocimientos para su posterior aplicación en procesos industriales. Este proyecto indica la versatilidad y eficacia del mecanismo de control PID como herramienta de regulación para el sistema de control de nivel.

Adicionalmente, Gatzke, Meadows, Wang y Doyle, (2000) realizaron análisis en una de las prácticas de laboratorio desarrolladas con el fin de dar a los estudiantes una experiencia en ambientes industriales reales basadas en el control de modelo interno, modelado de procesos subsapaciales y control de matriz dinámica, estos análisis fueron empleados como herramientas para que los estudiantes efectúen el control de nivel de cuatro tanques. A partir de este trabajo se concluyó que el desarrollo de prácticas de laboratorio que recreen situaciones reales de procesos

industriales incide positivamente en la formación y capacidades de los estudiantes dándoles herramientas para afrontar y solucionar restricciones o perturbaciones de los parámetros de control de un proceso de producción.

A nivel nacional se han desarrollado trabajos enfocados a la automatización y control de nivel de líquidos, específicamente, Aguilar, Castro y Franco (2013) desarrollaron un controlador de estructura PID enfocado a la regulación del nivel de tanques, medida de caudales a la entrada y salida del sistema, donde se evidenció que el sistema hidráulico acoplado al controlador logra una dinámica de flujo constante producto de la interacción y dependencia de los tanques acoplados. El banco de Laboratorio de Control construido por la Universidad del Cauca pauta una guía sólida para la implementación de modelos matemáticos y el modelo de control PID para la resolución de procesos industriales.

Adicionalmente en el trabajo de grado realizado por Bohórquez, Fonseca y Gutierrez (2017) se desarrolló un banco de laboratorio de automatización que controla el nivel y flujo de dos tanques acoplados teniendo como base para el sistema de control un microcontrolador Mega2560 y el software de programación Labview, dando como resultado un material didáctico amplio que brinda la oportunidad a los estudiantes de realizar diferentes prácticas de laboratorio enfocadas a la solución industrial de problemas. El desarrollo de este proyecto deja ver la posibilidad de emplear un microcontrolador Mega como base del sistema automático de control del presente proyecto.

4. Marco Teórico

El control de nivel de tanques en términos industriales abarca sectores como el petrolero, gasífero y alimentario, donde la medición y manejo de los fluidos almacenados en grandes tanques requieren de un monitoreo y control total de los parámetros involucrados en la contención y destino del fluido almacenado; esto conlleva al estudio y aplicación de sistemas de control automático moderno que permitan el desarrollo óptimo de los procesos industriales, para llevar a cabo una infraestructura adecuada que contenga los elementos de bombeo, sistema de extracción o recirculación, sensores, actuadores y sistema de control, es necesario describir conceptos y conocimientos teóricos involucrados con el sistema de control propuesto, para llevar a cabo este desarrollo se tomó en cuenta referencias de investigación y proyectos basados en la automatización y desarrollo de sistemas de control de nivel de tanques acoplados realizados en Latinoamérica y demás locaciones internacionales.

4.1 Ultrasonido

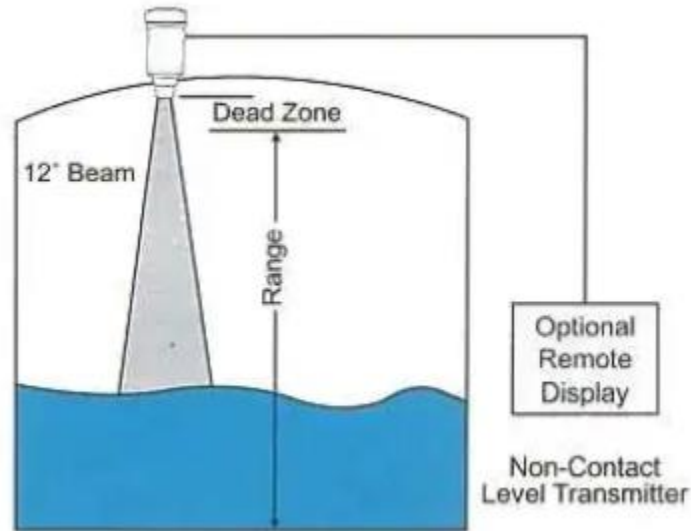
Se suele utilizar el término eco para este tipo de mediciones. Este se refiere a la acción que genera una onda que se encuentra desplazándose por un medio y choca contra una superficie, la acción es regresar al origen, esto se ve reflejado mucho en habitaciones que se encuentran vacías donde se nota por el sonido que se escucha por una reflexión retardada.

El ultrasonido entonces se basa en entregar desde un punto un pulso ultrasónico que genera una onda que va a viajar hasta una superficie con el fin de que esta se refleje y se reciba de nuevo desde su origen. Para determinar cuál es el nivel o la distancia en la que se encuentra esta superficie

con respecto al origen de la onda se mide es el tiempo que demora en viajar ida y vuelta este pulso (Figueroa, 2021).

Figura 1

Medición de nivel por ultrasonido



Nota. Tomado de Saiba tudo sobre medidor de nível ultrassônico, de Andrade, F (2019)

4.2 Radiométrica

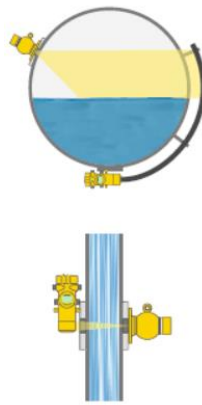
Este método cuenta con un sensor en un depósito el cual recibe un poco de radiación gracias a un isótopo que emite ciertas cantidades de radiaciones gamma ubicado en el otro extremo. El sensor puede gracias a esto calcular cuáles son los niveles, el caudal o la densidad conociendo la intensidad de la radiación que entra basándose en los tonos que se generan al penetrar la materia por esta radiación.

Sin importar las condiciones de aplicación este principio radiométrico es el que cuenta con una seguridad operacional y facilidad mucho más significativa que otros métodos ya que las

mediciones son independientes la temperatura, presión o incluso de la naturaleza del producto. Y para montar el dispositivo no se necesita intervenir en el proceso, se puede realizar en el exterior con la producción en marcha, esto reduce costos y agiliza el tiempo (Detección de Nivel Radiométrica - MEDITECNA, 2022).

Figura 2

Medición de nivel radiométrica



Nota. Tomado de Detección de nivel radiométrica, por MEDITECNA, 2022

4.3 Fluidos

Se les considera fluidos a los cuerpos que cuentan con la propiedad o característica de fluir y no cuenta con rigidez ni elasticidad, por lo que al aplicarse sobre ellos cualquier tipo de fuerza que intente cambiar su forma este cuerpo cede se adapta a la forma del recipiente que se encargue de contenerlos. Se conoce por fluidos tanto a líquidos como a gases, se diferencian entre ellos por las fuerzas que existen de cohesión entre sus moléculas. (Definición fluido, 2022).

- Fluidos ideales

Este tipo de fluidos no existen en la naturaleza, no hay ninguno de este tipo, es un concepto que se utiliza con fines teóricos para realizar estudios, se refieren a fluidos que no tienen viscosidad.

- Fluidos newtonianos

Reciben este nombre los fluidos que se comporten de acuerdo a la ley de la viscosidad de Newton, esta ley nos dice que “la tensión de cizallamiento es directamente proporcional a la deformación por esfuerzo cortante”.

Estos tipos de fluidos dependen estrechamente de las condiciones de temperatura y presión presentes en el fluido. Estos fluidos se les considera reales por lo que presentan viscosidad la cual se opone al flujo. Un ejemplo de fluido real es el agua ya que obedece con la ley de la viscosidad.

- Fluidos no newtonianos

Los fluidos que no obedecen a la ley de Newton sobre la viscosidad son todos estos fluidos que entran en la categoría, desde geles, cremas, sustancias muy espesas o fluidos propios de los organismos, estos fluidos tienen sus propias clasificaciones:

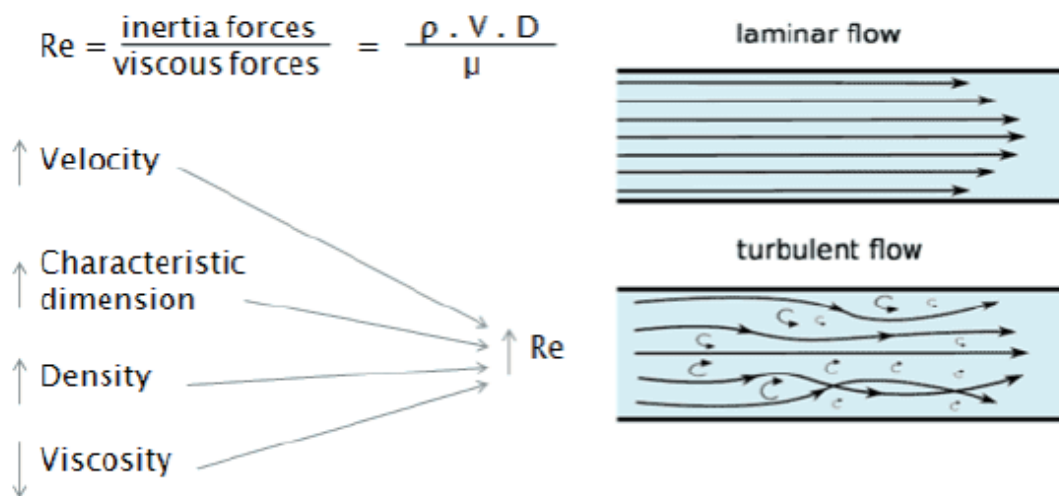
- Fluidos que no dependen del tiempo: Como los fluidos pseudoplásticos.
- Fluidos que sí dependen del tiempo: Se clasifican también en fluidos tixotrópicos y fluidos reopéticos.
- Fluido visco elástico: Tienden a ser fluidos que se recuperan después de deformados, como si tuvieran comportamientos elásticos. Un ejemplo de estos son los polímeros (ClasificaciónDe, 2017).

4.3.1 Número de Reynolds

Este es un indicador importante para saber si el flujo es laminar o es turbulento debido a la relación que existe con las fuerzas de inercia a fuerzas viscosas. Es un muy buen indicador debido a que por ejemplo se puede saber si el flujo es laminar si este es lento o tiene bajo Reynolds cuando las fuerzas viscosas son significativas y mantienen las partículas en línea, en estos casos los efectos de inercia no son muy significativos. Por otro lado, si las fuerzas de inercia son las más significativas sobre las viscosas quiere decir que el flujo es turbulento por lo que fluye más rápido, es decir que el Reynolds es grande. (Connor, 2020).

Figura 3

Flujos y número de Reynolds



Nota. Tomado de ¿Qué es el flujo laminar? flujo viscoso: definición, thermal engineering, Connor, N, 2020

Se considera flujo laminar si el Re es menor que 2000.

V: velocidad del flujo,

D: longitud recorrida del fluido

ρ : densidad del fluido (kg/m³),

μ : viscosidad dinámica (Pa.s),

ν : viscosidad cinemática (m²/s); $\nu = \mu / \rho$.

4.4 Requerimientos Generales en los Sistemas De Control

4.4.1 Estabilidad

Esta se considera la propiedad con mayor importancia en los sistemas de control, ya que los sistemas que no son estables no se pueden llegar a considerar como un sistema de control. Si el sistema responde con variaciones finitas a las entradas que cuenten con variaciones igualmente finitas se puede considerar que el sistema es estable. La inestabilidad generalmente se ve reflejado con respuestas como aumentos o disminuciones o incluso oscilaciones exponenciales, en estos momentos el sistema no se considera que responde a las acciones de control. (Barragán, 2008)

4.4.2 Exactitud

La exactitud en los sistemas de control se ve reflejada directamente con el porcentaje de error, si se mantiene en valores mínimos o aceptables se considera que el sistema es exacto. Si pensamos en la realidad no existe ningún sistema que sea exacto en su totalidad gracias a las imperfecciones naturales de componentes y otros factores, pero si llega a satisfacer los requerimientos entonces el sistema se considera exacto. (Salazar,2015)

4.4.3 Velocidad de Respuesta

Esta se refiere a que tan rápido llega la variable que se quiere controlar a la señal que se utiliza de referencia, se espera que los sistemas respondan a cualquier entrada en tiempos aceptables, debido a que, aunque el sistema sea estable y exacto, si no es rápido no tiene valor.

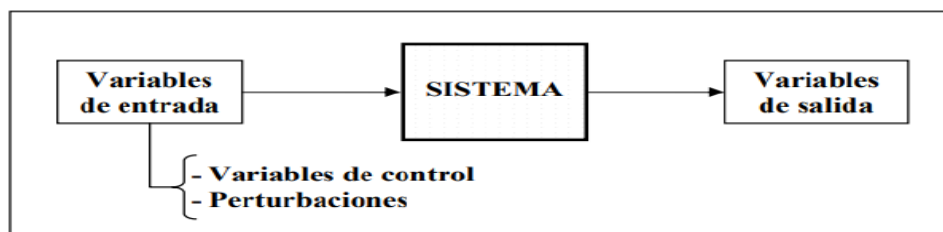
Es la rapidez con que la variable controlada se aproxima a la señal de referencia. Un sistema debe responder a cualquier entrada en un tiempo aceptable, ya que, aunque un sistema sea estable y tenga la exactitud requerida, si este es demasiado lento no tiene ningún valor. (Salazar, 2015)

4.5 Estructura de un Sistema de Control

Un sistema de control es un sistema que se puede considerar dinámico, debido a que este recibe acciones de afuera que considera variables de entrada que generan respuestas en consecuencia que se denominan variables de salida, estas respuestas son una reacción a estas acciones que recibe de manera externa. Estas acciones se conocen como variables de control las cuales se pueden manejar, y las perturbaciones que no es posible ejercer control sobre ellas. El objetivo de estos sistemas es tener un dominio de las variables de salida gracias a manipular las de control. (Brotons Alvarez, 2004).

Figura 4

Esquema general de un sistema de control



Nota. Tomado de ¿Qué es un sistema de control?, por Brotons Alvarez, 2004

4.5.1 Sistema de Control Lineal

Se considera un sistema lineal si las variables de salida van de acuerdo a los cambios que se generen en los de entrada directamente, seguir la forma de la entrada.

Existen dos propiedades de acuerdo a la linealidad del sistema:

- Si se multiplica la entrada por una constante, la salida también se multiplica por la misma.
- Se les puede aplicar el principio de superposición.

4.5.2 Sistema De Control No Lineal

Los sistemas que se rigen por ecuaciones no lineales son los que se consideran en este tipo de sistemas de control. Por lo general los sistemas físicos se consideran como no lineales, pero por ejemplo si el rango de operación es muy pequeño y los problemas de linealidad son suaves entonces se puede llegar a aproximar con uno lineal. (Alberto, Perez, Perez, 2008)

4.5.3 Sistema en Lazo Abierto

En estos sistemas de control la salida no genera ningún efecto sobre la señal o sobre el control que se desee, ya que esta no se mide ni tampoco se realimenta para generar una comparación con la variable de entrada.

Estos sistemas se dividen en dos, el controlador y el proceso que se controla, se le aplica una señal de entrada al controlador la cual va a generar una señal de control que regula el proceso, lo cual genera una salida con algunas especificaciones establecidas. (Alberto, Perez, Perez, 2008)

4.5.4 Sistema en Lazo Cerrado

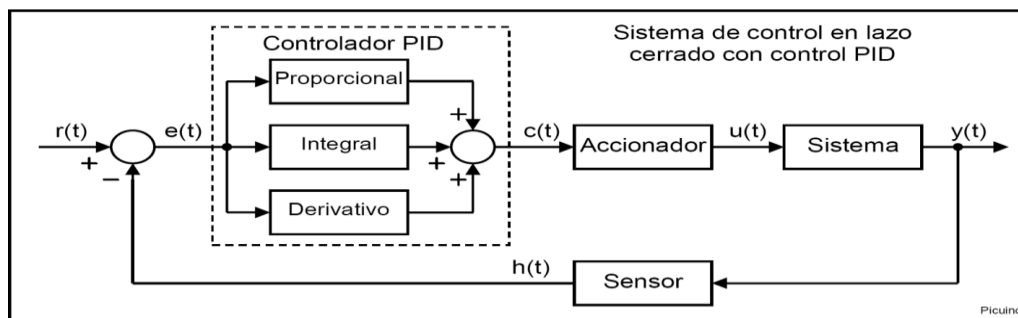
En estos sistemas la señal de salida si se controla de una forma más activa ya que se necesita una realimentación y comparación con la señal de entrada debido a que esta es una referencia, y para generar un cambio de ser necesario se debe enviar una señal para generar la acción de control, y para disminuir el porcentaje de error y realizar las debidas correcciones debe ser proporcional a la diferencia entre entrada y salida del sistema. Se resume en que los sistemas de lazo cerrado son en los que la señal de la salida tiene un efecto directo sobre el control, y la diferencia entre la señal de entrada y salida es lo que se conoce como el error del sistema, este error es el que actúa sobre el sistema para llegar a lo deseado. (Alberto, Perez, Perez, 2008)

4.6 PID

Se conoce como un controlador PID al dispositivo que hace posible el control de los sistemas de lazo cerrado, permiten que logre alcanzar el estado de la salida que se desea. Se le conoce como PID, pero cada sigla tiene un significado diferente, cada uno es un elemento que genera una acción, en orden es, proporcional, integral y derivativa.

Figura 5

Sistema de control en lazo cerrado con control PID



Nota. Tomado de Controlador PID - control automático, Picuino, 2023

Una de las cosas importantes de estos controladores es el error $e(t)$, que es lo que va a entrar al controlador PID, corresponde a la señal de error que es la corrección que se hace al comparar la salida con la entrada y con esto generar el cambio en el sistema para corregirlo y llevarlo al valor de referencia inicial $r(t)$. Se puede corroborar que el sistema está funcionando bien gracias a la señal de error, si es grande se está comportando de manera no deseada, pero si es pequeño el error significa que el sistema funciona bien de acuerdo a el estado deseado.

De lo importante en cuanto al PID es:

- Acción proporcional: Internamente esta multiplica la anteriormente mencionada señal de error por una constante (K_p) la cual determina que cantidad tendrá el controlador cuando a acción proporcional. El objetivo que el error del sistema sea el mínimo. Si el error es grande la acción del control es igual de grande para minimizar el error.

Si se aumenta la acción K_p genera que se aumente la velocidad con la que responde el sistema, genera que se disminuya el error y aumenta que el sistema sea más inestable

- Acción derivativa: Consiste en la derivada de la señal de error por una constante K_d , se puede conocer como la “velocidad” del error. Es de gran importancia esta acción en los sistemas de control debido a lo que se espera es llegar al punto de referencia y mantenerse allí, no sobrepasarse de formas indeseadas, por ello es importante que el controlador reconozca con que velocidad se esta acercando el sistema a la referencia para frenar con anticipación y evitar que se sobrepase y con esto no se vea afectado mucho por las inercias que generan las velocidades muy altas.

Si se aumenta K_d puede generar que se aumente la estabilidad, que se disminuya la velocidad del sistema, en este caso el error en régimen permanente se mantiene invariable

- **Acción integral:** En este caso a la integral de la señal de error se le multiplica una constante K_i . Este método consiste en acumular la señal de error conforme el tiempo pasa, pequeños errores se suman y hacen que la acción integral sea mayor con el fin de reducir el error en régimen permanente, es importante resaltar que añade inercia al sistema lo cual lo vuelve un poco más inestable.

4.6.1 PID Interactivo

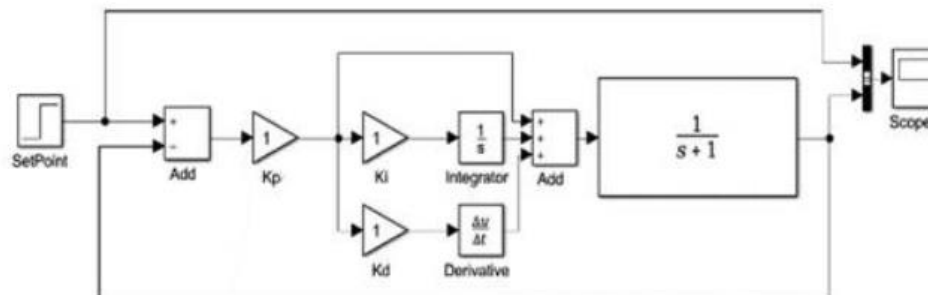
Este algoritmo representa un enfoque característico de los reguladores analógicos más antiguos. Su característica interactiva radica en que los ajustes de los parámetros del controlador K_I o K_d no se realizan de manera independiente; en cambio, estos cambios afectarán simultáneamente las tres acciones de control. Esta estrategia busca permitir la implementación de un control PID analógico utilizando solo dos amplificadores operacionales, lo que conlleva a un ahorro económico significativo. (Roblero et al., 2020)

Ecuación diferencial del PID interactivo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p K_i \int e(t) dt + K_p K_i \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Figura 6

Diagrama de bloques PID interactivo



Nota. Adaptado de Estudio comparativo de algoritmos de control PID clásico para el control angular de un brazo electromecánico, revista chilena de ingeniería, por Roblero, H. A., Arancibia, J. G., & Bravo, C, 2020

4.6.2 PID Paralelo (No Interactivo)

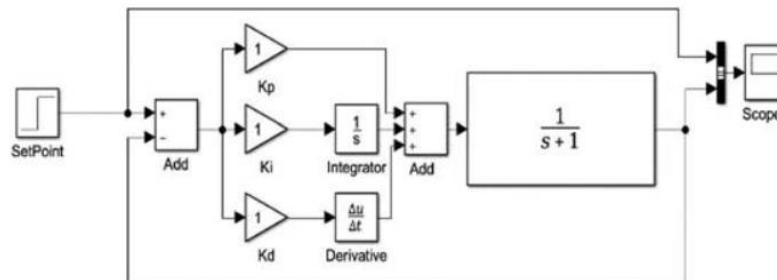
El PID no interactivo generalmente se le conoce como PID paralelo, es el clásico utilizado donde las acciones tanto integral como derivativa son totalmente independientes por mucho que exista una ganancia proporcional que afecte a las tres acciones (K_p , K_i , K_d). (Roblero et al., 2020)

Ecuación diferencial del PID paralelo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Figura 7

Diagrama de bloques PID paralelo



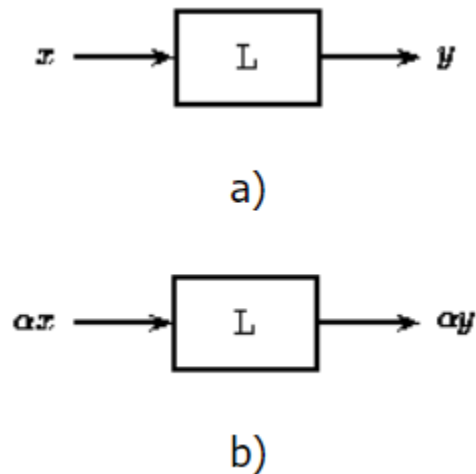
Nota. Tomado de Estudio comparativo de algoritmos de control PID clásico para el control angular de un brazo electromecánico, revista chilena de ingeniería, por Roblero, H. A., Arancibia, J. G., & Bravo, C, 2020

4.6.3 Sistemas Lineales Invariantes en el Tiempo

Primero se comienza definiendo qué es un sistema lineal, esto hace referencia a que, si en la entrada se llega a escalar un valor, la salida por consiguiente se escala a ese mismo valor, y además obedece al principio de superposición, lo que significa que, si se suman dos entradas, las salidas también estarán sumadas en un sistema lineal nuevo.

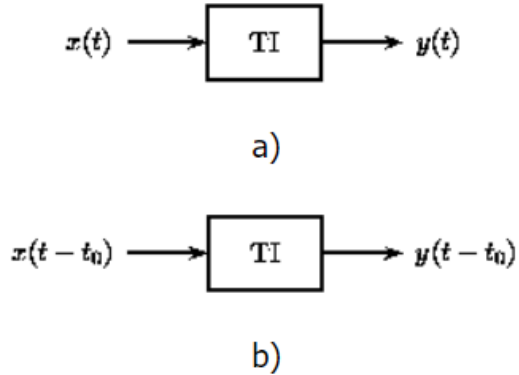
Figura 8

Escalonado lineal



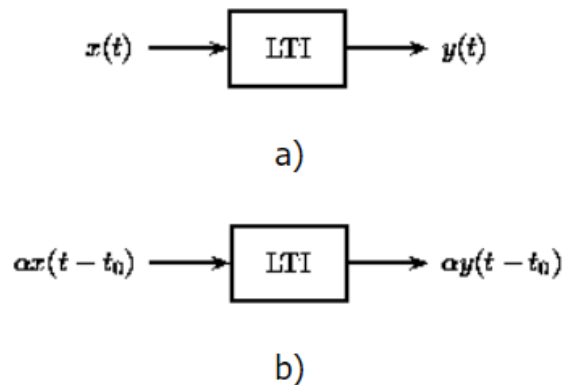
Nota. Tomado de Sistemas lineales invariantes en el tiempo, por Libretexts, 2022

Ahora, si un sistema es invariante en el tiempo, quiere decir que cuenta con la particularidad de una determinada entrada siempre va a dar la misma salida independiente del momento en el que la entrada hace efecto en el sistema. Se puede saber si un sistema varía o no en el tiempo gracias a la ecuación diferencial, para sistemas invariables se modelan con coeficientes constantes.

Figura 9*Sistemas invariantes en el tiempo*

Nota. Tomado de Sistemas lineales invariantes en el tiempo, por Libretexts, 2022

Finalmente, los sistemas lineales invariantes en el tiempo son los que se comportan tanto de forma lineal como invariantes con el tiempo valga la redundancia como se explicó con anterioridad, estos se denominan LTI y obedecen por ende al principio de superposición.

Figura 10*Sistemas lineales invariantes en el tiempo*

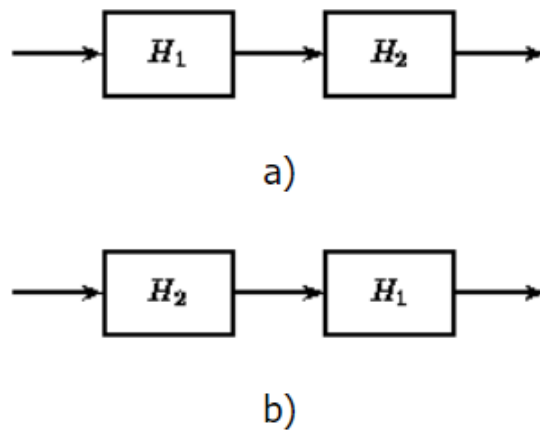
Nota. Tomado de Sistemas lineales invariantes en el tiempo, por Libretexts, 2022

- Sistemas LTI en serie:

Cuando dos o más sistemas LTI se encuentran en serie, se les puede intercambiar el orden sin que se llegue a afectar la salida, también se conocen como sistemas en cascada.

Figura 11

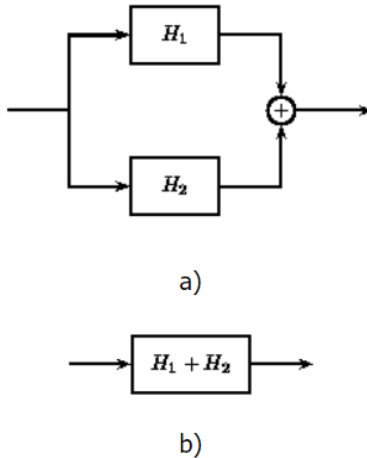
Sistemas LTI en cascada o serie



Nota. Tomado de Sistemas lineales invariantes en el tiempo, por Libretexts, 2022

- Sistemas LTI en paralelo:

Esto ocurre cuando dos o más sistemas LTI se encuentran en paralelo, origina un sistema equivalente el cual es la suma de los sistemas individuales. (Baraniuk, 2022)

Figura 12*Sistemas LTI en paralelo*

Nota. Tomado de *Sistemas lineales invariantes en el tiempo*, por Libretexts, 2022

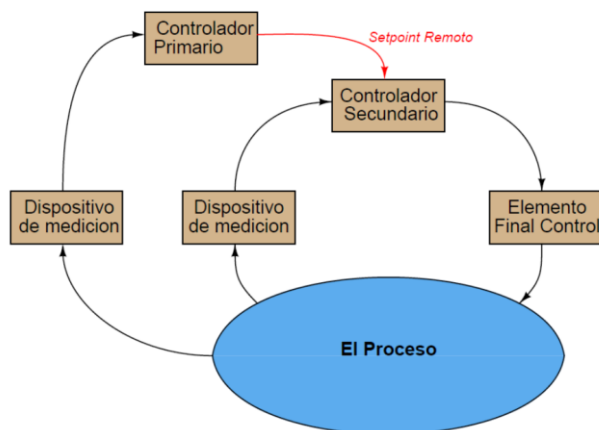
4.6.4 Control en Cascada

Implica que se utilicen dos sistemas de control discretos. En el primer sistema se establece la referencia del segundo, este utiliza un controlador PID. Es un enfoque diseñado para mejorar la respuesta ante variaciones en la ganancia y perturbaciones en sistemas no lineales.

En un sistema de control en cascada, se emplean dos niveles de control: el nivel exterior o principal utiliza un sensor vinculado al producto, lo que es de principal interés para el cliente, ya que se relaciona directamente con su producto. El nivel interior o secundario, en cambio, utiliza un sensor conectado y opera un segundo controlador PID para mantener lo que se quiere controlar en un valor predefinido. (Watlow, 2020)

Figura 13

Control en cascada



Nota. Tomado de ¿Cómo funciona una estrategia de control en cascada? definiciones y ejemplos, instrumentacion y automatizacion industrial, por Villajulca, J. C, 2021

4.7 Diagrama de Bode

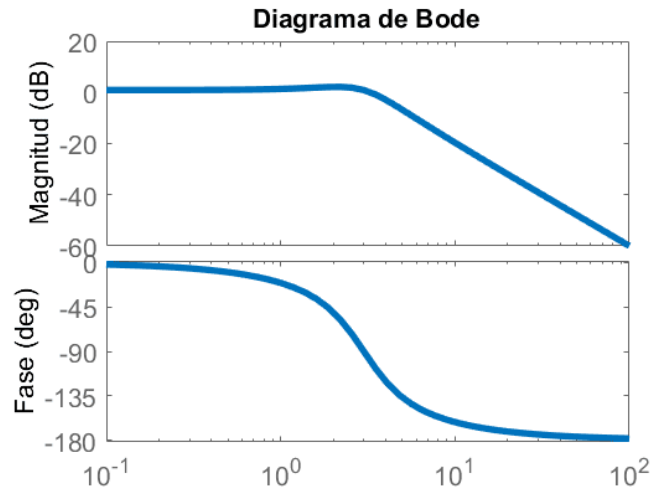
Consiste en una estrategia para analizar sistemas y procesos, si se realiza una buena interpretación se logra entender de una manera satisfactoria cual es el funcionamiento y como se comportan los procesos físicos reales en los lugares de operación que se quieran analizar. Gracias a este diagrama se puede conocer la estabilidad del sistema y por consiguiente se pueden generar controladores en las zonas de interés del proceso, este permite saber en cuales regiones se debe operar el proceso.

Cuando se trabaja con el diagrama de bode es de gran importancia saber que se constituye de dos gráficas por trabajar con números complejos, por ende, las dos gráficas del diagrama

corresponderán a magnitud y fase, entonces físicamente nos indica la amplitud de la señal que se le aplica al sistema y el desfase. (Castaño, 2019)

Figura 14

Diagrama de Bode



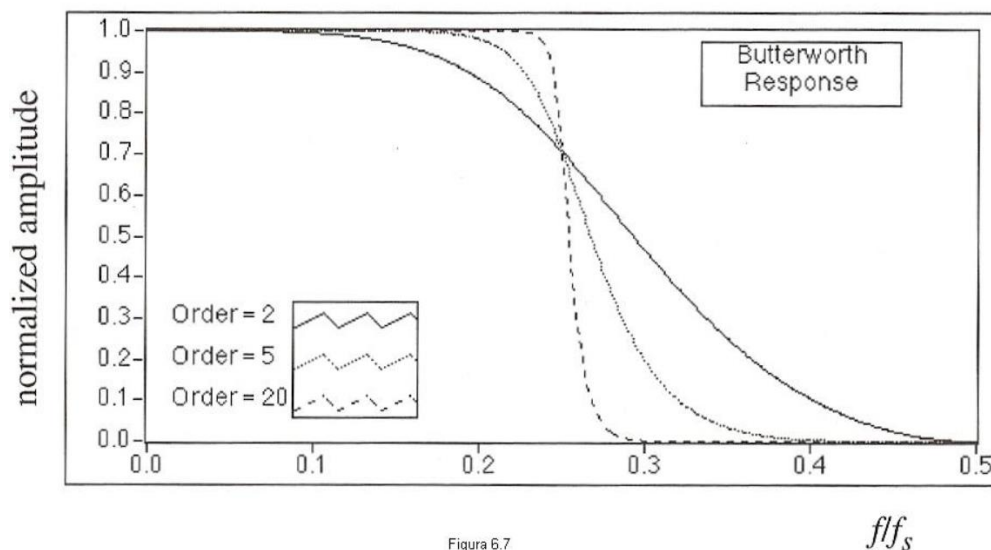
Nota. Tomado de Diagrama de bode, control automático educación, por C, S, 2021

4.8 Filtro Butterworth

Estos filtros, en general, se caracterizan por no presentar deformaciones en las pasas de frecuencia ni discontinuidades en la respuesta de banda, lo que normalmente les atribuye el nombre de "máximamente planos". Su comportamiento en términos de respuesta de frecuencia tiende a ser suave y, en los casos de órdenes más altos, mantienen su forma estructural. La principal ventaja radica en que la señal se mantiene suave y disminuye de manera uniforme durante la transición de frecuencias.

Figura 15

Respuesta de un filtro Butterworth



Nota. El eje x indica la frecuencia del muestreo y el eje y son las ganancias de pasa de banda, tomado de ehu, procesado ins virtual, 2023

4.9 Ecuación del Controlador

Antes de conocer la ecuación del control PID es importante mencionar que la velocidad de respuesta en los sistemas reales tiene límites que el control no va a poder superar debido a que existen factores que reducen la capacidad del controlador para llegar a la respuesta deseada, aunque se aumente la acción proporcional, ya que el accionador puede llegar a saturarse.

Ecuación del control PID:

$$c(t) = Kp * e(t) + Ki * \int e(t)dt + Kd * \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (3)$$

$c(t)$: señal de control

4.9.1 Sintonización por Asignación de Polos

La sintonización de un controlador PID por asignación de polos implica seleccionar los valores de los parámetros del controlador (K_p , K_i , K_d) de manera que los polos del sistema en lazo cerrado se ubiquen en una posición deseada en el plano complejo.

Para llevar a cabo la sintonización, se pueden seguir los siguientes pasos:

- Identificar el modelo matemático del proceso en lazo abierto, es decir, obtener la función de transferencia que relaciona la variable de salida del proceso (por ejemplo, la temperatura) con la variable de entrada del controlador (por ejemplo, la señal de control).
- Seleccionar una posición deseada para los polos del sistema en lazo cerrado en el plano complejo. Esta posición puede estar determinada por criterios de desempeño, como el tiempo de respuesta, la oscilación, la estabilidad, etc.
- Calcular los valores de los parámetros del controlador PID que permiten ubicar los polos del sistema en la posición deseada. Esto puede hacerse utilizando técnicas de álgebra lineal, tales como el método de Ackermann, que permite calcular directamente los valores de los parámetros del controlador.
- Verificar el desempeño del sistema en lazo cerrado mediante simulación o pruebas experimentales. Si el desempeño del sistema no cumple con los criterios de desempeño deseados, se pueden ajustar los valores de los parámetros del controlador y volver a realizar las pruebas hasta que se obtenga el desempeño deseado.

Es importante tener en cuenta que la sintonización por asignación de polos es una técnica avanzada que requiere un buen conocimiento del modelo matemático del proceso y de las herramientas matemáticas utilizadas en el proceso de sintonización. Además, esta técnica puede no ser adecuada para todos los procesos y puede requerir ajustes adicionales a medida que cambian las condiciones del proceso.

El código de MATLAB utilizado comienza definiendo la función de transferencia del proceso a controlar (en este caso, P) y obteniendo sus coeficientes numéricos y de denominador. A continuación, se especifican las características de diseño deseables para el controlador PID: el máximo pico (M_p) de la respuesta escalón, el factor de amortiguamiento (ζ), el tiempo de asentamiento del 75% (T_{ss}), la frecuencia natural (ω_n), y la ubicación deseada de los polos en el plano complejo.

Luego, se calcula el controlador PID basándose en los valores obtenidos anteriormente. Para el cálculo del controlador, se usa el método de asignación de polos, donde se eligen los polos del sistema en lazo cerrado y se utiliza el polinomio característico resultante para calcular los valores de los parámetros del controlador PID (K_c , t_i , t_d). Además, se incluye un filtro en el término derivativo del controlador para evitar amplificar ruido en la señal de entrada.

Finalmente, se define el controlador PID y se realiza una simulación del sistema en lazo cerrado para verificar su desempeño

Se suele utilizar la asignación de polos cuando se desea conocer la estabilidad y respuesta en sistemas dinámicos.

Para sistemas de lazo abierto que no varían con respecto al tiempo se les considera estables si:

- Tiempo continuo: en este caso todos los polos tienen partes reales negativas para la función de transferencia, los polos se visualizan en el plano s complejo, mitad izquierda, para que se considere estable.

- Tiempo discreto: la magnitud de los polos debe ser inferior a uno, deben estar dentro del círculo unitario

La asignación de polos permite que, en el controlador, la función de transferencia llegue al comportamiento que se desea.

5. Metodología

A continuación, se describe el procedimiento a seguir para la ejecución de los objetivos establecidos

Objetivo 1 Modelar y simular el sistema de control de nivel de cuatro tanques acoplados dinámicamente en función de las características de funcionamiento de un proceso de control automático industrial mediante la plataforma de programación y cálculo numérico MATLAB, aplicado a un módulo didáctico de laboratorio: Tanques de dimensiones 40cmx15cm y dos bombas hidráulicas DC de hasta 1/3 HP por microcontrolador.

Con el fin de llevar a cabo el cumplimiento de este objetivo se deben realizar las siguientes actividades:

- Actividad 1: Definir las características y parámetros de funcionamiento del banco de laboratorio (sistema de control)
- Actividad 2: Establecer las variables a controlar y determinar los elementos de control, actuadores, sensores y bastidor
- Actividad 2: Replicar y ajustar un modelo matemático acorde a las necesidades del sistema de control para la regulación de nivel de cuatro tanques acoplados dinámicamente
- Actividad 3: Modelar el bastidor y demás elementos tangibles del módulo didáctico mediante el software de diseño CAD 3D Solidworks
- Actividad 4: Construcción del módulo didáctico
- Entregable: Informe del modelo matemático a usar

Objetivo 2: Diseñar el control PID de acuerdo con el comportamiento intrínseco del proceso a controlar, y su respectiva sintonización con Simulink de MATLAB

- Actividad 1: En base al modelo matemático definir la función transferencia que comandara el arreglo de control

- Actividad 2: Definir el valor de "set point" y efectuar las acciones de control en el sistema modelado para determinar las respuestas en el lazo cerrado

- Actividad 3: En base a lo realizado en las actividades uno y dos. sintonizar el algoritmo de control

- Actividad 4: Realizar la simulación del controlador PID en la planta

Objetivo 3: Desarrollar manuales de operación del módulo didáctico para la guía posterior de futuras prácticas de laboratorio.

- Actividad 1: Realizar pruebas piloto con el fin de validar el correcto funcionamiento y eficiencia del diseño

- Actividad 2: Desarrollar la práctica de laboratorio enfocada al control de nivel de tanques acompañada de un documento que indique el funcionamiento del módulo didáctico, partes y elementos del módulo, y procedimiento a realizar; el documento tendrá introducción, objetivos y marco teórico

- Entregable: Guía de laboratorio

6. Modelo Dinámico del Sistema de Control de Cuatro Tanques Acoplados

El presente capítulo plantea el modelo dinámico del sistema basado en las dimensiones de la planta, la configuración del modelo de los cuatro tanques, elementos de monitoreo y actuadores dispuestos para el funcionamiento de esta.

Los sistemas de control de flujo y nivel de líquidos forman parte importante de diferentes campos industriales, por lo que el monitoreo y disposición de la variable de dicho proceso dependen de la correcta definición de estado para determinar las condiciones operativas del sistema, esto parte de la representación de la planta y su funcionamiento por medio de ecuaciones diferenciales, que permiten el análisis transitorio de la respuesta del proceso dinámico. Este módulo didáctico de laboratorio de sistema de control tiene como objetivo ser una herramienta académica que permita interactuar a los estudiantes con una planta de proceso que simule condiciones reales de los conceptos de control multivariable, permitiendo observar, comunicarse y modificar parámetros deseados de la variable de proceso del sistema.

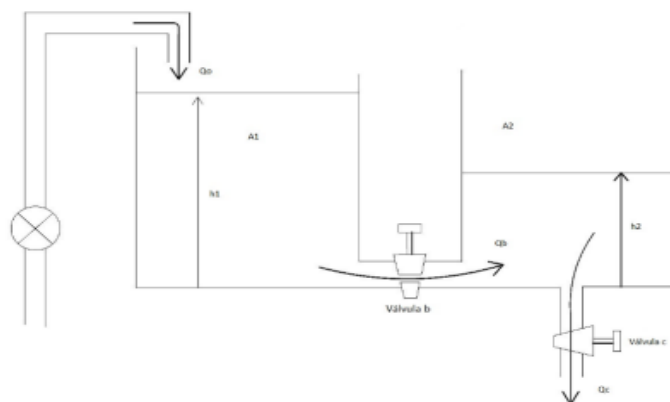
6.1 Sistemas de Control de Nivel para Procesos de Producción Industrial Multivariable

El control del nivel de tanques en términos industriales abarca sectores como el petrolero, gasífero y alimentario, donde la medición y manejo de los fluidos almacenados en grandes tanques requieren de un monitoreo y control total de los parámetros involucrados en la contención y destino del fluido almacenado. Esto conlleva al estudio y aplicación de sistemas de control automático moderno que permitan el desarrollo óptimo de los procesos industriales, para llevar a cabo una infraestructura adecuada que contenga los elementos de bombeo, sistema de extracción o recirculación, sensores, actuadores y sistema de control, es necesario describir conceptos y conocimientos teóricos involucrados con el sistema de control propuesto.

Teniendo en cuenta lo anterior, la industria petroquímica y petrolera se centralizan alrededor del control de nivel y el flujo en tanques de líquidos químicos e hidrocarburos. Por ejemplo, el control de nivel en depósitos acoplados de petróleo descrito en la figura 16 donde es posible apreciar el control de nivel de los tanques, la dependencia de alturas gracias a la válvula que permite el mezclado de los fluidos de cada tanque y la línea de salida del sistema, dicho sistema garantiza un caudal constante y fijo del crudo como también el control de gases dentro de los tanques.

Figura 16

Sistema de tanques acoplados



Nota. Tomado de Gas TransBoliviano S.A, 2020

6.2 Dimensionamiento y Requerimientos del Módulo de Tanques Acoplados

Como se ha mencionado anteriormente, el control de nivel de tanques acoplados no solo tiene múltiples aplicaciones dentro de procesos de producción en diferentes industrias, sino que también, tiene una versatilidad respecto a las posibles configuraciones de acople y conexión de los tanques, actuadores y elementos de control. Por tanto, se decidió aplicar una configuración basada en modelos comerciales empleados en procesos de producción y en trabajos académicos, dichas

referencias permitieron la selección adecuada de materiales de construcción y los equipos adecuados para garantizar un funcionamiento óptimo del prototipo.

Tabla 1

Requerimientos del sistema

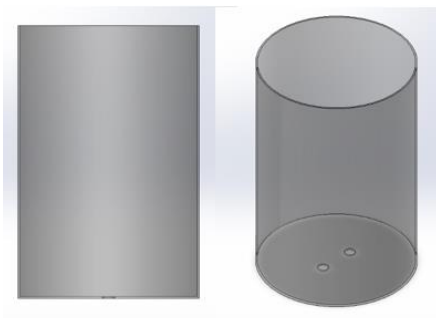
Identificación de requerimientos	
Número de tanques	4 para el control dinámico
Alimentación de fluido a los tanques	Se requiere de 2 bombas hidráulicas con un caudal entre 3-7LPM
Volumen de tanques	Se especifican tanques alrededor de los 20L cuyo material permita la visualización del nivel
Volumen del tanque de reserva	Debe igualar como mínimo el volumen de los anques a controlar (80L)
Rango de operación del control de nivel	El rango óptimo para controlar y obtener respuestas aceptables del sistema se establece entre los 10 y 30 cm
Tipo de boba y su alimentación	Se emplearán bombas de corriente directa
Controlador	Se utilizará Arduino mega por su diversidad de puertos requeridos ya que hay varias conexiones

El módulo cuenta con cuatro tanques cilíndricos extruidos en acrílico transparente cuyo espesor es de 3 mm, el diámetro 300 mm y una altura de 400 mm, los cuatro tanques contarán con las mismas dimensiones. La disposición de los cuatro tanques será en forma matricial 2x2 de forma vertical permitiendo la conexión individual de los tanques superiores con los inferiores, y existiendo un quinto tanque con la función de reserva (figuras 17, 18 y 19).

Se consideraron depósitos cilíndricos con el objetivo de reducir las perturbaciones producto del movimiento del agua ocasionado por la caída del líquido en los tanques, esto con el fin de optimizar el censado de altura del líquido por parte de los sensores.

Figura 17

Tanques de acrílico

**Figura 18**

Armazón del banco de tanques acoplados

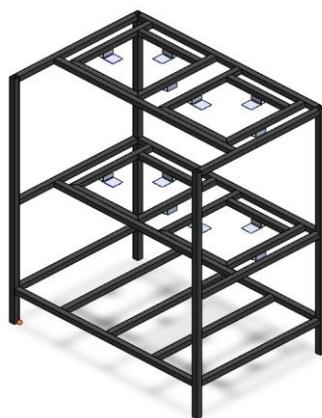
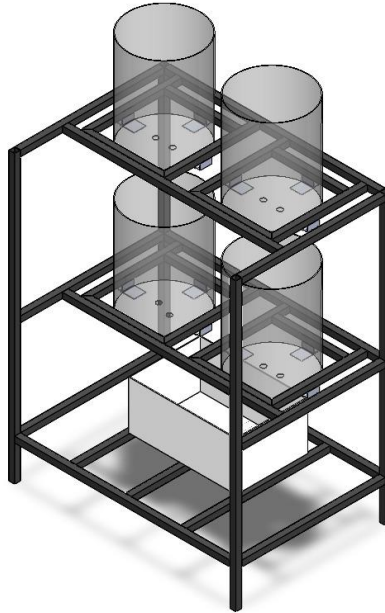


Figura 19

Estructura del banco de tanques acoplados

**6.2.1 Diseño y Análisis Estructural**

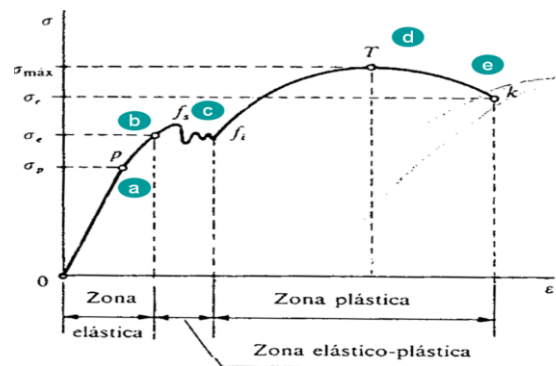
Mediante el programa SolidWorks se realizó un análisis estático del banco con el fin de mediante elementos finitos realizar un análisis de esfuerzos que brinde información valiosa acerca de la validez del diseño estructural y corroborar que las cargas que se apliquen en el sistema van a ser correctamente soportadas sin ningún problema o daño mientras se trabajen las prácticas.

Para realizar esto es importante que se retome a los principios de estos diseños, que se basan en el diagrama de esfuerzo deformación (figura 20) que indica mediante una representación gráfica el comportamiento de un material en especial cuando está sometido a cargas que puedan deformarlo. Es de conocimiento general que el esfuerzo y la deformación son diferentes en cuanto a conceptos, pero este diagrama permite la visualización de la relación en un plano.

Es de interés de esta grafica saber cuáles son los esfuerzos que sufre el material en función de la deformación que se genera de forma equivalente con respecto al tiempo, para conocer si las cargas que se les aplicarán van a generar deformaciones indeseadas o rupturas.

Figura 20

Diagrama esfuerzo deformación



Nota. Tomado de diagramaweb, Diagrama esfuerzo deformación, 2020

De la Figura 21 se logra observar cuales son los resultados de análisis gracias a elementos finitos que se realizó con el programa después de definir el material como se estableció anteriormente en el dimensionamiento. Se observa mediante un análisis de tensión de von Mises el cual es el que se utiliza para describir el comportamiento de los metales por ser la tensión efectiva, lo que cabe resaltar de este análisis es que el límite elástico es 235N, los elementos más críticos son las salientes que van a soportar los tanques, son cuatro salientes para cada tanque, en las prácticas no se van a llenar los tanques por completo ya que se tiene unos rangos de operación de 35 cm como máximo de trabajo, pero es importante considerar la carga máxima que soportaría en ese caso para realizar un buen diseño y saber que factor de seguridad es el adecuado, como tal cada tanque tiene un volumen de 28,27 L, lo cual equivalen a 28,27 Kgf ya que el líquido a utilizar es el agua que tiene una masa de 1 kg por cada 1 litro de agua, esto llevado a Newtons equivale a

277,23 N que podría ejercer cada tanque por sí solo, por ello se eligieron cuatro salientes que cada una va a tener un límite elástico de 235 N, al dividir esta carga de los tanques en 4 equivale 69,31 N distribuidos en cada saliente, esto como carga máxima, al compararlo con lo que se obtuvo en el estudio de tensiones se puede apreciar que no va a haber cargas excesivas que generen deformaciones o rupturas, para el diseño se consideró un factor de seguridad de 5,396 que asegure que esto se cumpla (figura 22).

Figura 21

Análisis de tensiones

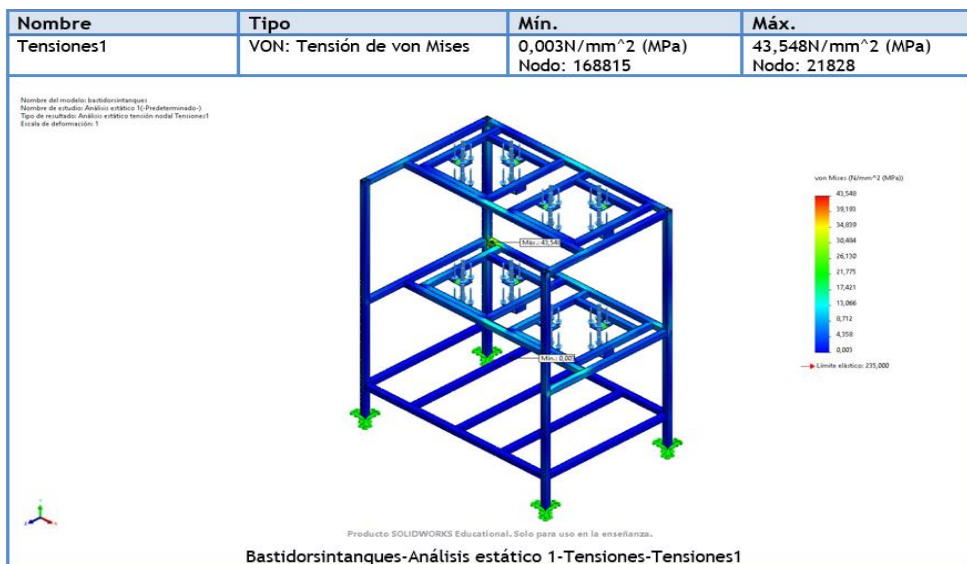
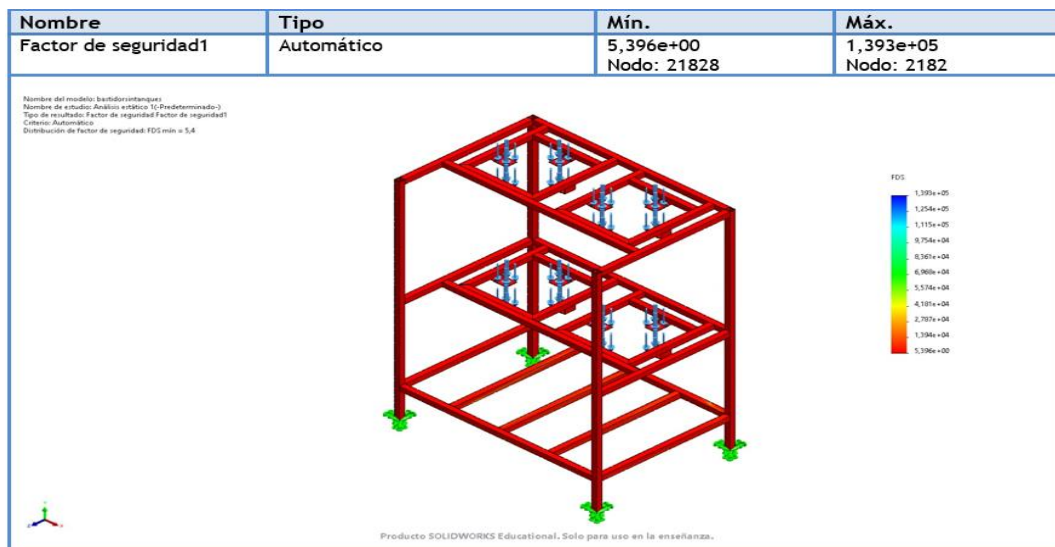


Figura 22

Factor de seguridad



6.3 Selección de Componentes

6.3.1 Actuadores

Para la bomba 1 se cuenta con una bomba DC de 12V sumergible, el eje se encuentra cerrado con un sellado estático que evita problemas en cuanto a fugas, el rotor es magnético permanente sin escobillas, no necesita mantenimiento y es totalmente impermeable, no produce mucho ruido y consume poco con su alta eficiencia, las especificaciones se encuentran en la tabla 2.

Para la bomba 2 también se va a utilizar una bomba DC de 12 V sumergible, es una bomba centrífuga con conexión roscada, es de bajo consumo eléctrico, no es ruidosa, está hecha para trabajar de manera continua, es del tipo que no tiene escobillas lo cual garantiza una larga vida útil y no requiere mantenimiento, en la tabla 3 se aprecian sus especificaciones.

Tabla 2*Especificaciones de la bomba uno*

Especificaciones Bomba uno	
Material	Plástico ABS
Potencia	18-30W
Caudal Máx.	10-12L/min
Voltaje	12-24V
Diámetro de entrada	18 mm
Diámetro de salida	11 mm
Dimensiones	80x45 mm
Altura de elevación	6 a 9 m

Figura 23*Bomba uno*

Tabla 3*Especificaciones de la bomba dos*

Especificaciones Bomba dos	
Material	Plástico
Voltaje	12V
Potencia	19-22W
Caudal Máx.	800L/H
Altura de elevación	5m

Figura 24*Bomba dos*

6.3.2 Modulo Driver

Se va a utilizar un puente H, el cual consiste en un sencillo circuito integrado que permite aplicar al sistema una cantidad de potencia que se puede ajustar a una carga, normalmente corriente continua, irá conectado un puente H para cada bomba con el fin de ajustar esta potencia ya que las bombas ambas son DC.

Tabla 4*Especificaciones del driver*

Especificaciones del driver puente H L298N 2A	
Chip	L298N
Canales	2
Voltaje lógico	5V
Voltaje de potencia	5-35V DC
Consumo de corriente	0-36mA
Capacidad de corriente	2A
Potencia máxima	25W
Dimensiones	43x43x27 mm
Peso	30g

Figura 25*Driver puente H*

6.3.3 Sensores de Nivel

Se utilizarán cuatro sensores ultrasónicos HC-SR04 con el fin de determinar el nivel en el que se encuentra el agua en cada tanque, un sensor por tanque distribuido.

Figura 26

Sensor ultrasónico



6.3.4 Procesador Arduino Mega 2560

Como núcleo del sistema se utiliza el microcontrolador Arduino UNO, es un microcontrolador que opera en un entorno de software de código abierto por lo que es clave en el hardware. Es muy útil ya que está directamente vinculado con el entorno de Matlab-SIMULINK por un lenguaje de programación propio, este entorno cuenta con una variedad de bibliotecas que son compatibles con el Arduino UNO, tiene gran capacidad de almacenamiento y de adquirir datos y un conjunto de herramientas útiles para desarrollar el software de control necesitado.

Una breve descripción del funcionamiento de este microcontrolador es que su objetivo principal es digitalizar señales que identifica como entradas en el sistema, junto con las que se vayan a manipular, con el fin de obtener y registrar cambios que se consideran salidas. Estas salidas son las que son de importancia ya que permiten interpretar, visualizar y por ende controlar los

procesos deseados. Simulink permite mediante bloques que adquieren señales analógicas y demás bloques para la operación, visualización y almacenamiento de datos tener una comunicación con el Arduino mega.

Figura 27

Arduino Mega 2560



Tabla 5

Especificaciones Arduino Mega 2560

Especificaciones Arduino Mega 2560	
Microcontrolador	Atmega 2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada min y máx	6-20V
Pines E/S digital	54(15PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente CC por pin E/S	20mA
Corriente CC pin 3,3V	50mA
Memoria flash	256KB(8KB para bootloader)
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Frecuencia de reloj	16MHz
Longitud	101,52 mm
Ancho	53,3 mm
Peso	37g

6.3.5 Caudalímetro

Para conocer el caudal con el que entra el flujo a los tanques superiores, se van a utilizar dos caudalímetros los cuales tienen como función medir caudal o gastos volumétricos de un fluido.

Figura 28

Sensor de caudal



6.4 Especificación y Descripción de la Planta

Teniendo en cuenta las referencias teóricas, el modelo matemático se basará en las ecuaciones de continuidad y Bernoulli, donde se tienen en cuenta las variables geométricas. Se debe relacionar el flujo dentro de cada tanque Q_t , el flujo de entrada q_i y el flujo de salida q_o , en función de la altura del líquido para cada tanque, teniendo en cuenta los siguientes parámetros de funcionamiento:

Cuatro tanques acoplados

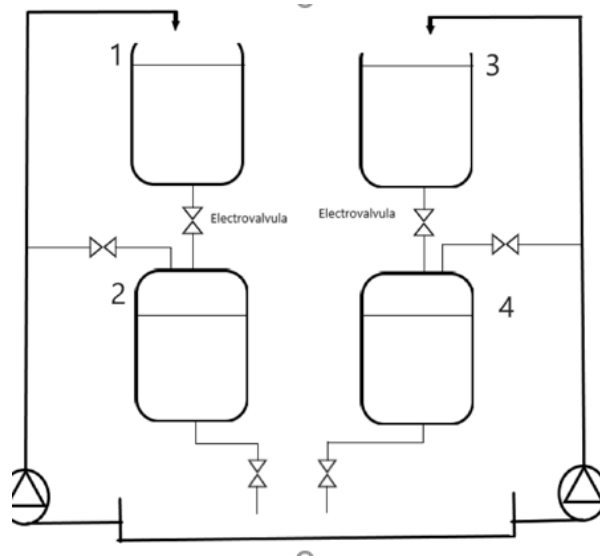
- Dos válvulas que conecten los tanques 1-2 y 3-4.
- El flujo de líquido a la entrada de los tanques 1 y 3 proviene directamente de las

bombas

- De la línea principal de alimentación a los tanques uno y tres se tendrá una salida adicional conectada a una válvula cuyo objetivo será fungir como perturbación, la apertura de la válvula será conocida y reducida hacia los tanques 2 y 4
- El caudal de la bomba estará en función del voltaje (PWM)

Figura 29

Esquema general del sistema de control de cuatro tanques



Adicionalmente se determinó la simbología que regirá las variables del sistema de control.

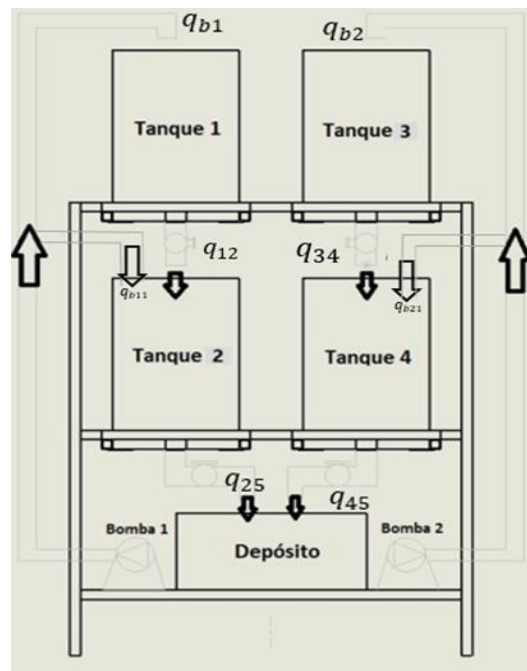
- Área transversal de cada tanque: los cuatro tanques principales contarán con las mismas dimensiones, por tanto $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A = 707 \text{ cm}^2$
- Área transversal de los orificios de salida de cada tanque: los cuatro tanques principales contarán con las mismas dimensiones, por tanto $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$
- Voltajes de operación de las electrobombas DC: u_1, u_2

6.4.1 Distribución de Caudales y Recorrido Hidráulico

En la figura 30, se observa la dirección del flujo de líquido por el circuito hidráulico, la distribución de caudales y definición de variables físicas del modelo.

Figura 30

Caudales del sistema y recorrido del fluido



Los caudales q_{12} , q_{25} , q_{34} y q_{45} son caudales de drenaje de acuerdo con el grado de apertura de la válvula correspondiente, los caudales q_{b11} y q_{b23} corresponden a los caudales de las electrobombas que alimentan los tanques 1 y 3 respectivamente; por último, tenemos los caudales q_{b12} y q_{b24} siendo estos los caudales de perturbación provenientes directamente de las bombas hacia los tanques dos y cuatro.

6.4.2 Sistema Electrónico

Para la parte eléctrica de este sistema de control a diseñar una baquela o también conocido como placa de circuitos impreso, tarjeta electrónica o placa PCB, el cuál es el soporte del circuito de componentes, es una placa de cobre en un sustrato aislante, se utilizan para diseñar PCB de un bajo proceso industrial como el que se necesita en el proyecto.

La PCB es una placa de circuito impreso que es un circuito el cual sus componentes y conductores se contienen dentro de una estructura mecánica, incluyen trazos de cobre, disipadores de calor, conductores planos y algunos terminales. Por facilidad para los fabricantes es conveniente utilizar programas los cuales faciliten la visualización de todos estos terminales y cómo va a ser distribuido el circuito para lograr construirlo con precisión y que cumpla con los fines deseados, por ello se utilizó la aplicación Eagle para generar el diseño y construirlo (figura 31).

Para la parte electrónica se cuenta con las dos bombas dc que son el corazón del banco los cuales suministran el flujo de agua desde el tanque de reserva hasta los dos tanques de la parte superior, estas bombas se ven alimentadas por una fuente de 12 voltios que son los requerimientos para que funcionen las bombas, además de estos se cuentan en el circuito los elementos de control, como parte fundamental está el Arduino mega, se utiliza debido a la gran diversidad de pines ya que se utilizan varios sensores en este proceso. Al Arduino mega va a conectarse la “baquelita” donde irán conectados dos puente H, uno para cada bomba, que son los encargados de garantizar que las bombas se detengan para que cumpla con el objetivo de control, además de estos están dos sensores de caudal al final de ambos trayectos de cada bomba hacia los tanques superiores con los que se busca conocer cómo está trabajando el flujo de las bombas y ayudan a la hora de caracterizar, y con cuatro sensores ultrasónicos, uno para cada tanque con el que se conoce el nivel

del agua en los tanques, la información de estos sensores van a activar o no los puente H de las bombas (figura 32).

Figura 31

PCB

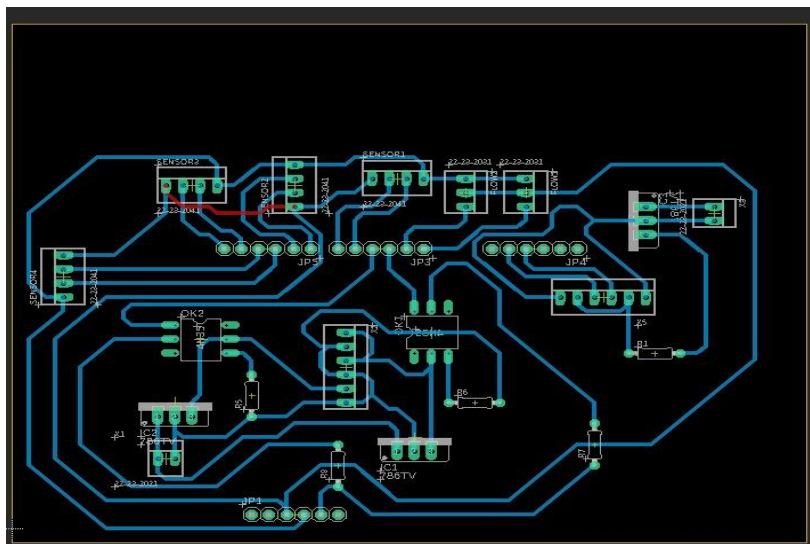
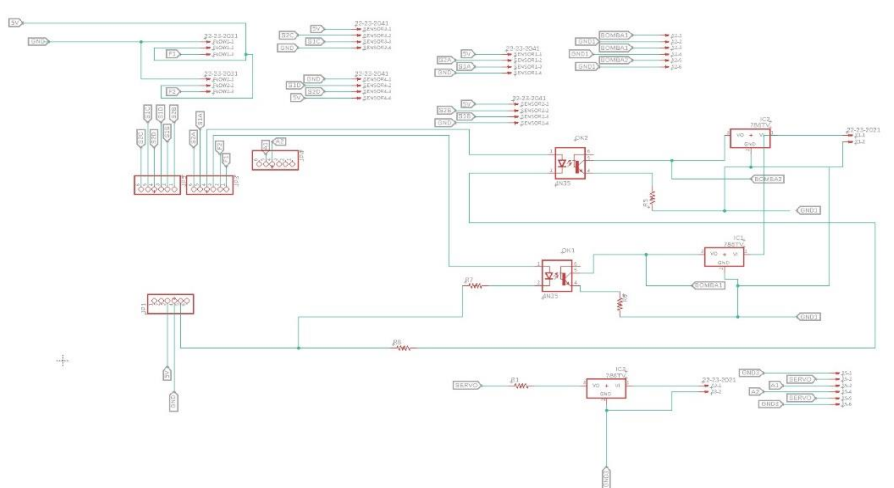


Figura 32

Diagrama electrónico PCB



6.4.3 Caracterización Dinámica de las Bombas

Para realizar la caracterización se procede a descubrir el rango de funcionamiento de las bombas, para ello se realizan diversas pruebas en las que se mide el voltaje y el caudal que se entrega a la bomba en función de la señal PWM, la cual depende del controlador PID. El rango de operación es de 120-255 (PWM) en común para ambas bombas, el rango de trabajo definido se debe tener en cuenta para el diseño del controlador y su óptimo funcionamiento dependerá en cierta parte de dicho tiempo muerto. Se realizan las mediciones de caudal en función del voltaje y la señal PWM para hallar la constante de la bomba k mediante la implementación de código en ARDUINO IDE y bloques de control en SIMULINK.

Figura 33

Diagrama de bloques para la caracterización de la bomba mediante señal PWM y lectura de alturas

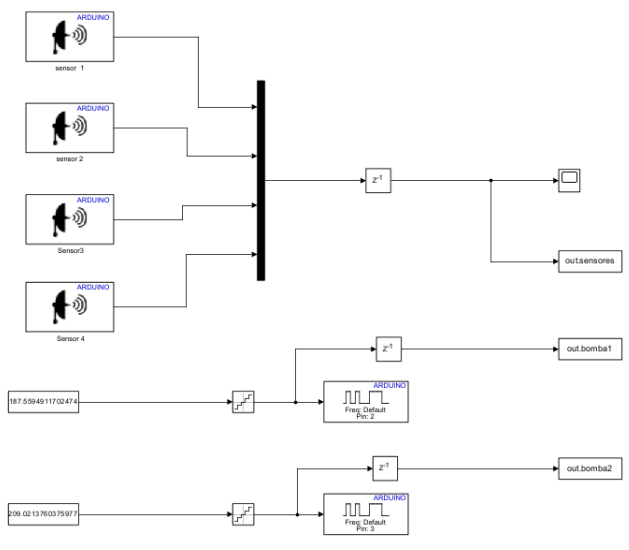
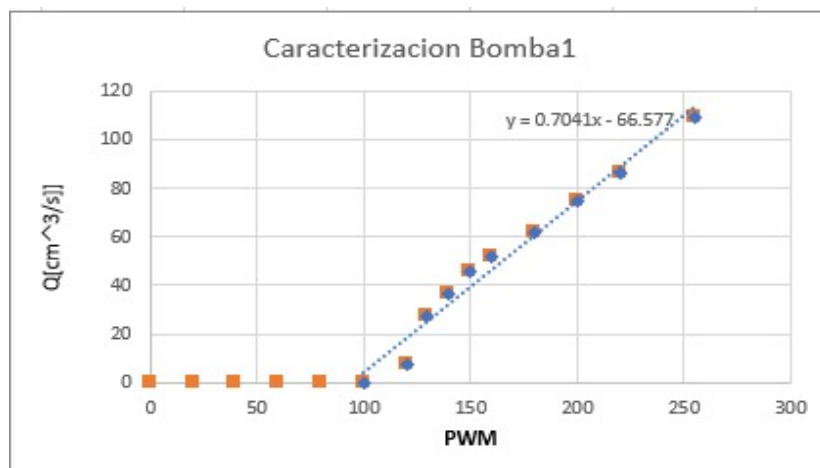


Tabla 6*Datos Bomba uno*

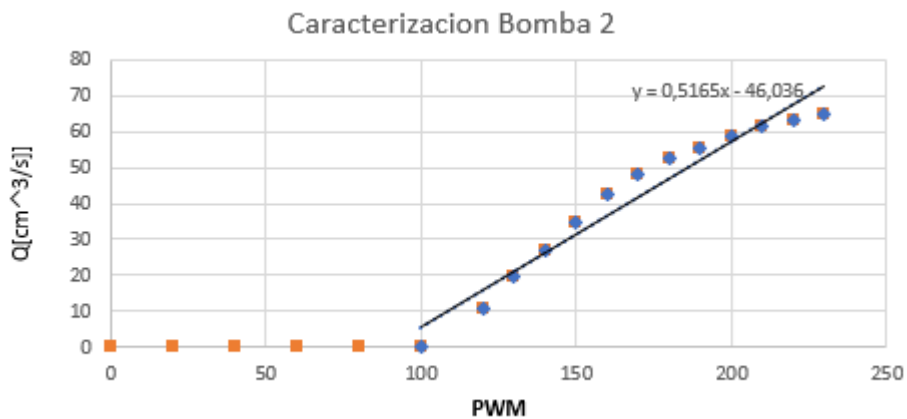
PWM	V	Q[lpm]	Q[mT3/s]	Q[cmT3/s]	k [l/(min-V)]	k ([(cm ³)/(s-V)])	Kpwm ([(cm ³)/(s-PWM)])
0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0
120	5,6	0,427	7,117E-06	7,12	0,07625	1,270833333	0,059305556
130	5,96	1,653	2,755E-05	27,55	0,277348993	4,622483221	0,211923077
140	6,25	2	3,645E-05	36,45	0,34992	5,832	0,260357143
150	6,55	2,72	4,533E-05	45,33	0,415267176	6,921119593	0,302222222
160	6,84	3	5,155E-05	51,55	0,452192982	7,536549708	0,3221875
180	7,8	3,68	6,133E-05	61,33	0,471794872	7,863247863	0,340740741
200	8,12	4,48	7,467E-05	74,67	0,551724138	9,195402299	0,373333333
220	8,72	5	8,622E-05	86,22	0,593233945	9,887232416	0,391893939
255	9,24	6,56	1,093E-04	109,33	0,70995671	11,83261183	0,42875817

Figura 34*Caracterización Bomba uno*

Los datos obtenidos que muestran la tabla 6 se analizan y arrojan el comportamiento de la bomba para distintos voltajes, dando como resultado la obtención del valor de la constante de la bomba uno graficado en la figura 34 donde se aprecia la pendiente de la recta. $K1=0.7041$

Tabla 7*Datos Bomba dos*

PWM	V	Q[lpm]	Q[mT3/s]	Q[cmT3/s]	k [l/(min-V)]	k (((cm ³)/(s-V))	Kpwm (((cm ³)/(s-PWM))
0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0
120	5,6	0,64	1,067E-05	10,67	0,114285714	1,904761905	0,088888889
130	5,94	1,173	1,955E-05	19,55	0,197474747	3,291245791	0,150384615
140	6,2	1,60	2,667E-05	26,67	0,258064516	4,301075269	0,19047619
150	6,5	2,08	3,467E-05	34,67	0,32	5,333333333	0,231111111
160	6,8	2,56	4,267E-05	42,67	0,376470588	6,274509804	0,266666667
170	7,13	2,88	4,800E-05	48,00	0,403927069	6,732117812	0,282352941
180	7,42	3,147	5,245E-05	52,45	0,424123989	7,068733154	0,291388889
190	7,8	3,31	5,517E-05	55,17	0,424358974	7,072649573	0,290350877
200	8,1	3,52	5,867E-05	58,67	0,434567901	7,242798354	0,293333333
210	8,43	3,68	6,133E-05	61,33	0,43653618	7,275603005	0,292063492
220	8,8	3,787	6,312E-05	63,12	0,430340909	7,172348485	0,286893939
230	9,13	3,893	6,488E-05	64,88	0,426396495	7,106608251	0,282101449

Figura 35*Caracterización Bomba dos*

Los datos obtenidos en la tabla 7 se analizan y permiten observar el comportamiento de la bomba para distintos voltajes, dando como resultado la obtención del valor de la constante de la bomba dos graficado en la figura 35 donde se aprecia la pendiente de la recta. $K_2=0.5165$.

7. Modelo Matemático de Tanques Acoplados

Se procedió a modelar matemáticamente los cuatro tanques acoplados, dicho modelo obedecerá a un sistema no lineal. La base de todo automatismo o control, parte de la correcta implementación de ecuaciones diferenciales o ecuaciones básicas para sistemas de segundo orden, que reproduzcan el comportamiento físico de un sistema real en términos matemáticos; dichas ecuaciones deberán ser linealizadas utilizando series de Taylor y representación en espacio de estados para hallar la función transferencia que rige el sistema dinámico, y de este modo realizar el diseño del sistema de control planteado.

$$Q_{bomba} = K_p * u(t) \quad (4)$$

$$Q_{bomba_1} = q_{b1} + q_{b12} \quad (5)$$

$$Q_{bomba_2} = q_{b2} + q_{b21} \quad (6)$$

a_{ij} : área transversal de las válvulas de regulación a la salida de los tanques

Los flujos de entrada dependen del voltaje de entrada de la bomba u_{b1} y u_{b2}

$$q_{b1} = (1 - Y_A * a_{T1}) * k_1 * u_{b1} \quad (7)$$

$$q_{b12} = Y_A * a_{P2} * k_1 * u_{b1} \quad (8)$$

$$q_{b2} = (1 - Y_B) * a_{T2} * k_2 * u_{b2} \quad (9)$$

$$q_{b21} = Y_B * a_{P4} * k_2 * u_{b2} \quad (10)$$

$$\gamma_1 = (1 - Y_A) * a_{T1} \quad (11)$$

$$\gamma_3 = Y_A * a_{p2} \quad (12)$$

$$\gamma_2 = (1 - Y_B) * a_{T2} \quad (13)$$

$$\gamma_4 = Y_B * a_{p4} \quad (14)$$

Se observa como el caudal se divide entre el caudal de alimentación de los tanques superiores y el caudal de perturbación, dicha perturbación se tiene presente para el modelo no lineal del sistema, sin embargo, en el capítulo siguiente se analizará de manera diferente el modelo matemático, ya que el método de control requiere la inexistencia de dichas perturbaciones dentro del modelo, con el objetivo de observar las respuestas del método de control frente a la alteración del sistema.

Donde:

u_{b1} y u_{b2} : Voltaje de las bombas

k_1 y k_2 : Constante de las bombas [L/voltaje]

Y_A y Y_B : porcentaje de apertura de las válvulas de entrada a los tanques uno y tres

Y_1, \dots, Y_4 : porcentaje de apertura de las válvulas de salida a los tanques uno al cuatro

γ_3 y γ_4 : porcentaje de apertura de las válvulas de perturbación de los tanques dos y cuatro

a_{T1} y a_{T2} : Área transversal de las válvulas de entrada a los tanques uno y dos

a_{p2} y a_{p4} : Área transversal de las válvulas de perturbación de los tanques dos y cuatro

7.1 Sistema Dinámico de la Configuración de Cuatro Tanques Acoplados

Las ecuaciones básicas de segundo orden se basan en dos tanques en cascada, cuya configuración permite el análisis de capacitancia volumen y área de cada tanque.

$$C = \frac{d_v}{d_H}, \text{razon de variacion de volumen respecto a la altura (15)}$$

$$v = A_t * h \text{ (16)}$$

La razón de cambio del volumen dependerá de la capacitancia de cada tanque por la diferencial de la altura, al aplicar esto a un sistema fluido donde hay caudales de entrada y salida tenemos lo siguiente:

$$C * d_H = d_v = q_i - q_o \text{ (17)}$$

$$d_v = A_t * \frac{dh_t(t)}{dt} \text{ (18)}$$

Modelo matemático parte de las ecuaciones de continuidad y Bernoulli, donde se tienen en cuenta las variables geométricas. Se debe relacionar el flujo dentro de cada tanque Q_t , el flujo de entrada q_i y el flujo de salida q_{ij} , en función de la altura del líquido para cada tanque.

$$A_t * \frac{dh_t(t)}{dt} = q_i - q_o \text{ (19)}$$

Se describe gracias a las ecuaciones la capacitancia del tanque y la resistencia a fluir por parte de las válvulas en el sistema dinámico de cada tanque.

Aplicando la ecuación anterior para cada uno de los tanques se obtiene:

Tanque N1:
$$A_1 * \dot{h}_1 = q_{b1} - q_{12} \text{ (20)}$$

$$\text{Tanque N2:} \quad A_2 * \dot{h}_2 = q_{b11} + q_{12} - q_{25} \quad (21)$$

$$\text{Tanque N3:} \quad A_3 * \dot{h}_3 = q_{b2} - q_{34} \quad (22)$$

$$\text{Tanque N4:} \quad A_4 * \dot{h}_4 = q_{b21} + q_{34} - q_{45} \quad (23)$$

Se asume el flujo pasante por la válvula como proporcional al área de su apertura, por tanto, el valor del caudal que atraviesa la válvula de regulación en la posición dada a condiciones de operación ambiente corresponderá a la siguiente ecuación.

$$q_{ij} = a_{ij} \sqrt{2gh_i} \quad (24)$$

$$q_{12}, = q_{25} = q_{34} = q_{ij} = k_v * a_{ij} * \sqrt{\Delta p} \quad (25)$$

Remplazando en las ecuaciones principales se tiene para cada uno de los tanques, obteniendo el modelo NO lineal del sistema:

$$\text{Tanque N1:} \quad A_1 * \dot{h}_1 = q_{b11} - q_{12} \quad (26)$$

$$\dot{h}_1 = \frac{\gamma_1 * k_1 * u_{b1}}{A_1} - \frac{\gamma_1 * a_{12} \sqrt{2gh_1}}{A_1} \quad (27)$$

$$\text{Tanque N2:} \quad A_2 * \dot{h}_2 = q_{12} - q_{25} \quad (28)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{\gamma_1 * k_1 * v_{b1}}{A_2} + \frac{a_{12} \sqrt{2gh_1}}{A_2} - \frac{a_{25} \sqrt{2gh_2}}{A_2} \quad (29)$$

$$\text{Tanque N3:} \quad A_3 * \dot{h}_3 = q_{b23} - q_{34} \quad (30)$$

$$\dot{h}_3 = \frac{(1-\gamma_2)k_2 * v_{b2}}{A_3} - \frac{a_{34} \sqrt{2gh_3}}{A_3} \quad (31)$$

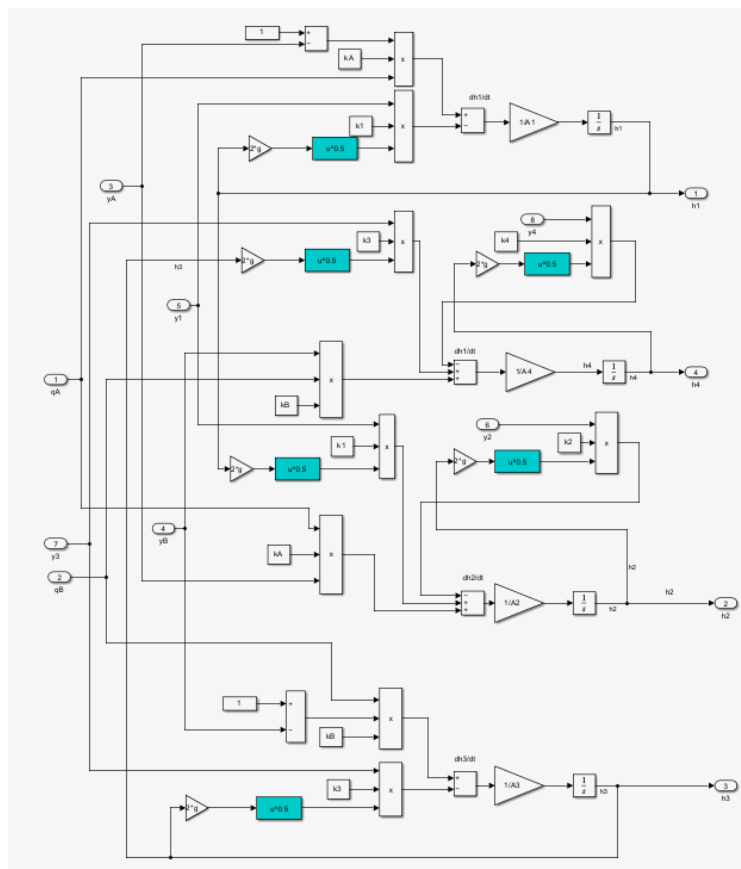
$$\text{Tanque N4:} \quad A_4 * \dot{h}_4 = q_{34} - q_{45} \quad (32)$$

$$\dot{h}_4 = \frac{\gamma_2 * k_2 * v_{b2}}{A_4} + \frac{a_{34} \sqrt{2gh_3}}{A_4} - \frac{a_{45} \sqrt{2gh_4}}{A_4} \quad (33)$$

Se implementa el software Simulink de Matlab para imitar las ecuaciones diferenciales que rigen el mencionadas anteriormente; el diagrama mostrado en la Figura 36 representa el modelo matemático en conjunto de los cuatro tanques acoplados dinámicamente, para esto se hace uso de diferentes bloques que emulan las múltiples operaciones algebraicas, adicionalmente un bloque integrados el cual permite representar un sistema que requiere retroalimentación o bucles para la iteración y cálculo numérico.

Figura 36

Diagrama de bloques para el sistema de cuatro tanques acoplados



8. Control PID de los Cuatro Tanques Acoplados

En el capítulo anterior se realizó la caracterización estática de cada una de las bombas que alimentan el sistema, representación matemática para la simulación del prototipo de tanques acoplados, donde se definió el funcionamiento y la configuración de conexión entre tanques, determinando que tenemos un sistema de primer orden para los tanques uno y tres, y un sistema de segundo orden para los tanques dos y cuatro.

El sistema de primer orden dependerá de la señal PWM que rige el caudal que envían las bombas, mientras que el sistema de segundo orden dependerá de la altura del líquido de los tanques uno y tres y la resistencia hidráulica de las válvulas de alimentación y descarga de los tanques dos y cuatro.

Los sistemas de control de fluidos tienen respuestas adecuadas a controladores proporcionales integrales derivativos, la configuración de dichos sistemas dependen del desempeño de los sensores y actuadoras encargados de registrar y monitorear el comportamiento de la planta, específicamente nuestro caso se estimara mediante un controlador PI, proporcional integral, debido a la cantidad de ruido presente en la toma de muestras de los sensores, dicho ruido en la señal complica la parte derivativa de un controlador PID, por tanto se define inicialmente el control proporcional integral que garantiza el control del sistema.

Una vez construido el prototipo se realizaron pruebas de funcionamiento, las cuales arrojaron una idea del funcionamiento del sistema y dejaron entre ver adecuaciones necesarias para una correcta toma de datos.

Para realizar la construcción del banco de laboratorio se tuvo en cuenta los requerimientos ya especificados en el apartado 6.2. Partiendo de lo mencionado se realizó en primera instancia el diseño en 3D de la planta, Figura 19. Posteriormente se ensambló el bastidor, tanques de acrílico, tanque de reserva, y el circuito electrónico, el cual abarca microcontrolador, sensores de distancia y módulos de control para los actuadores. La construcción y preparación de todos los elementos de hardware y software con el fin de realizar pruebas de funcionamiento preliminar a la implementación del control PID y desarrollar la base de datos para el análisis de las pruebas experimentales; presentaron problemas intrínsecos producto de la selección de los sensores empleados para la medición de la distancia, debido a las limitaciones económicas y falencias de fábrica presentes en los sensores ultrasónicos HC-SR04.

El bastidor de la planta se sometió a un análisis estático mediante el software SolidWorks con el fin de estimar las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción en función de las cargas estimadas, teniendo en cuenta que cada tanque tiene alrededor de veintidós litros de capacidad; dicho análisis dio como resultado un factor de seguridad de $N=5.7$, lo que indica la viabilidad de la estructura e incluso un sobredimensionamiento para las cargas a las que es sometida la estructura.

La corrección de la señal interpretada y convertida por el sensor al momento de enviarla al Arduino MEGA2560 se realizó mediante filtros Butterworth, los cuales permitieron la atenuación del ruido presente al momento de la lectura de datos por parte de los sensores, adicionalmente se emplearon tubos de PCV con el fin de atenuar la turbulencia del agua en el área superficial de lectura de cada sensor ultrasónico, disminuyendo el ruido y mejorando la medición de la altura en cada tanque, esto logró corregir la toma de los datos por parte de los sensores ultrasónicos, para ello se implementaron cuatro tubos de PVC de tres pulgadas de diámetro cuyo largo correspondió

a 47cm, uno para cada sensor ultrasónico asilando el área de lectura de los sensores respecto al bloque de agua que se encuentra en constante movimiento, esta dinámica entorpecía la lectura y correcto diligenciamiento constante de la altura.

Una vez corregida la lectura de la variable del proceso el banco de laboratorio se dispuso para la toma de datos experimentales con el fin de continuar con el desarrollo del sistema de control encargado de regir su comportamiento (**Figura 37**).

Figura 37

Banco didáctico para regular el nivel de cuatro tanques dinámicamente acoplados



Para realizar la simulación del modelo no lineal de la planta implementando diagrama de bloques mediante el software Matlab/Simulink se tuvo en cuenta los parámetros físicos y

funcionales propuestos para el módulo de laboratorio establecido en el apartado 6.2. Adicionalmente se parte de las ecuaciones matemáticas que representan el comportamiento físico del banco de laboratorio, dichas ecuaciones son descritas en el apartado 5.9.

En la **Figura 36** se aprecia la estructura de bloques encargada de representar y simular las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de la planta, por lo que los parámetros establecidos para el sistema tales como las áreas de los tanques y la caracterización de las bombas son fijos, sin embargo, para efectos de control y análisis del comportamiento de la planta en condiciones normales de trabajo, se fijaron diferentes grados de estrangulación de las válvulas hidráulicas, y niveles de tensión eléctrica de alimentación para las bombas.

8.1 Identificación del Proceso Mediante Simulación y Validación Experimental

Una vez construida la planta y validado su funcionamiento se posibilitó la toma de datos experimentales implementado un controlador proporcional integral a la planta, usando ganancias con valores empíricos y tomando múltiples pruebas hasta que el sistema alcanzara un punto de equilibrio determinado ($\text{setpoint}=10[\text{cm}]$). Los datos de las alturas de cada tanque y señal de control PWM como variable de control de caudal para las bombas de corriente directa se guardaron como base de datos para su posterior análisis gráfico mediante la interfaz gráfica del software MATLAB, el cual toma los datos obtenidos experimentalmente y los compara con el modelo matemático producto de la linealización y obtención del modelo matemático partiendo de las ecuaciones diferenciales planteadas en el **capítulo 7**.

Diferentes plantas industriales involucran procesos de alta complejidad debido a la necesidad de controlar una o más variables, dando como resultado un comportamiento no lineal

de las ecuaciones matemáticas que rigen el funcionamiento físico del sistema real, en este caso, el prototipo de control de nivel de tanques dinámicamente acoplados. Por tanto, se parte de la implementación del modelo matemático de caja gris. La existencia de este tipo de modelos está condicionada por la necesidad de encontrar modelos más adaptables y eficientes, así como por la imposibilidad de describir totalmente la dinámica de un sistema mediante el uso de modelos de conocimiento o totalmente empíricos.

Tabla 8

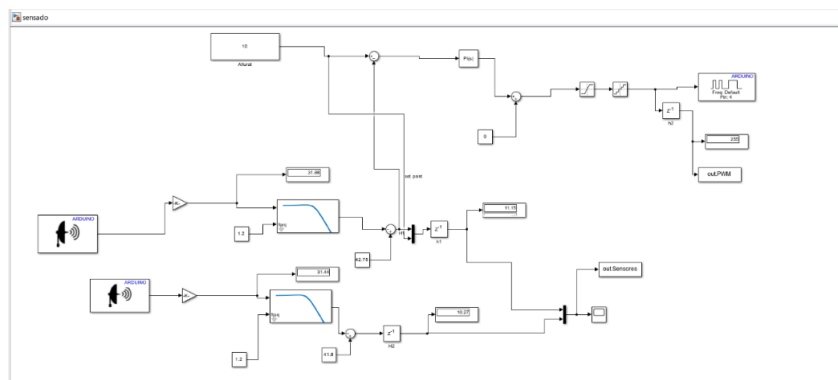
Parámetros de la planta

Descripción	Símbolo	Unidades
Área transversal de tanques	A1, A2, A3, A4	cm ²
Área de drenaje de los tanques	a1, a2, a3, a4	cm ²
Constante de las bombas	K1, K2	$[(\text{cm}^3) / (\text{s} * \text{PWM})]$
Gravedad	g	cm/s ²

Para realizar el análisis de dependencia de las variables de entrada y salida, y a su vez la comparación con un modelo matemático predictivo basado en las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema es necesario en primera instancia realizar una toma de datos experimentales haciendo uso de la planta real y la implementación del software MATLAB, el cual nos permite emplear un control PI definiendo las ganancias del sistema de manera empírica. La **Figura 37** muestra la configuración de los bloques encargados de la adquisición de las alturas de los tanques, control y recolección de la respuesta de la planta para su posterior análisis.

Figura 37

Diagrama de bloques para la obtención de datos experimentales



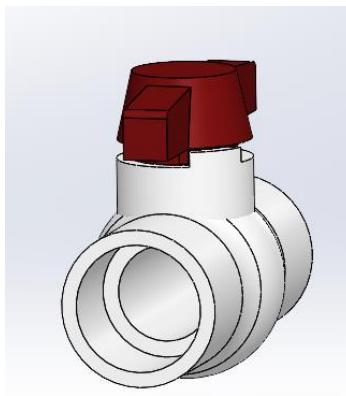
Nota. Se diseñó un control PI cuyas ganancias se obtuvieron de forma empírica con el objetivo de analizar el comportamiento de la planta de manera experimental y de esta forma validar su posible estabilidad para cada una de las baterías de tanques presentes en el sistema, tanque uno, tanque dos, tanque tres y tanque cuatro; adicionalmente se obtuvieron los datos experimentales de los tanques partiendo de la lectura de la altura arrojada por los sensores ultrasónicos y la señal PWM arrojada por el controlador PI. Por último, se validan las ganancias para el controlados PI de los tanques uno y tres.

Para llevar a cabo la comparación del modelo real y la simulación del modelo matemático se definieron valores fijos para los parámetros físicos que definen el comportamiento del sistema, del **apartado 6.2**, se obtuvieron los valores de las áreas transversales de los cuatro tanques de acrílico, del **Apartado 6.4.4** se estimó el valor de la constante de la bomba que indica la relación entre la señal aportada por el controlador y la cantidad de caudal en función del voltaje, las áreas transversales por las que el líquido pasa en las válvulas $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$, de las cuales depende la resistencia hidráulica.

Adicionalmente se realizó una estrangulación específica a cada una de las válvulas por separado, partiendo que los cuatro accesorios son válvulas de bola de 1/2 de pulgada de PVC (Figura 38) y su área transversal al estar completamente abierta es una circunferencia. Las válvulas son:

Figura 38

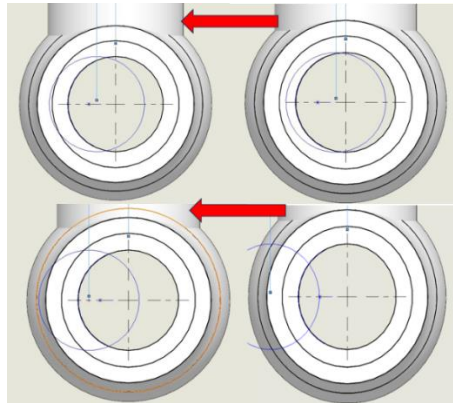
Modelo a escala de la válvula de bola en Solidworks



El área por la que pasa el líquido cuando la válvula está completamente abierta tiene un valor de $a=3.46 \text{ cm}^2$ donde el diámetro máximo de apertura corresponde al valor de $D=2.1 \text{ cm}$. A medida que se realiza el estrangulamiento de la válvula el área disminuye, y su forma geométrica cambia, para practicidad se aproxima dicha figura a una elipse, cuyas dimensiones cambian según el grado de apertura de la válvula, el comportamiento de dicha área se muestra en la **Figura 39**.

Figura 39

Área de la elipse según su grado de estrangulamiento

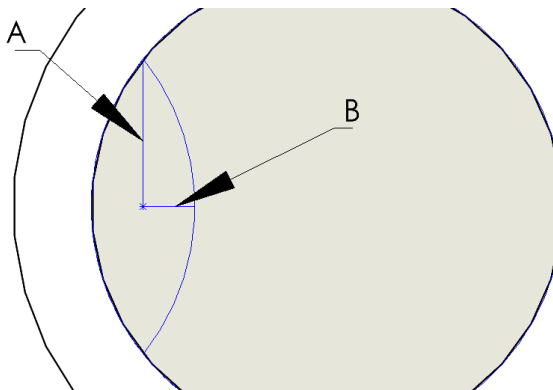


Como ya se mencionó, para los cálculos experimentales se definieron unos grados de estrangulamiento para las válvulas, para calcular el área de cada una de las cuatro válvulas se tomó una válvula idéntica adicional y se posicionó en el mismo grado de abertura de cada válvula por separado, con el fin de tomar los datos pertinentes para poder estimar el área de trabajo para cada una de las válvulas.

El área de una elipse depende del producto de los ejes parciales conformados por el centro de la elipse, sus vértices y sus co-vértices.

Figura 40

Semiejes de la elipse



El procedimiento fue realizado mediante la implementación de una válvula de igual tamaño externa al sistema, la cual fue confrontada con la estrangulación establecida para cada válvula, lo que resultó en la obtención individual de los datos necesarios para calcular las áreas para los cuatro casos por separado implementando la siguiente ecuación.

$$area_{elipse} = \pi * A * B$$

Dichos valores fueron anexados a la **Tabla 9**, en la cual se puede apreciar los datos principales para la realización de las pruebas experimentales.

Tabla 9

Áreas seccionales para las válvulas de salida

Parámetros del modelo	Símbolo	Valores
Área seccional del tanque 1	A_1	707[cm ²]
Área seccional del tanque 2	A_2	707[cm ²]
Área seccional del tanque 3	A_3	707[cm ²]
Área seccional del tanque 4	A_4	707[cm ²]
Área seccional de salida 1	a_1	0.9762[cm ²]
Área seccional de salida 2	a_2	0.7853[cm ²]
Área seccional de salida 3	a_3	0.85[cm ²]
Área seccional de salida 4	a_4	0.75[cm ²]
Cte bomba 1	k_1	0.7041[(cm ³)/pwm * s]
Cte bomba 2	k_2	0.5163[(cm ³)/pwm * s]

Una vez establecidos los parámetros iniciales de funcionamiento se procede a realizar las pruebas experimentales, de las cuales se obtuvo un comportamiento acorde a lo deseado por parte de un controlador proporcional integral donde se puede apreciar la estabilización de la planta, dicha respuesta experimental permitió la adquisición de datos de las alturas obtenidas por cada sensor ultrasónico, y la señal enviada por el controlador hacia los actuadores. La validación de dicha prueba experimental tiene el fin de comparar el funcionamiento del control de la planta realizado

empíricamente respecto al modelo matemático que rige su comportamiento y funge como base teórica. El software realiza un número determinado de iteraciones partiendo de los parámetros establecidos del sistema logrando definir un modelo en base a la combinación del sistema experimental o empírico y las ecuaciones diferenciales definidas para el sistema. Las figuras 41 y 42 muestran el comportamiento no lineal del sistema de control de tanques dinámicamente acoplados.

El software de MATLAB funciona como una herramienta de cálculos numéricos, y principalmente como interfaz gráfica la cual permite graficar y evidenciar los resultados obtenidos producto de la implementación del método de caja gris, sintonización y validación del comportamiento de la planta, ya que dicho programa permite grabar datos en tiempo real de la planta y realizar simulaciones del comportamiento de esta.

Figura 41

Datos experimentales de la planta estabilizada para los tanques uno y dos

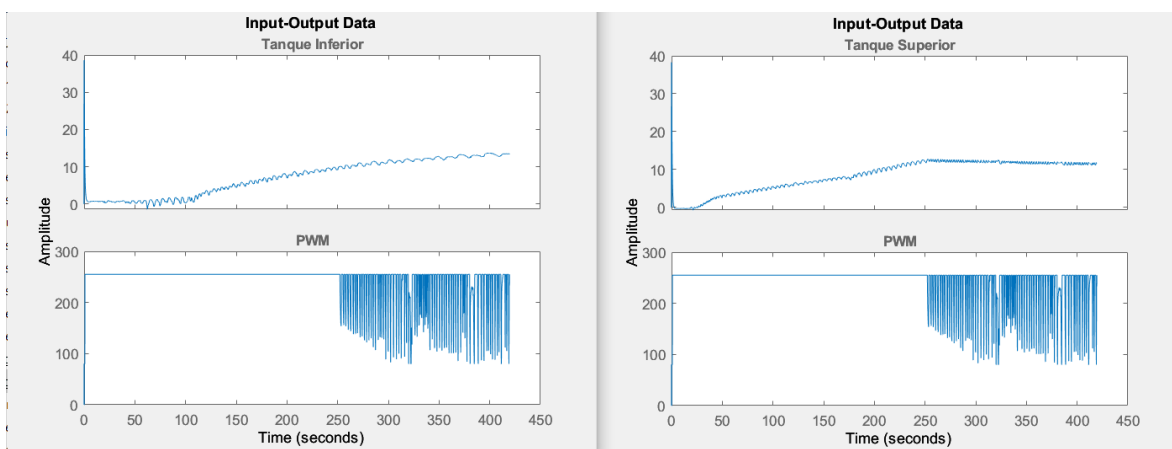
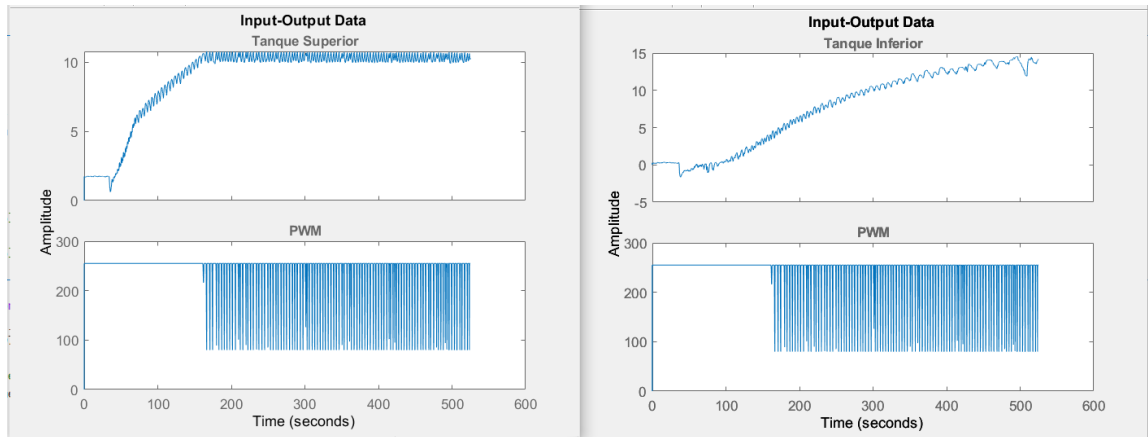


Figura 42

Datos experimentales de la planta estabilizada para los tanques tres y cuatro



Como se mencionó anteriormente, es necesario partir de una base de conocimientos teóricos que permitan al sistema de identificación de caja gris y la realización de iteraciones para comparar el modelo obtenido con el comportamiento experimental. Para esto se tomaron en cuenta las ecuaciones diferenciales plasmadas en el **apartado 7**, dichas ecuaciones son reescritas para que el software no identifique las perturbaciones del sistema, esto con el fin de observar la respuesta del controlador de manera real frente a dichas perturbaciones al finalizar el diseño del controlador.

Las ecuaciones no lineales como modelo matemático del sistema para la implementación de control.

$$\text{Tanque N1:} \quad A_1 * \dot{h}_1 = q_{b1} - q_{12} \quad (34)$$

$$\text{Tanque N2:} \quad A_2 * \dot{h}_2 = q_{12} - q_{25} \quad (35)$$

$$\text{Tanque N3:} \quad A_3 * \dot{h}_3 = q_{b2} - q_{34} \quad (36)$$

$$\text{Tanque N4:} \quad A_4 * \dot{h}_4 = q_{34} - q_{45} \quad (37)$$

El comportamiento de los tanques uno y dos es análogo a los tanques tres y cuatro, por tanto, se toman las ecuaciones del tanque superior e inferior con el fin de simplificar la identificación del modelo y posterior modelamiento matemático. Se procede a realizar la identificación de parámetros del modelo matemático que nos ayude a predecir el comportamiento del sistema y a su vez nos permita realizar una comparación experimental y teórica, validando el correcto funcionamiento de la planta.

La identificación de la función diferencial del modelo matemático se realizó mediante cálculos numéricos avanzados y múltiples iteraciones con el fin de hallar los parámetros ideales del sistema y la función transferencia ideal de la planta, esto con el fin de realizar una comparación con los resultados experimentales y el modelo matemático calculado. Dicha validación se evidencia en las **Figuras 41 y 42**, mostrando resultados superiores a un 70% lo que indica validez del comportamiento esperado y la posible controlabilidad del sistema.

Figura 43

Identificación y comparación del modelo matemático y el real de los tanques uno y dos

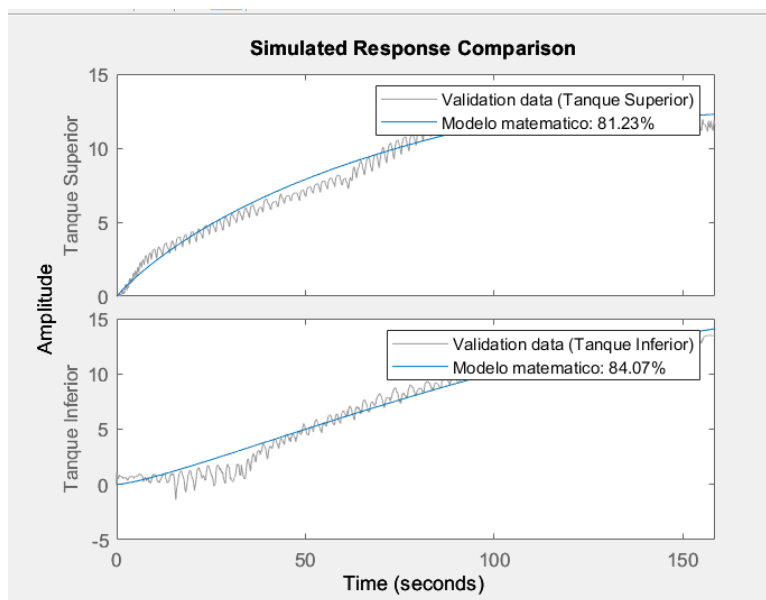
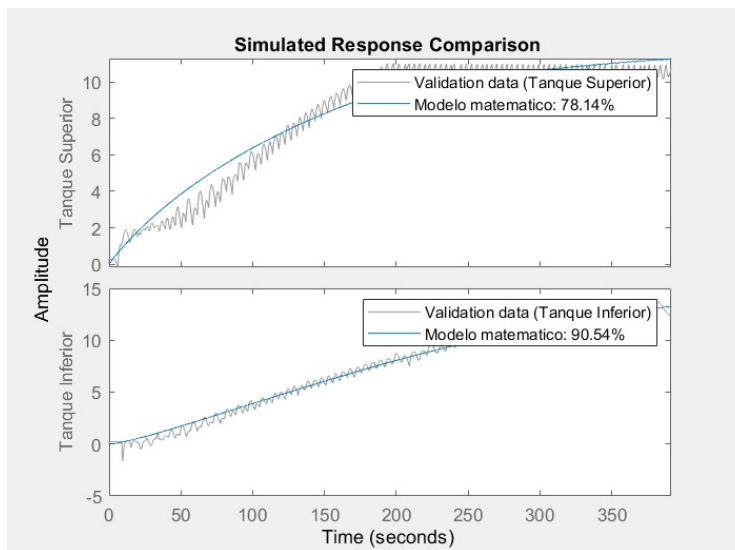


Figura 44

Identificación y comparación del modelo matemático y el real de los tanques tres y cuatro



El porcentaje obtenido indica la concordancia del comportamiento del modelo físico en función de las ecuaciones diferenciales planteadas evidenciando la similitud gráfica del modelo experimental y el modelo matemático.

8.2 Sintonización del Controlador

Si se tiene en cuenta que un sistema autónomo de control para un prototipo industrial o una planta a gran escala se basa en el procesamiento de señales de entrada (sensores) cuyo objetivo es medir el valor de la variable del proceso y culminar con la generación de un nuevo valor en la señal de salida, la cual es enviada al actuador, encargado de perturbar la variable del proceso hasta alcanzar el valor de referencia deseado. Por tanto, para regir una altura específica de los tanques se estableció un método de sintonización individual para los tanques uno y tres, y los tanques dos y cuatro, esto se debe a la diferencia en complejidad tomando los tanques superiores e inferiores como subsistemas, teniendo en cuenta las variables de entrada y salida de cada subsistema.

En primera instancia se estableció el método de sintonización para hallar las ganancias proporcional e Integral para los tanques uno y tres, los cuales obedecen a un sistema de primer orden, sus funciones de transferencias son obtenidas a partir de la linealización y representación en espacio de estados de las ecuaciones diferenciales planteadas en el modelo matemático, una vez halladas dichas funciones transferencia se representa la respuesta de escalón unitario de cada tanque por separado con el fin de sintonizar el control de los tanques superiores mediante el método de Ziegler Nichols

Las ganancias que se requieren en el sistema son, proporcional (K_p), integral (K_i) y la derivativa (K_d), todo esto a partir de la respuesta que presente el sistema en lazo abierto o lazo cerrado.

Para obtener la respuesta del sistema en función del modelo matemático teórico se plasmaron las ecuaciones diferenciales de la planta con el fin de hallar la función transferencia del sistema mediante Series de Taylor y espacio de estados para cada uno de los tanques.

Figura 45

Simulación de la planta para validar la sintonización de los tanques uno y tres

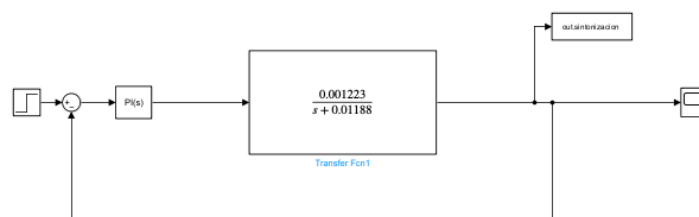


Figura 46

Simulación de la planta para validar la sintonización de los tanques dos y cuatro



Nota. Se implementó un control en cascada para los tanques inferiores debido al número de perturbaciones que podrían influir en el comportamiento de la variable principal (señal PWM) ya que se tiene una estructura de control realimentado y las entradas y salidas para el control difieren entre los tanques superiores e inferiores.

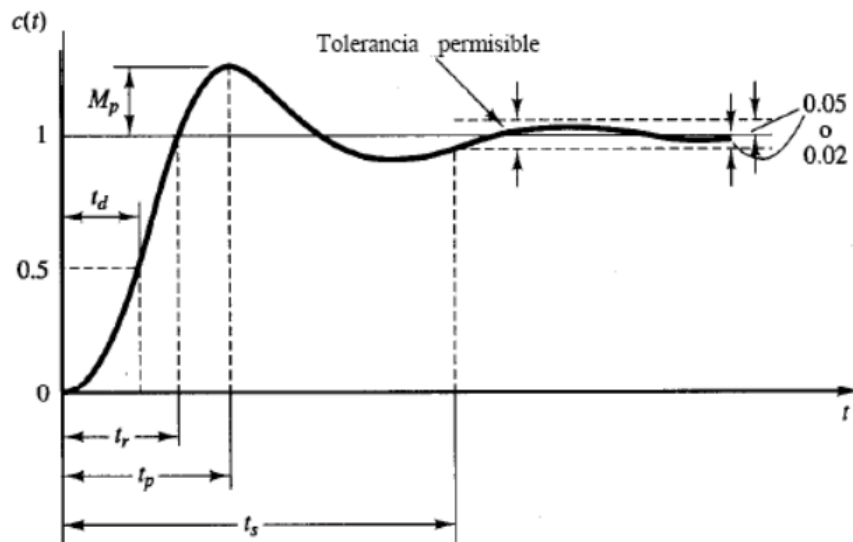
Con el fin de brindar robustez y garantizar el correcto funcionamiento, el diseño del controlador deberá cumplir ciertos requisitos de funcionamiento, los cuales tendrán como base tres parámetros. Estos criterios son el tiempo de asentamiento, porcentaje de sobre impulso y el error o perturbación máxima aceptada por el controlador; estos indicadores de diseño permitirán la correcta evaluación de la respuesta de cada tanque respecto a la estrategia de control seleccionada.

Normalmente las cualidades de funcionamiento que se desean de un sistema de control se encuentran definidas en un ámbito temporal. Los sistemas con la capacidad de guardar energía no reaccionan de forma inmediata y muestran respuestas temporales cuando se ven afectados por perturbaciones o por las entradas. Se suele considerar la respuesta temporal ante una entrada en escalón unitario cuando se establecen parámetros de rendimiento en sistemas de control, esto debido a que la entrada es fácil de generar y los cambios que produce son significativos.

Las condiciones iniciales suelen ser las que definen la respuesta temporal de los sistemas a entrada de escalón unitario. Cuando se especifican las características de respuesta transitoria en estos sistemas, se están definiendo las siguientes cualidades:

Figura 47

Curva de respuesta de escalón unitario



Nota. Tomado de Análisis de respuestas transitorias sistemas de segundo orden (2004), por Golato Marcos.

Tiempo de retardo (t_d): Necesario que la respuesta llegue a la mitad del valor final

Tiempo de levantamiento (t_r): Se necesita para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final. Para sistemas subamortiguados de segundo orden, se suelen utilizar levantamientos de 0 a 100%. Para sistemas sobreamortiguados, suele usarse el tiempo de levantamiento de 10 a 90%.

Tiempo pico (t_p): Este es el que se necesita para que la respuesta llegue al primer pico de sobrepaso.

Sobrepaso máximo (Mp): Se refiere al pico máximo de la curva

Tiempo de asentamiento (ts): Representa el tiempo que se necesita para que la curva llegue a un rango aproximado del valor final de lo especificado (2 a 5%) y permanezca dentro.

8.2.1 Linealización del Modelo Matemático

El sistema dinámico obtenido en base a las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema se debe linealizar con el objetivo de estimar su estabilidad y pronosticar su comportamiento en torno al punto o puntos de equilibrio. Partiendo de lo ya mencionado se linealizaron las ecuaciones no lineales con el teorema de Taylor, para lograr esto se debe encontrar el punto de equilibrio del sistema igualando las derivadas a cero, es decir todo lo que entra en el tanque es igual a lo que sale.

$$F(x) = F(x^*) + \nabla F(x^*)\Delta x + \frac{1}{2} \frac{d^2}{dx^2}(x^*)\Delta x^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3}{dx^3}(x^*)\Delta x^3 \quad (38)$$

Si bien, la definición aplicable de las series de Taylor se basa en una secuencia infinita, el objetivo es emplear dichas series como un polinomio de Taylor con el fin de linealizar los tanques acoplados para un punto de equilibrio establecido mediante la implementación exclusiva de la primera derivada.

La resolución de la linealización y obtención de la función transferencia requiere de la implementación de procedimientos matemáticos que nos aproximen a una solución real a partir de cálculo numérico, para esto se empleará la plataforma de programación y matemáticas computacionales ofrecidas por el Software Matlab para comprobar la linealización del modelo matemático mostrando la función transferencia de cada tanque.

Linealización del tanque uno:

Se definen los parámetros del sistema para el Tanque uno.

$$At_{10} = 707$$

$$At_{20} = 707$$

$$Av_{10} = 0.9762$$

$$Av_{20} = 0.7853$$

$$k_0 = 0.7041$$

$$g_0 = 981$$

$$h_{10} = 10$$

Mediante el cálculo computacional se obtiene la linealización de la ecuación del tanque uno.

Figura 48

Matriz A y B espacio de estados para el tanque uno

$$dx = \begin{pmatrix} \frac{k u - \sqrt{2} Av_1 \sqrt{|g h_1|}}{At_1} \\ \frac{\sqrt{2} Av_1 \sqrt{|g h_1|} - \sqrt{2} Av_2 \sqrt{|g h_2|}}{At_2} \end{pmatrix}$$

$$A_{sym} = \begin{pmatrix} -\frac{\sigma_1}{4 At_1 \sqrt{|g h_1|} \sqrt{g h_1 \bar{g} h_1}} & 0 \\ \frac{\sigma_1}{4 At_2 \sqrt{|g h_1|} \sqrt{g h_1 \bar{g} h_1}} & -\frac{\sqrt{2} Av_2 (g \bar{g} h_2 + g h_2 \bar{g})}{4 At_2 \sqrt{|g h_2|} \sqrt{g h_2 \bar{g} h_2}} \end{pmatrix}$$

where

$$\sigma_1 = \sqrt{2} Av_1 (g \bar{g} h_1 + g h_1 \bar{g})$$

$$B_{sym} = \begin{pmatrix} k \\ At_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$dx_2 = \begin{pmatrix} \frac{7041 u - 4881 \sqrt{2} \sqrt{9810}}{5755900} \\ \frac{5366716255174656 \sqrt{2} \sqrt{9810} - 4317232406462464 \sqrt{2} \sqrt{981} |h_2|}{2194783538715295625} \end{pmatrix}$$

Matriz A y B espacio de estados Tanque 1.

$$A = \begin{pmatrix} -0.01188 & 0 \\ 0.01713 & -0.01108 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0012223 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

$$D = 0$$

Esto se evidencia de mejor manera en el apéndice E.

Por lo general la función de transferencia se puede generar a partir de los espacios de estado, en el presente caso el modelo es bastante complejo y el código de Matlab a través de la función `tf`, logra calcular la función de transferencia del sistema.

Función de transferencia tanque 1:

$$tfTanque1: \frac{0,0012223}{s+0,01188} \quad (42)$$

Linealización del tanque tres:

Se definen los parámetros del sistema para el tanque tres.

$$At10 = 707$$

$$At20 = 707$$

$$Av10 = 0.85$$

$$Av20 = 0.75$$

$$k0 = 00.5165$$

$$g0 = 981$$

$$h10 = 10$$

Figura 49

Matriz A y B espacio de estados para el tanque tres

$$dx = \begin{pmatrix} \frac{k u - \sqrt{2} Av_1 \sqrt{|g h_1|}}{At_1} \\ \frac{\sqrt{2} Av_1 \sqrt{|g h_1|} - \sqrt{2} Av_2 \sqrt{|g h_2|}}{At_2} \end{pmatrix} \quad A_{sym} = \begin{pmatrix} -\frac{\sigma_1}{4 At_1 \sqrt{|g h_1|} \sqrt{g h_1 \bar{g} h_1}} & 0 \\ \frac{\sigma_1}{4 At_2 \sqrt{|g h_1|} \sqrt{g h_1 \bar{g} h_1}} & -\frac{\sqrt{2} Av_2 (g \bar{g} h_2 + g h_2 \bar{g})}{4 At_2 \sqrt{|g h_2|} \sqrt{g h_2 \bar{g} h_2}} \end{pmatrix}$$

$$dx_2 = \begin{pmatrix} \frac{1033 u}{1414000} - \frac{17 \sqrt{2} \sqrt{9810}}{14140} \\ \frac{17 \sqrt{2} \sqrt{9810}}{14140} - \frac{3 \sqrt{2} \sqrt{981} |h_2|}{2828} \end{pmatrix} \quad \text{where} \quad \sigma_1 = \sqrt{2} Av_1 (g \bar{g} h_1 + g h_1 \bar{g})$$

$$B_{sym} = \begin{pmatrix} k \\ At_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} -0.00842 & 0 \\ 0.00842 & -0.006555 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.0007306 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = 1 \quad 0$$

$$D = 0$$

Esto se evidencia de mejor manera en el apéndice F.

Para hallar la función de transferencia del subsistema del tanque tres se usaron los mismos métodos numéricos para linealizar el sistema de ecuaciones diferenciales y con esto se determinó la función de transferencia.

Función de transferencia tanque 3:

$$tf_{Tanque3} = \frac{0.0007306}{s+0.00842} \quad (43)$$

Para obtener las funciones de transferencia de los tanques inferiores se debe tener en cuenta la diferencia en las variables de entrada y salida de los tanques superiores e inferiores, por tanto, se toman como un bloque separado el subsistema de los tanques uno y tres y el subsistema de los tanques tres y cuatro partiendo de los parámetros ya establecidos para los tanques superiores. Se reevaluarán la función transferencia teniendo en cuenta la dinámica del sistema cuando los tanques superiores e inferiores están interconectados.

Linealización de los tanques uno y dos:

Espacio de estados para un modelo temporal continuo tanque uno

$$A = \begin{bmatrix} -0.00743 & 0 \\ 0.00743 & -0.00743 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0009959 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D = 0$$

Función de transferencia del tanque 1:

$$tfTanque1 = \frac{9.959e-4}{s+0.00743} \quad (44)$$

Función de transferencia del tanque 2:

$$tfTanque2 = \frac{0.00743}{s+0.00743} \quad (45)$$

Linealización de los tanques tres y cuatro:

Espacio de estados para el modelo temporal continuo de los tanques

$$A = \begin{bmatrix} -0.00842 & 0 \\ 0.00842 & -0.00709 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0007306 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Función de transferencia del tanque 3:

$$tfTanque3 = \frac{0.0007306}{s+0.00842} \quad (50)$$

Función de transferencia del tanque 4:

$$tfTanque4 = \frac{0.00842}{s+0.00709} \quad (51)$$

8.2.1.1 Tanques Superiores.

Gracias al enfoque de Ziegler-Nichols, es posible ajustar de manera experimental el controlador PID sin necesidad de emplear ecuaciones previas sobre la planta o el sistema controlado. Este procedimiento permite lograr una respuesta al escalón en el sistema de retroalimentación con un máximo sobrepaso del 25%, lo cual se considera un valor resistente y presenta características favorables de estabilidad y velocidad para sistemas. Este método es particularmente adecuado para sistemas que son inicialmente estables en su configuración de lazo abierto y que tienen un período de retardo desde la recepción de la señal hasta que comienza a actuar. Dado que las funciones de transferencia del sistema no son conocidas inicialmente y se

busca establecer los parámetros de control del PID, el método de Ziegler-Nichols se emplea en esta situación.

Este método permite hallar cuales son los coeficientes en el sistema de control, tanto K_p , como K_i y K_d , para ello es necesario realizar un análisis a la respuesta de escalón de cada uno de los tanques, este análisis se realiza de manera individual con el fin de hallar los tiempos muertos del sistema T_1 y T_2 , tiempo inferior y de subida respectivamente, para ello a la gráfica de escalón se le traza una recta tangente en los puntos de inflexión, esta gráfica también nos da información necesaria como dx y dy que es la altura o amplitud a la que llega la señal, se necesita esto para hallar K_0 que es el valor de la constante de tiempo del sistema, esta constante va a definir cuáles son los coeficientes dependiendo de cómo se analice el sistema, se va a trabajar un sistema PI para analizar la sintonización en este caso inicial, por lo que las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$K_0 = \frac{dxT_2}{dyT_1} \quad (39)$$

Con este K_0 como se mencionó permite hallar los demás coeficientes que son K_p , K_i y K_d , en este caso al ser un controlador PI el K_d es igual a 0. Para definir el PID:

$$PID = K_p + K_d * tf([1 \ 0], [1]) + K_i * tf(1, [1 \ 0]) \quad (40)$$

Para calcular el diagrama de bloques reducido en todo el sistema:

$$GT = G_S * \frac{PID}{1 + G_S * PID} \quad (41)$$

Este es el sistema completo retroalimentado. Con esto se puede obtener una respuesta mucho más acertada

Matlab como herramienta gráfica permite realizar de manera sencilla la representación de la respuesta del sistema en función de los cálculos de las ganancias producto de la sintonización lo que permite modificar dicha respuesta optimizando la sintonización.

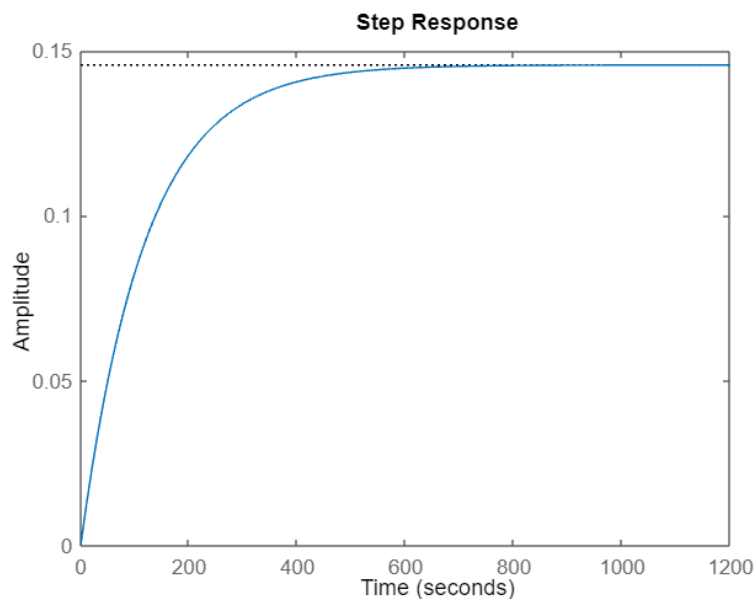
Gracias a esto se pueden realizar unos bloques de simulación que representen la planta y permitan graficar la respuesta del sistema partiendo de las ganancias obtenidas y la función transferencia obtenida mediante la linealización de las ecuaciones diferenciales del sistema.

Para el tanque uno se tiene lo siguiente:

Una vez linealizado el subsistema del tanque uno mediante la herramienta gráfica ya mencionada y partiendo de la función transferencia observada en la **ecuación 42** se representa en la **Figura 49** la respuesta al escalón unitario del sistema para el tanque uno.

Figura 50

Respuesta de escalón unitario para el tanque uno

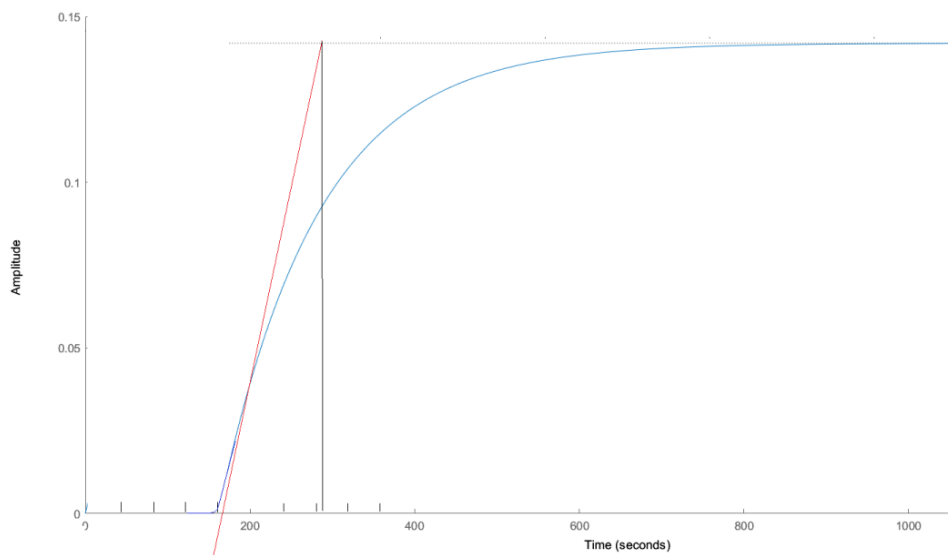


Se aprecia la estabilización del sistema entre ochocientos y mil segundos, dicho tiempo deberá compararse con la respuesta obtenida en la simulación y el comportamiento en la planta al momento de evaluar las ganancias obtenidas de la sintonización.

Para hallar los tiempos muertos se realizan los cálculos desde la parte inferior y la superior mediante rectas tangentes en la gráfica de la respuesta del proceso (figura 50) siendo T1 el inferior que es una resta con el punto donde toca la recta en la parte inferior y el punto en que apenas comienza a variar la gráfica y T2 es el tiempo de subida, con el punto de nuevo donde corta la recta en la parte inferior y la proyección del punto máximo de la recta tangente hacia abajo.

Figura 51

Medición de tiempo muerto



Utilizando el análisis ya mencionado para hallar K_p , K_i y K_d se obtienen los siguientes resultados ya optimizados.

Tabla 10

Datos de sintonización por Ziegler-Nichols tanque uno

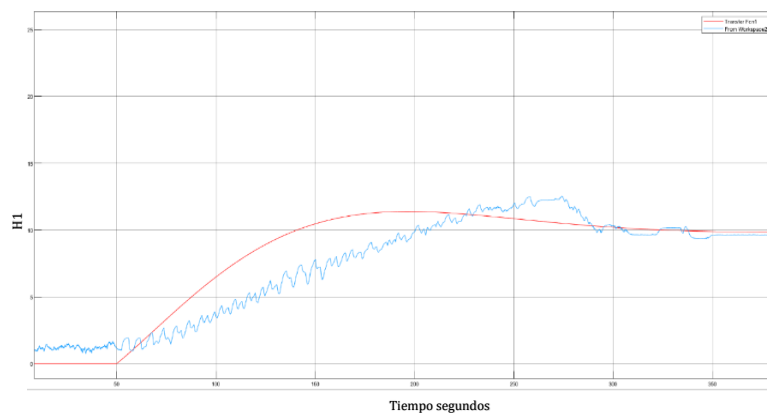
	Tanque uno
T1	14
T2	70
Kp	10,12
Ki	0,36
Kd	0

A continuación, se reemplazan las ganancias obtenidas de la sintonización y se le da los valores de la función transferencia en un sistema de bloques que simula el comportamiento del tanque uno que representen la planta que permite graficar la respuesta del sistema partiendo de las ganancias halladas y la función transferencia obtenida mediante la linealización de las ecuaciones diferenciales del sistema.

En la **figura 51** se aprecia el comportamiento de la simulación respecto a la planta en funcionamiento, se aprecia una diferencia en los parámetros de funcionamiento del controlador, sin embargo, la curva real sigue el patrón esperado y plasmado en la simulación.

Figura 52

Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque uno



Con el fin de estimar el rendimiento del controlador se analizó por separado la respuesta real y la simulada con el fin de comparar y tener una idea certera del comportamiento esperado y la respuesta real del sistema, teniendo en cuenta los parámetros de diseño del controlador.

Figura 53

Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque uno

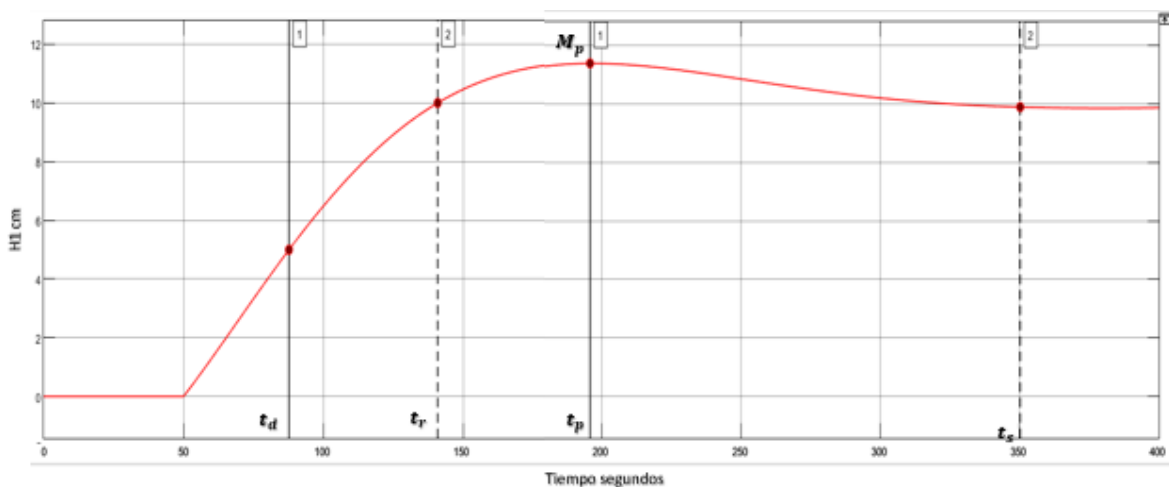
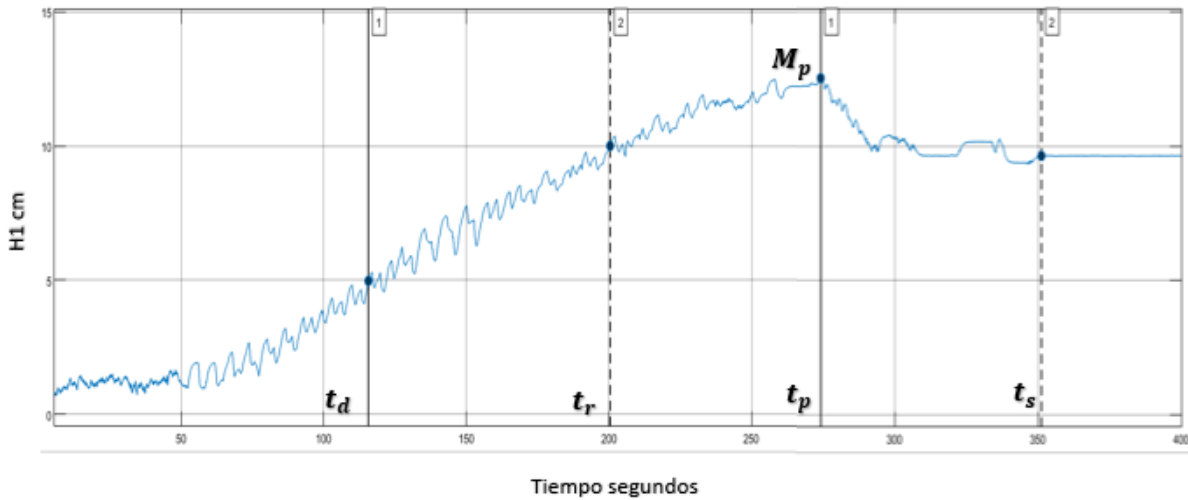


Figura 54

Respuesta y comportamiento real del sistema tanque uno



El análisis muestra un tiempo de estabilización con valores similares para ambos sistemas, siendo este tiempo para el sistema simulado y el sistema real un valor menor al tiempo de respuesta de estabilización mostrado por la función de transferencia y su respuesta de escalón unitario (Figura 49), en la cual el sistema se estabiliza alrededor de los ochocientos segundos.

La **Tabla 11** muestra el desempeño del controlador y la similitud de la simulación respecto al funcionamiento del módulo físico, mostrando una respuesta aceptable teniendo en cuenta que el sistema alcanzó la estabilidad en un tiempo menor a los cuatrocientos segundos.

Tabla 11

Índice de rendimiento del controlador para el tanque uno

Parámetros de control	Simulación	Planta real
Tiempo de retardo [Seg]	87.664	115.627
Tiempo de crecimiento [Seg]	140.884	200.389
Tiempo pico [Seg]	195.835	273.36
Tiempo de establecimiento [Seg]	350.196	351.154
Porcentaje de sobresalto %	13.83	14.5

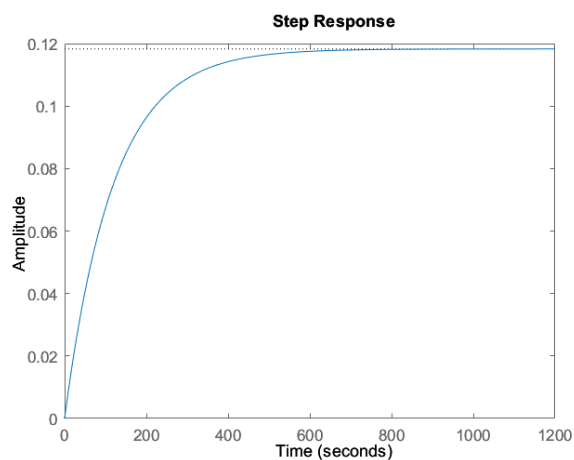
Nota. Esta tabla muestra el desempeño del controlador y la similitud de la simulación respecto al funcionamiento del módulo físico, mostrando una respuesta aceptable.

Para el tanque tres se tiene lo siguiente:

Una vez linealizado el subsistema del tanque tres mediante la herramienta gráfica ya mencionada y partiendo de la función transferencia representada en la **ecuación 43** se representa en la **Figura 55** la respuesta al escalón unitario del sistema para el tanque tres.

Figura 55

Respuesta de escalón de la función transferencia para el tanque tres



Se aprecia la estabilización del sistema entre seiscientos y ochocientos segundos, dicho tiempo deberá compararse con la respuesta obtenida en la simulación y el comportamiento en la planta al momento de evaluar las ganancias obtenidas de la sintonización.

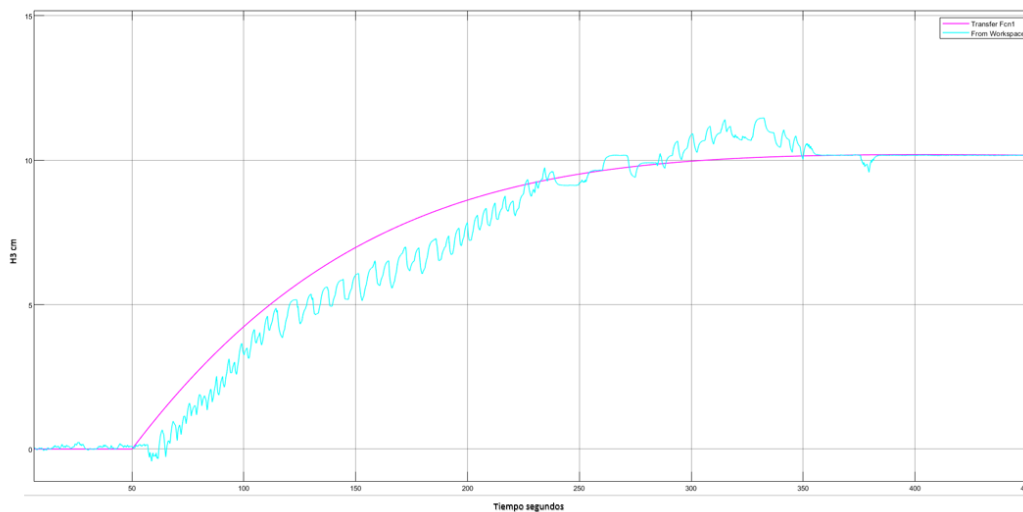
Tabla 12

Datos de sintonización por Ziegler-Nichols tanque tres

Tanque tres	
T1	17
T2	115
Kp	14
Ki	0,16
Kd	0

Figura 56

Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque tres



Para la evaluación del desempeño del controlador en el tanque tres, se emplea la misma metodología utilizada en el tanque uno, para esto se ubican los parámetros ya definidos sobre cada

una de las curvas, tanto en la respuesta simulada como en la respuesta de la planta real, con el fin de comparar los resultados obtenidos en el proceso de control de nivel de dicho tanque.

Figura 57

Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque tres

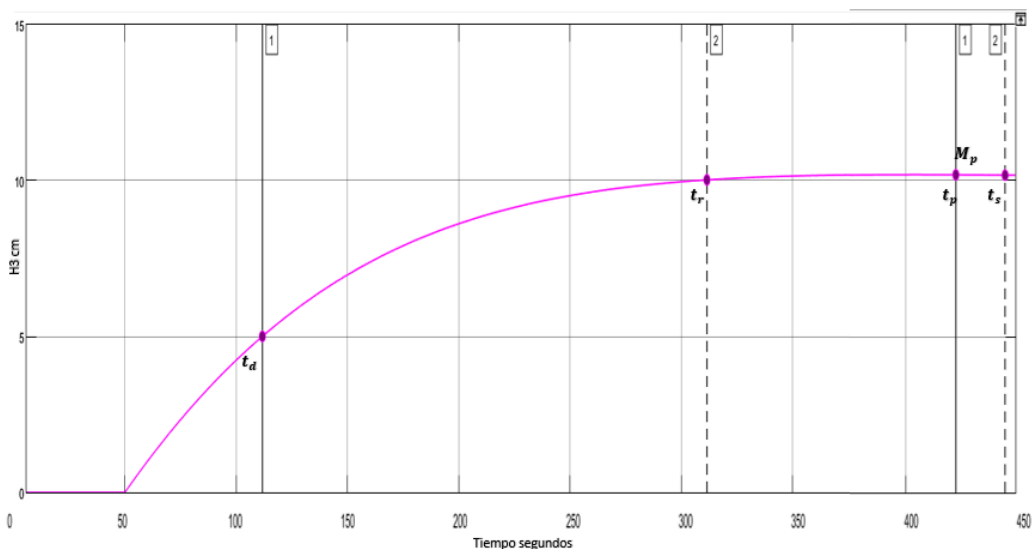
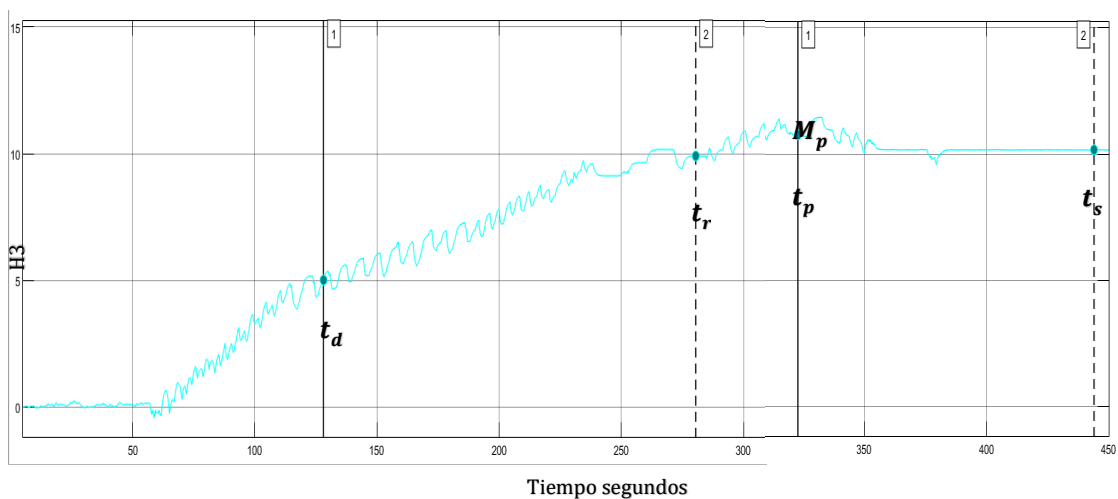


Figura 58

Respuesta y comportamiento real del sistema tanque tres



El análisis muestra un tiempo de estabilización con valores similares para ambos sistemas, siendo este tiempo para el sistema simulado y el sistema real un valor menor al tiempo de respuesta de estabilización mostrado por la función de transferencia y su respuesta de escalón unitario (Figura 55), Se puede apreciar una igualdad en el tiempo de estabilización para ambos escalones unitarios, esto evidencia la similitud de respuesta esperada para dos subsistemas iguales.

Tabla 13

Índice de rendimiento del controlador para el tanque tres

Parámetros de control	Simulación	Planta real
Tiempo de retardo [seg]	111.761	128.142
Tiempo de crecimiento [seg]	311.459	280.451
Tiempo pico [seg]	422.471	322.779
Tiempo de establecimiento [seg]	445.193	443.978
Porcentaje de sobresalto %	2	1.7

Nota. Esta tabla muestra el desempeño del controlador y la similitud de la simulación respecto al funcionamiento del módulo físico, mostrando una respuesta aceptable.

Si bien los tanques superiores tienen un comportamiento aceptable y se estabilizan adecuadamente en un tiempo prudente, la similitud de ambos tanques muestra una igualdad total, esto se evidencia en el sobre impulso o máximo pico en el tanque uno, el cual supera el 10% mientras que para el tanque tres antes no supera el 5%. Uno de los factores de dicha desigualdad recae en la diferencia de caudal de alimentación de las bombas, ya que la relación de señal PWM-caudal de la bomba uno es mayor que el de la bomba dos, lo cual resulta en una dificultad del controlador al atenuar el error presentado después de superar el punto de establecimiento esperado.

8.2.1.2 Tanques Inferiores.

Por otro lado, al momento de controlar el sistema con un conjunto de tanques acoplados fue necesario establecer una nueva arquitectura de control en cascada, cuyas características permitieran manejar la dinámica de las perturbaciones producto de la conexión de los tanques. El control PID en cascada consta de la retroalimentación adecuada de las variables del proceso como el manejo del “setpoint” de cada controlador, dicha estructura se estableció dentro del algoritmo MATHWORKS de MATLAB donde la herramienta de Sisotool permite modificar el lugar geométrico de las raíces del sistema hasta ubicar los polos y ceros dentro de los parámetros de diseño del controlador, y de esta manera alcanzar una respuesta coherente y viable del sistema (Figuras 64 y 71).

Para el análisis en conjunto de los tanques superior en inferior como un sistema de control acoplado y dinámico se tiene en cuenta las variables de entrada y salida de cada tanque, ya que la altura de los recipientes dos y cuatro dependen de su caudal de salida en función de la resistencia hidráulica de la válvula y del caudal de salida de los recipientes uno y tres, por tanto, es necesario implementar un control PI en cascada partiendo del espacio de estados de nuestro modelo matemático, lo que nos permite evaluar dichas perturbaciones mediante la retroalimentación de las alturas cuyo comportamiento afecta la variable principal, eliminando las perturbaciones del control.

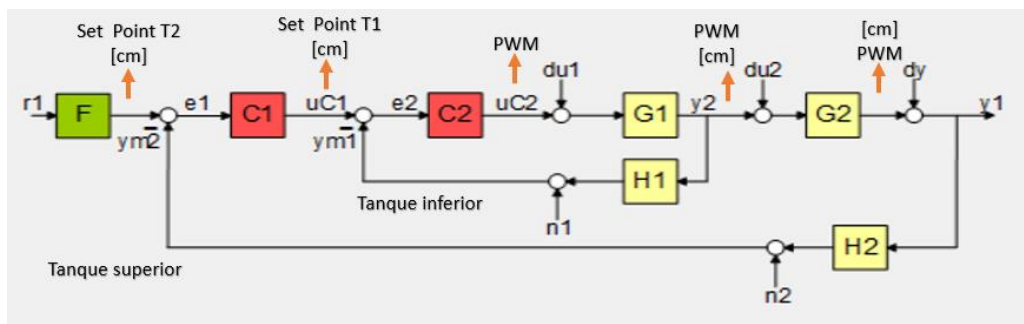
Por tanto, la sintonización de dicho conjunto unificado como un sistema de control en cascada difiere en el espacio de estado del sistema respecto a la sintonización de los tanques superiores analizados individualmente.

Se parte de una descripción general del comportamiento del sistema basado en las ecuaciones diferenciales que representan el modelo no lineal de la planta, posteriormente se linealiza el modelo matemático y mediante un análisis particular entre las variables de entrada y salida para cada tanque se obtiene la función transferencia de cada tanque analizado de manera individual.

Por tanto, el código de Matlab se modifica con el fin de hallar matrices A y B que rigen el comportamiento de cada tanque por separado, el código que realiza la linealización y análisis de espacio de estados.

Figura 59

Arquitectura de control para la dinámica de los tanques acoplados



Fuente. Sisotool Matlab

El diagrama muestra la estructura de un control PI en cascada, el cual implementa un bucle cerrado para cada uno de los subprocesos, los cuales tienen una dependencia en función del punto de ajuste y el tipo de señal de salida de cada bloque.

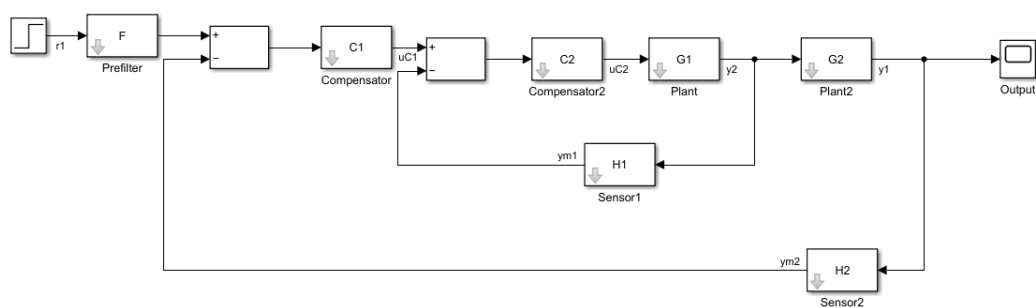
Tabla 14

Variables de entrada y salida de cada tanque

	Entrada	Salida
Tanque superior	PWM	Altura tanque superior
Tanque inferior	Altura tanque superior	Altura tanque inferior

Figura 60

Modelo en simulink del control en cascada para los tanques superior e inferior



Las características dinámicas del sistema no garantizan convergencia mediante la sintonización por el método de Ziegler Nichols por tanto, se seleccionó el método de lugar geométrico de las raíces con el fin de sintonizar y hallar las ganancias del control conjunto en cascada para los tanques acoplados; para sintonizar el controlador de nivel de tanques acoplados se emplea las funciones transferencias halladas en la linealización del modelo matemático se grafican mediante la herramienta grafica de MATLAB el lugar geométrico de las raíces, a los cuales se les agrega un integrador y un cero real con el fin de modificar la ubicación de los polos y ceros del sistema

Se procede a determinar las ganancias de cada controlador analizando los tanques por parejas, uno y dos y tres y cuatro respectivamente, para esto se determinaron las ecuaciones de compensación para cada controlador y se igualaron con la ecuación 2.

El método de sintonización seleccionado se valida teniendo en cuenta los parámetros de respuesta del sistema, como el tiempo de subida, el tiempo de establecimiento y el porcentaje de sobrepaso, con el fin de cumplir con los requerimientos de la planta.

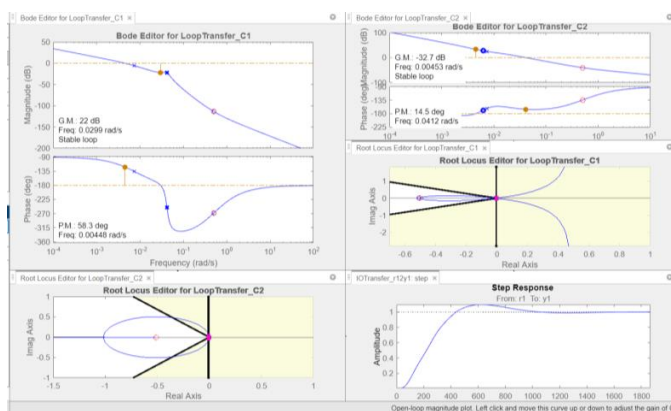
Ya definida la arquitectura de control se procede a insertar el integrador y el cero real para cada compensador

Para el tanque dos se tiene:

Una vez linealizado el subsistema de los tanques uno y dos mediante la herramienta gráfica ya mencionada y partiendo de la función de transferencia representadas en las ecuaciones 44 y 45 se representa en la **Figura 64** la respuesta al escalón unitario del sistema para los tanques uno y dos.

Figura 61

Interfaz de sisotool toolbox para la ubicación de polos y ceros tanques uno y dos

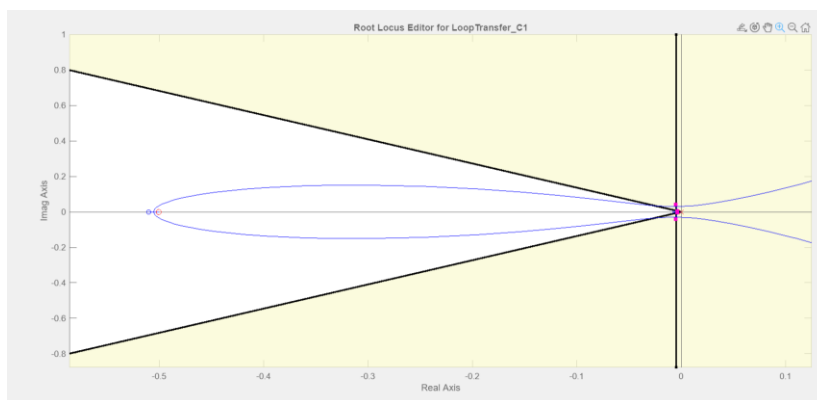


Fuente. Matlab

Partiendo de las especificaciones del sistema para el control de nivel y la estructura seleccionada, se procede a definir en el software dicha selección para proseguir con la sintonización de la planta.

Figura 62

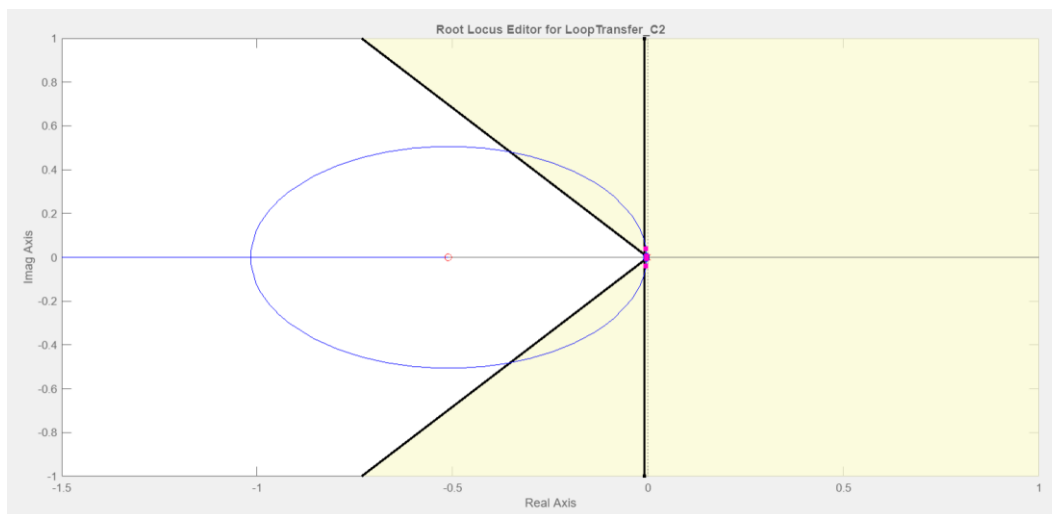
Lugar de raíces y ceros del sistema para el compensador tanque uno



Fuente. SISOATOOL MATLAB

Figura 63

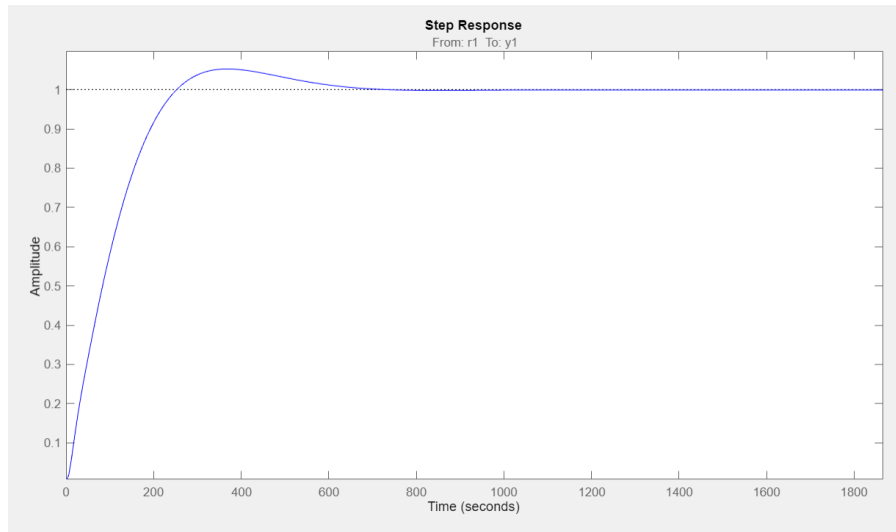
Lugar de raíces y ceros del sistema para el compensador tanque dos



Fuente. SISOATOOL MATLAB

Figura 64

Respuesta de escalón unitario de la función transferencia compensada para el sistema de control de la altura uno y altura dos



El resultado de la sintonización para los tanques uno y dos se muestra en el siguiente análisis de resultado, donde se plasman las compensaciones del sistema obtenida tras la ubicación de los polos y ceros basándonos en los principios de funcionamiento de un control PID paralelo.

$$c_1 = 178 * \frac{(0.00752+1.5s)}{s} \quad (46)$$

$$c_2 = 0.0075 * \frac{(0.006+1.34s)}{s} \quad (47)$$

Las expresiones deberán ser igualadas con la función transferencia en la cual se omitió la fase derivativa en la función transferencia del controlador.

$$178 * \frac{(0.00752+1.5s)}{s} = kp + \frac{ki}{s} + 0 \quad (48)$$

Ganancias para el compensador C1

$$k_{p_1} = 268$$

$$k_{i_1} = 1.34$$

$$0.0075 * \frac{(0.006+1.34s)}{s} \quad kp + \frac{ki}{s} + 0 \quad (49)$$

Ganancias para el compensador C2

$$k_{p_2} = 0.0101$$

$$k_{i_2} = 0.000045$$

Tabla 15

Ganancias tanque dos

	Kp	Ki
PIsecundario	268	1,34
PIprincipal	0,0101	0,000045

La gráfica 65 muestra la respuesta esperada por la planta al momento de controlar la altura del tanque uno o el tanque dos en conjunto.

Figura 65

Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque dos



Para determinar la fiabilidad y rendimiento del control de tanque inferior dos, se empleó la misma metodología de análisis mostrada en el **apartado 8.2.1.1**. Analizando el comportamiento tanto de la simulación como la respuesta real de control de la altura del tanque en cuestión.

Figura 66

Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque dos

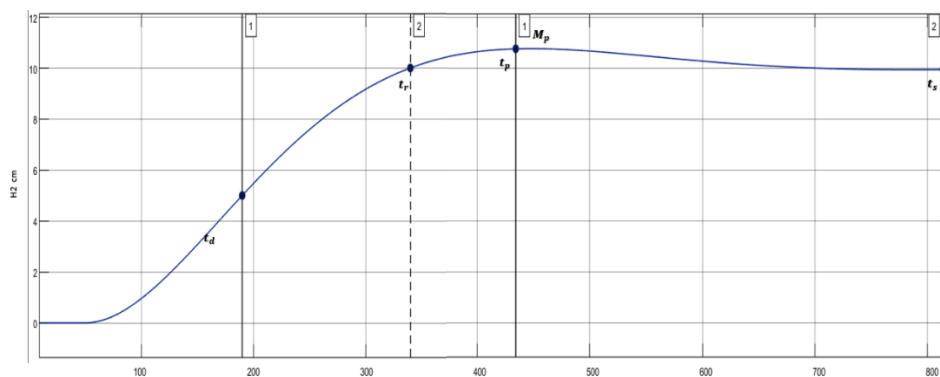
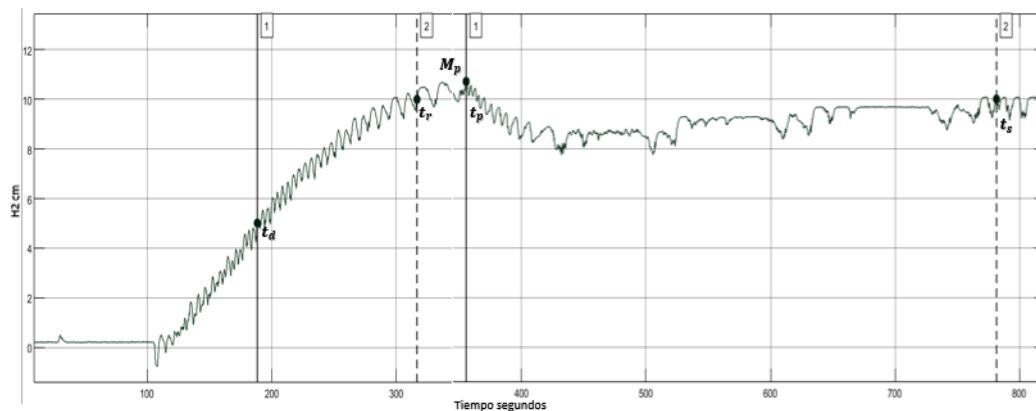


Figura 67

Respuesta y comportamiento real del sistema tanque dos



Los parámetros de funcionamiento de los tanques inferiores difieren a los tanques superiores, esto se evidencia en el tiempo de retardo, tiempo de crecimiento, tiempo pico y el tiempo de establecimiento; los datos tomados evidencian que el tanque dos duplica el valor de los parámetros de eficiencia del controlador del tanque uno cuando este se analiza y controla de manera individual, esto se debe al funcionamiento y estructura interna del controlador, ya que el tanque dos no depende directamente del caudal suministrado por la bomba.

La **Tabla 16** muestra un tiempo de estabilización con valores similares para la simulación y la planta, dando un valor igual al “setting time” obtenido en la respuesta de escalón unitario obtenido de la función transferencia compensada (Figura 64).

Tabla 16

Índice de rendimiento del controlador para el tanque dos

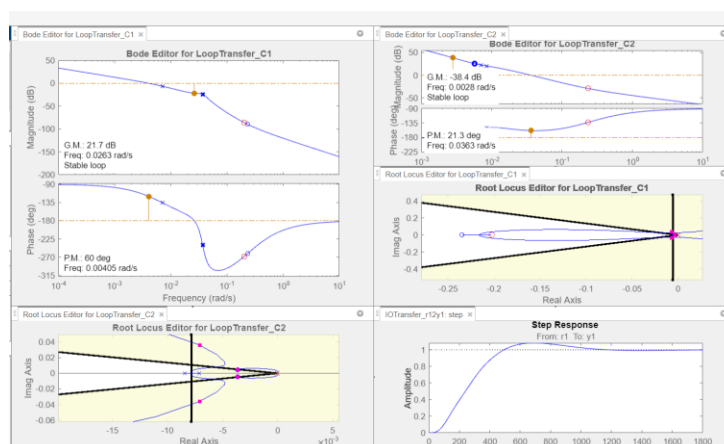
Parámetros de control	Simulación	Planta real
Tiempo de retardo [seg]	189.75	188.37
Tiempo de crecimiento [seg]	339.11	316.625
Tiempo pico [seg]	434.09	355.474
Tiempo de establecimiento [seg]	813.891	781.489
Porcentaje de sobresalto %	0.077	0.072

Para el tanque cuatro se tiene:

Una vez linealizado el subsistema de los tanques uno y dos mediante la herramienta gráfica ya mencionada y partiendo de la función de transferencia representadas en las ecuaciones 50 y 51 se representa en la **Figura 71** la respuesta al escalón unitario del sistema para los tanques uno y dos.

Figura 68

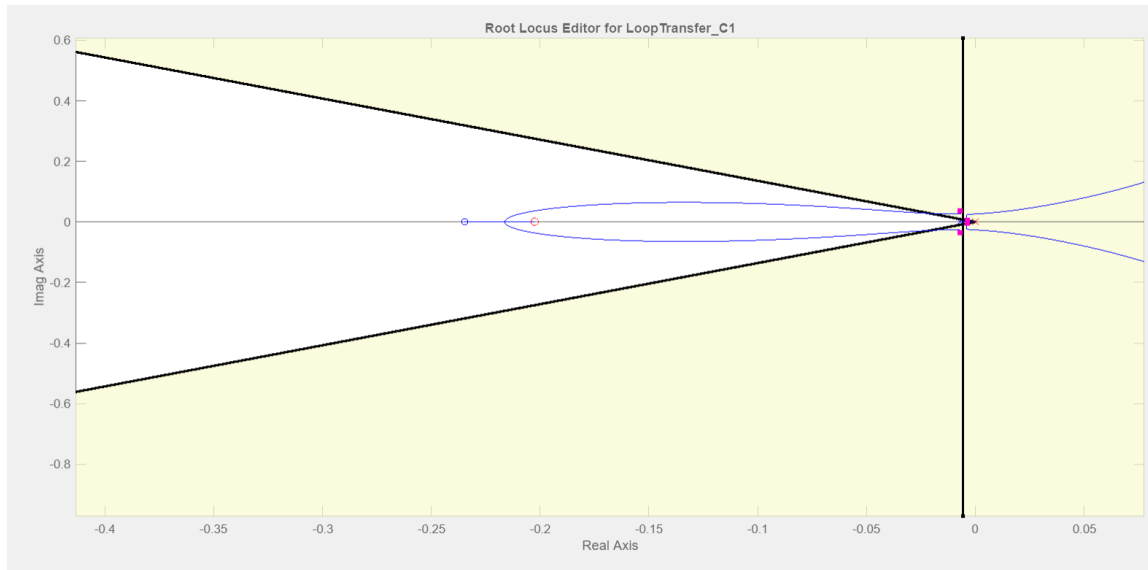
Interfaz de sisotool toolbox para la ubicación de polos y ceros tanques tres y cuatro



Fuente. Matlab

Figura 69

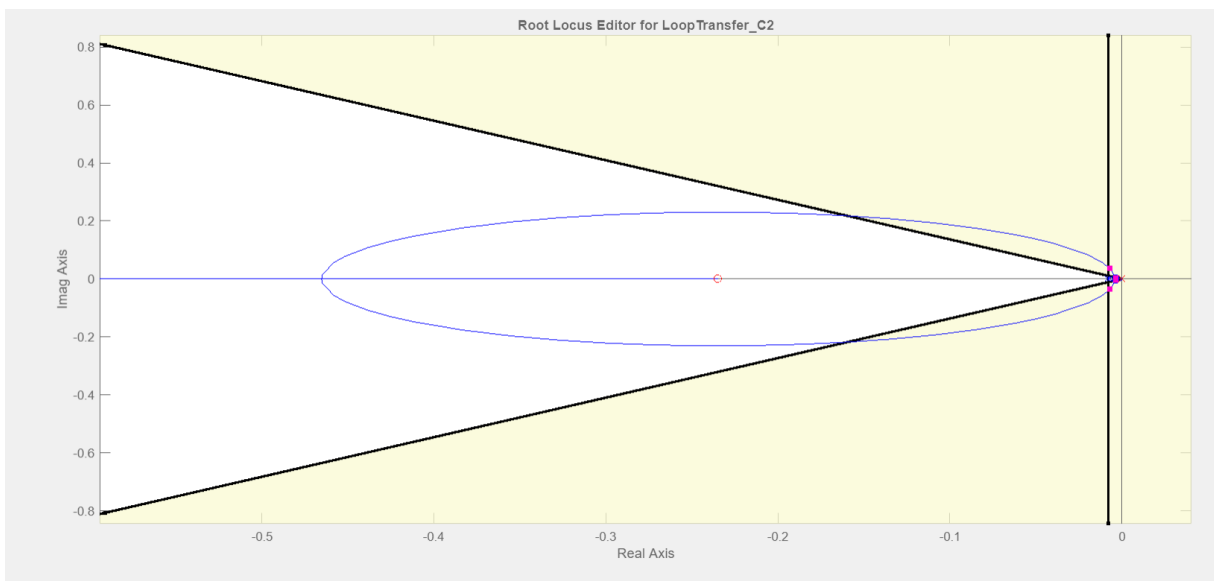
Lugar de las raíces y ceros del sistema para el compensador tanque tres



Fuente. SISOATool MATLAB

Figura 70

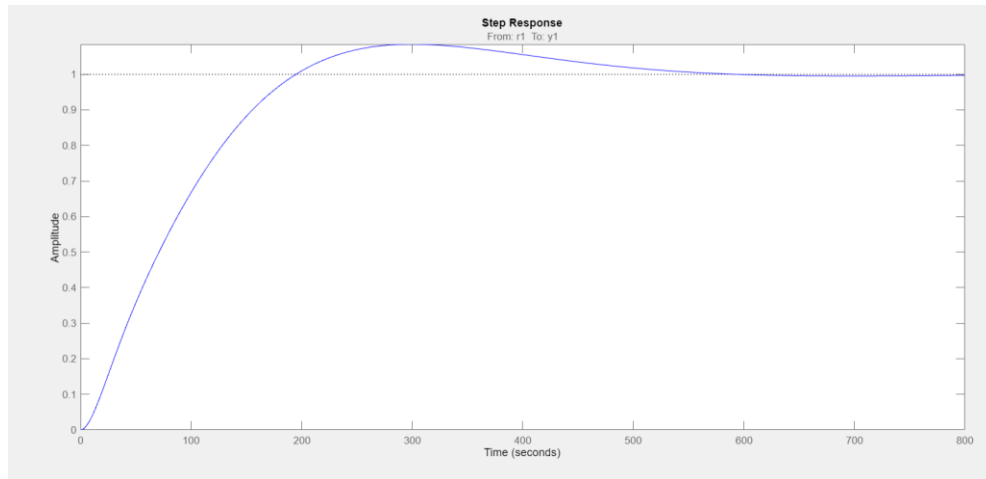
Lugar de las raíces y ceros del sistema para el compensador tanque cuatro



Fuente. SISOATool MATLAB

Figura 71

Respuesta de escalón unitario de la función transferencia compensada para el sistema de control de la altura tres y altura cuatro



El resultado de la sintonización para los tanques uno y dos se muestra en el siguiente análisis de resultado, donde se plasman las compensaciones del sistema obtenida tras la ubicación de los polos y ceros basándonos en los principios de funcionamiento de un control PID paralelo.

$$c_1 = 218 * \frac{(0.007339+1.0275s)}{s} \quad (52)$$

$$c_2 = 0.015 * \frac{(0.000213+2s)}{s} \quad (53)$$

Las expresiones deberán ser igualadas con la función transferencia en la cual se omitió la fase derivativa en la función transferencia del controlador

$$218 * \frac{(0.007339+1.0275s)}{s} \quad kp + \frac{ki}{s} + 0 \quad (54)$$

Ganancias para el compensador C1

$$kp_3 = 224$$

$$ki_3 = 1.6$$

$$0.015 * \frac{(0.000213+2s)}{s} = kp + \frac{ki}{s} + 0 \quad (55)$$

Ganancias para el compensador C2

$$kp_4 = 0.03$$

$$ki_4 = 0.0000032$$

Tabla 17

Ganancias tanque cuatro

	Kp	Ki
PIsecundario	224	1,6
PIprincipal	0,03	0,0000032

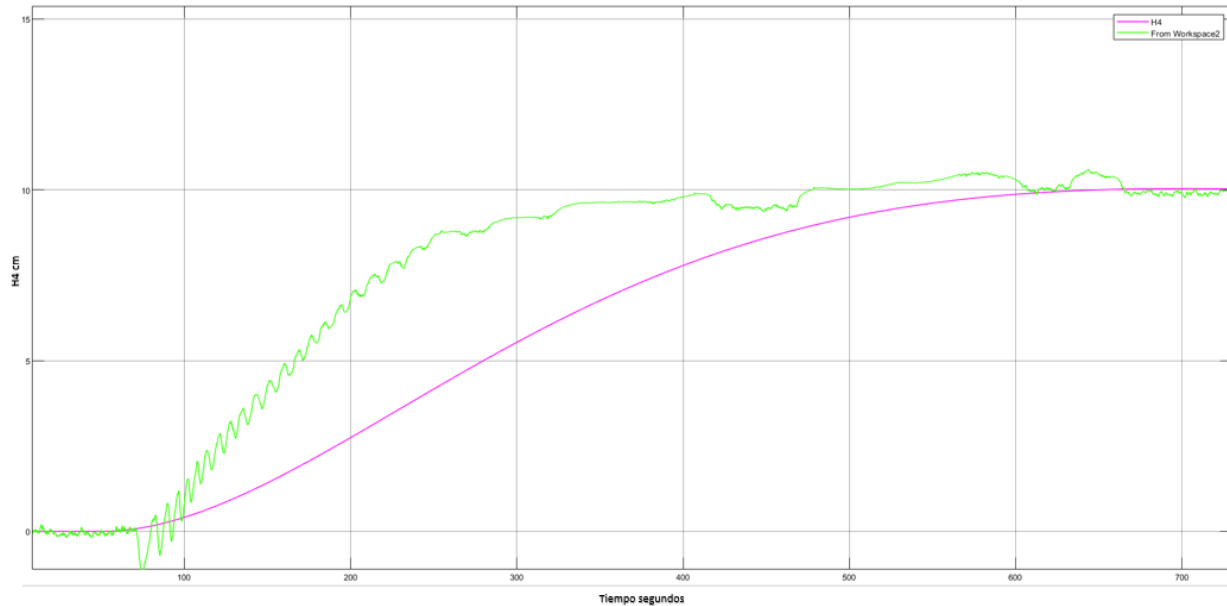
Una vez obtenidas las ganancias del controlador y la respuesta del escalón unitario se procede a evaluar el control tanto en la simulación como en la planta real los parámetros de ambos comportamientos, estos son comparados con el fin de apreciar el buen funcionamiento y la correcta sintonización del sistema.

En la **Figura 72** se observa las curvas obtenidas tras evaluar las ganancias, donde se aprecia una respuesta más agresiva en el banco real, alcanzando el cincuenta por ciento del punto deseado en menor tiempo que en la simulación, lo mismo sucede con el tiempo en que tarda en alcanzar el

“set point”, no obstante, el tiempo de establecimiento es el mismo para ambos casos y corresponde al tiempo esperado obtenido en la respuesta de escalón unitario.

Figura 72

Comparación de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema para el tanque dos

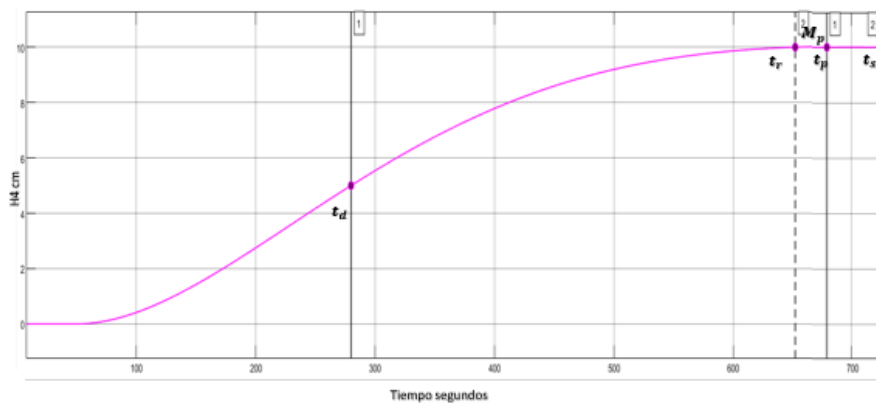


Para determinar la fiabilidad y rendimiento del control de tanque inferior cuatro, se empleó la misma metodología de análisis mostrada en el **apartado 8.2.1.1**. Analizando el comportamiento tanto de la simulación como la respuesta real de control de la altura del tanque en cuestión.

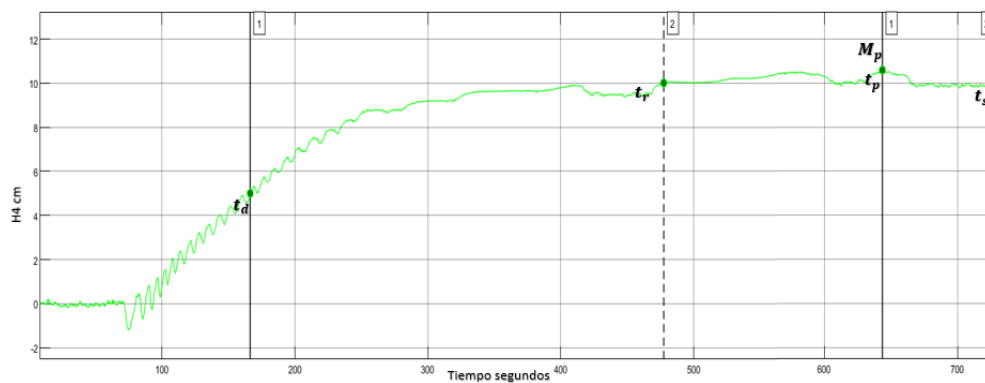
Como se mencionó anteriormente, la planta real tuvo una respuesta más agresiva respecto a la simulación, obteniendo tiempos de retardo y levantamiento menores a lo esperado, sin embargo, obedecen al comportamiento del escalón unitario obtenido de las funciones transferencia compensadas.

Figura 73

Respuesta y comportamiento ideal del sistema tanque cuatro

**Figura 74**

Respuesta y comportamiento real del sistema tanque cuatro



La **Tabla 18** muestra una diferencia notable entre los parámetros de diseño que establecen la fiabilidad del controlador para el sistema simulado y la planta real. Reflejando un comportamiento similar en ambos casos.

Tabla 18

Índice de rendimiento del controlador para el tanque dos

Parámetros de control	Simulación	Planta real
Tiempo de retardo [seg]	279.9	166.292
Tiempo de crecimiento [seg]	651.84	477.412
Tiempo pico [seg]	679.311	643.6
Tiempo de establecimiento [seg]	725.256	729.282
Porcentaje de sobresalto %	0.3	5.9

Los parámetros de funcionamiento obtenidos para los tanques inferiores muestran confiabilidad al momento de estabilizar la altura de los tanques, reflejando un porcentaje de sobre impulso menor al obtenido para los tanques superiores, no obstante el análisis evidencia que el comportamiento en general de la regulación de las alturas de los cuatro tanques mediante PI es muy susceptible a las perturbaciones externas planteadas en el **apartado 6.4.1** donde se especifica los caudales de perturbación q_{b12} y q_{b24} .

Las ganancias proporcional e integral del sistema se reemplazaron en el diagrama de bloques encargado de controlar la planta y se obtuvo la respuesta del sistema real mostrada en las **Figuras 64 y 71** donde se observa la estabilización del tanque dos y cuatro.

9. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto cumple con la intención de brindar una herramienta didáctica que permita interactuar a los estudiantes con un prototipo real de una planta industrial enfocada al control de nivel de tanques mediante implementación de control PID

Para la validación del tercer objetivo específico, se llevó a cabo la construcción y la prueba de funcionamiento de la planta teniendo en cuenta los requerimientos planteados en el **apartado 6.2**. El ensamble de la planta se le anexó tubos PVC con el fin de atenuar el ruido en la toma de los datos de la altura por parte de los sensores ultrasónicos obteniendo una mejora considerable en la toma de datos experimentales, esto sumado a la implementación del Filtro Butterworth, mostrando una oscilación entre los tres y seis milímetros siendo en ocasiones esta variación mayor.

El cumplimiento del objetivo específico, “Modelar y simular el sistema de control de nivel de cuatro tanques acoplados dinámicamente en función de las características de funcionamiento de un proceso de control automático industrial mediante la plataforma de programación y cálculo numérico MATLAB”. Se realizó la descripción del modelo matemático del sistema partiendo del análisis de las ecuaciones diferenciales que rigen las razones de cambio y las relaciones de las variables físicas de la planta basándose en las leyes físicas de balance de energía aplicado a la dinámica de fluidos. La **Figura 36** evidencia la estructura de bloques empleada para simular el modelo matemático no lineal de la planta, lo que permitió la estimación y configuración de los parámetros de funcionamiento.

El diseño del controlador tuvo varias etapas, las cuales se dividieron en la linealización del modelo matemático para los tanques superiores en solitario, y los tanques superiores e inferiores

seccionados en parejas tanques uno y dos y tanques tres y cuatro. El primer resultado obtenido surgió de la validación de los datos experimentales mediante la implementación de un modelo matemático de caja gris, el cual comparó la respuesta experimental con la respuesta obtenida de la simulación del modelo matemático calculado de las ecuaciones diferenciales, obteniendo una similitud para los tanques uno y dos de 81.33%, 84.07% respectivamente y una similitud para los tanques tres y cuatro de 78.14% y 90.54% respectivamente. Los resultados obtenidos corresponden a la correcta selección de los parámetros de funcionamiento, tales como las áreas que rigen la resistencia de las válvulas de cada tanque y la estimación de la constante de las bombas

De la validación por el método de caja gris, el análisis de los datos y el ruido de la señal recibida por el Arduino proveniente de los sensores se determinó que la implementación de un controlador proporcional integral ya que este controlador garantiza que en que el sistema alcanza el valor deseado y que su tiempo de estabilización no supera los mil segundos.

La gran variedad de métodos de sintonización de controladores brinda flexibilidad al momento de no hallar convergencia para algún proceso en concreto de la planta, si bien, el método de sintonización planteado por Ziegler y Nichols garantizó la sintonización del sistema y la obtención de las ganancias de los tanques uno y tres. $K_{p1}=10.12$ $K_{i1}=0.36$ y $K_{p3}=14$ $K_{i3}=0.16$.

Los tanques inferiores presentaron una complejidad al momento de emplear métodos de sintonización convencionales debido a las perturbaciones propias de las variables de entrada y salida, ya que las alturas de estos tanques dependen de la cantidad de fluido almacenado en los tanques superiores, por lo que la estructura de control necesaria para controlar los tanques inferiores corresponde a una estructura en cascada cuya complejidad dificulta la sintonización convencional de sistema. Partiendo de lo mencionado anteriormente se implementó el método de asignación geométrica de las raíces de las funciones de transferencia de cada tanque, por medio

del cual se estimó una compensación de cada una de las funciones de transferencia para el tanque superior e inferior dando como resultado las ganancias individuales del controlador PI principal y secundario. Dichas ganancias se observan en las **Tablas 15 y 17**.

Tras la sintonización se apreció en las **Figuras 53, 58, 67 y 74** el comportamiento real de la planta tras la implementación de las ganancias obtenidas, Dichas respuestas validan el correcto funcionamiento del sistema de control de cuatro tanques dinámicamente acoplados

Luego de haber terminado de definir la planta y su funcionamiento correcto, se desarrolló un manual de operación debido a que el banco de laboratorio tiene fines didácticos, por ello es necesario este manual de uso para proveer información que ayude a afianzar a los estudiantes a la hora de interactuar por primera vez con este, evitando así un mal uso, en el manual se especifica el funcionamiento del banco, se da un listado de componentes, pasos a seguir, tiempo estimado de la práctica, objetivos a cumplir y recomendaciones de implementos a utilizar en la práctica.
(apéndice G)

10. Recomendaciones

El problema principal que se presentó en el diseño y la puesta en marcha del sistema, fueron las señales obtenidas de altura que se reciben por los sensores ultrasónicos hc-sr04, debido a que este producto es económico tiene sus problemas y limitaciones intrínsecos, a la hora de tomar datos y graficar suelen presentar mucho ruido no deseado por lo que fue necesario suavizar la señal con programación y con elementos externos que permitieran una toma mejor, se recomienda si se desea una toma de datos más acertada se compren sensores de una calidad más alta por lo que se necesita un financiamiento mejor.

Si se desea realizar un control de una forma menos compleja se recomienda utilizar servoválvulas en vez de las válvulas sencillas utilizadas en el sistema, estas últimas se pueden ajustar pero se necesita un proceso de sintonización como se apreció en el procedimiento realizado, pero con las servoválvulas esto se facilita un poco por el comportamiento intrínseco de estas.

11. Referencias bibliográficas

Torres Capuz, J. L., & Chanoluisa Martínez, S. X. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de control en una planta de llenado de tanques a escala usando un transmisor de nivel y algoritmo PID para pruebas en el laboratorio de automatización industrial*. Universidad Politécnica Salesiana.

Bohorquez Valderrama, K. B., Fonseca Sanabria, D. F., & Gutiérrez Puertas, S. (2017). *Sistema didáctico para el control de nivel con tanques acoplados*. Universidad Católica de Colombia.

Gatzke, E. P., Meadows, E. S., Wang, C., & Doyle III, F. J. (2000). *Model based control of a four-tank system*. Elsevier.

Aguilar, Castro, A. C., & Obando, O. C. (2013). *Control PID desacoplado para un sistema de tanques interactuantes*. International Society of Automation. Bogotá, Colombia

Laverde, A. (2022). *¿PCB qué es y para qué sirve? Normas IPCALDELTA*. <https://www.aldeattec.com/blog-diseno-con-normas-y-certificaciones/pcb-que-es-y-para-que-sirve/>

Castaño, S. (2022). *Control PID por asignación de polos, control automático educación*. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-pid-por-asignacion-de-polos/>

Cardona, J. P., Leal, J. J., Ustariz, J. E. (2020). *Modelado matemático de caja blanca y negra en educación en ingeniería*. <https://doi.org/10.4067/s0718-50062020000600105>

Watlow. (2020). *Las ventajas del control en cascada*. <https://www.watlow.com/es-es/blog/posts/benefits-of-cascade-control>

Acevedo Jaimes B. R., Fonseca Galindo J. C., Gómez Camperos J. A. (2014). *Desarrollo de una herramienta en Matlab para Sintonización de Controladores PID, utilizando algoritmos genéticos basado en técnicas de optimización multiobjetivo*. Sena.

Castaño, S. (2021). *Diagrama de bode*. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/1-diagrama-de-bode/>

Libretexts. (2022). *Sistemas lineales invariantes en el tiempo*. [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Se%C3%B1ales_y_Sistemas_\(Baraniuk_et_al.\)/02%3A_Introducci%C3%B3n_a_los_sistemas/2.02%3A_Sistemas_lineales_invariantes_en_el_tiempo](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Se%C3%B1ales_y_Sistemas_(Baraniuk_et_al.)/02%3A_Introducci%C3%B3n_a_los_sistemas/2.02%3A_Sistemas_lineales_invariantes_en_el_tiempo)

Restrepo A. D., Loaiza H.C., Caicedo E.F. (2005). *Concepción de un Sistema de Pseudovisión Ultrasónica Aplicando Técnicas Frecuenciales y de Inteligencia Computacional*, Tesis de Maestría, PPIEE, Universidad del Valle. Cali, Colombia

Cuzco Silva, Edgar Giovanni, (2001). *Control y medición de nivel de líquidos mediante intouch*

Roblero, H. A., Arancibia, J. G., & Bravo, C. (2020). Estudio comparativo de algoritmos de control PID clásico para el control angular de un brazo electromecánico. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(4), 612-628. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052020000400612>

Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna* (3a. ed.). Madrid: Prentice hall hispanoamericana

Restrepo Álvarez, L. A., & Cardona Salazar, J. D. (2015). *Diseño de un sistema de control del nivel para la preparación de líquidos dializantes basado en señales ultrasónicas*. Universidad tecnológica de Pereira.

Bellahsan, N. (2022). *Control y estimación de sistemas basado en modelo de caja negra* (F. Espinosa Zapata, Tutor). Universidad de Alcalá, Escuela politécnica superior.

Solarte Rosas, C. J., & Muñoz Ordoñez, J. E. (2015). *Guía para la sintonización de un controlador de par, posición y velocidad de un motor DC de imán permanente*. Universidad del Cauca. Facultad de ingeniería electrónica y telecomunicaciones.

Figueroa, F. (2021). *Medición de nivel por ultrasonido: guía completa*. <https://sensoricx.com/mediciones/medicion-de-nivel-por-ultrasonido-guia-completa/>

Connor, N. (2020, 20 enero). *¿Qué es el flujo laminar? Flujo viscoso: definición*. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-flujo-laminar-flujo-viscoso-definicion/>

Villajulca, J. C. (2021). *¿Como funciona una estrategia de control en cascada? definiciones y ejemplos*. <https://instrumentacionycontrol.net/como-funciona-una-estrategia-de-control-en-cascada-definiciones-y-ejemplos/>

Matlab. (2023). *Control system toolbox getting started guide*. Mathworks

Mazzone V. (2022). *Controladores PID*. Universidad nacional de Quilmes.

Andrade, F. (2019). *Saiba tudo sobre medidor de nível ultrassônico*. <https://automacaoecartoons.com/2019/07/19/medidor-de-nivel-ultrassonico/>

Golato Marcos. (2004). *Análisis de respuestas transitorias sistemas de segundo orden*. Universidad Nacional de Tucumán. Cátedra sistemas de control.

12. Apéndices

Apéndice A Código caudal

```
const int sensorPin = 2;

const int measureInterval = 2500;

volatile int pulseConter;

// YF-S201

const float factorK = 7.5;

// FS300A

//const float factorK = 5.5;

// FS400A

//const float factorK = 3.5;

void ISRCountPulse()

{

    pulseConter++;

}

float GetFrequency()

{

    pulseConter = 0;

    interrupts();

    delay(measureInterval);

    noInterrupts();
```

```

    return (float)pulseConter * 1000 / measureInterval;
}

void setup()
{
    Serial.begin(9600);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensorPin), ISRCountPulse, RISING);
}

void loop()
{
    // obtener frecuencia en Hz

    float frequency = GetFrequency();

    // calcular caudal L/min

    float flow_Lmin = frequency / factorK;

    Serial.print("Frecuencia: ");

    Serial.print(frequency, 0);

    Serial.print(" (Hz)\tCaudal: ");

    Serial.print(flow_Lmin, 3);

    Serial.println(" (L/min)");
}

```

Apéndice B Función T

```

function [dx,y] = funcionT(t, x, u, a1, a2, varargin)
k = 0.5135;
g = 981;
A1= 707;

```

```

A2 = 707;
%if (u(1)>80)
dx = [(1/A1)*(k*(u(1)) - a1*sqrt(abs(2*g*x(1)))));
      (1/A2)*(a1*sqrt(abs(2*g*x(1))) - a2*sqrt(abs(2*g*x(2))))];
%else
% dx = [(1/A1)*(k*(0) - a1*sqrt(abs(2*g*x(1)))));
% (1/A2)*(a1*sqrt(abs(2*g*x(1))) - a2*sqrt(abs(2*g*x(2))))];
%end
y = [ x(1);
      x(2)
      ];

```

Apéndice C Identificación

```

%clear
%clc
%% Carga de datos
z = iddata( y, u, 0.03, 'Name', 'Datos experimentales');
z.InputName = 'PWM';
z.InputUnit = 'pwm';
z.OutputName = {'Tanque Superior', 'Tanque Inferior'};
z.OutputUnit = {'m', 'm'};
z.Tstart = 0;
z.TimeUnit = 's';

figure('Name', [z.Name ': dx -> lineal velocity output']);
plot(z(:, 1, 1)); % (Voltage -> Posicion angular).
figure('Name', [z.Name ': dt -> Angular velocity output']);
plot(z(:, 2, 1)); % (Voltage -> Velocidad angular).

%% Carga de la funcion
FileName = 'funcionT'; % Descripcion de la estructura del modelo.
Order = [2 1 2];
Parameters = [ 0.65;0.75]; % Parametro
InitialStates = [0; 0]; % Estado inicial
Ts = 0; % Tiempo-Sistema continuo.
nlgr = idnlgrey(FileName, Order, Parameters, InitialStates, Ts, ...
               'Name', 'Modelo matematico');

```

```

compare(z, nlgr);

%% Estimacion
nlgr = setinit(nlgr, 'Fixed', {true true }); % Estimación de los estados iniciales.
opt = nlgreyestOptions('Display', 'on');
opt.SearchOptions.MaxIterations =200;
nlgr = nlgreyest(z, nlgr, opt);
compare(z, nlgr);

```

Apéndice D Modelo matemático, linealización y espacio de estados para tanque superior e inferior

```

syms At1 At2 Av1 Av2 g h1 h2 h1p h2p k u

dx = [(1/At1)*(k*(u) - Av1*sqrt(abs(2*g*h1)));
      (1/At2)*(Av1*sqrt(abs(2*g*h1)) - Av2*sqrt(abs(2*g*h2)))];
At10 = 707
At20 = 707
Av10 = 0.9762
Av20 = 0.7853
k0 = 0.7041
g0 = 981
h10 = 10
dx2=subs(dx,{At1 At2 Av1 Av2 g h1 k },{At10 At20 Av10 Av20 g0 h10 k0 })
[h20,u0]=solve(dx2==0,[h2 u])
double(h20)
double(u0)
Asym = jacobian(dx,[h1 h2])

Bsym = jacobian(dx,u)

A = double(subs(Asym,{At1 At2 Av1 Av2 g h1 h2 k u },{At10 At20 Av10 Av20 g0 h10
h20 k0 u0 })))
B = double(subs(Bsym,{At1 At2 Av1 Av2 g h1 h2 k u },{At10 At20 Av10 Av20 g0 h10
h20 k0 u0 })))
c2 = [0,1]
c1 = [1,0]

tanque1 = ss(A,B,c1,0)
tanque2 = ss(A,B,c2,0)

tftanque1 = tf(tanque1)
tftanque2 = tf(tanque2)

```

```
step(tftanque1)
step(tftanque2)
```

Apéndice E Matrices de estado tanque uno

```
tanque1 =

A =
      x1      x2
x1 -0.01188      0
x2  0.01713 -0.01108

B =
      u1
x1 0.001223
x2      0

C =
      x1 x2
y1  1  0

D =
      u1
y1  0
```

Apéndice F Matrices de estado tanque tres

```
A =
      x1      x2
x1 -0.00842      0
x2  0.00842 -0.006555

B =
      u1
x1 0.0007306
x2      0

C =
      x1 x2
y1  1  0

D =
      u1
y1  0
```

Apéndice G Manual de operación

Debido a que este banco de laboratorio tiene fines didácticos es necesario generar un manual de uso para proveer información para afianzar a los estudiantes a la hora de interactuar por primera vez con este evitando un mal manejo.



Banco didáctico de cuatro tanques dinámicamente acoplados

Práctica No.

Duración: 80-100 minutos

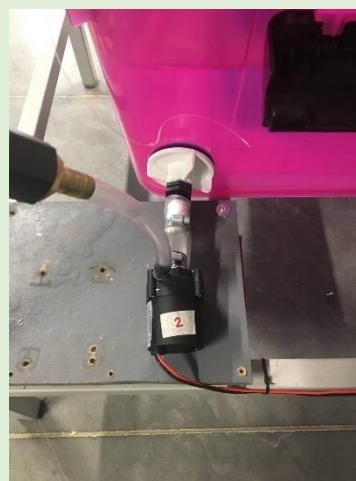
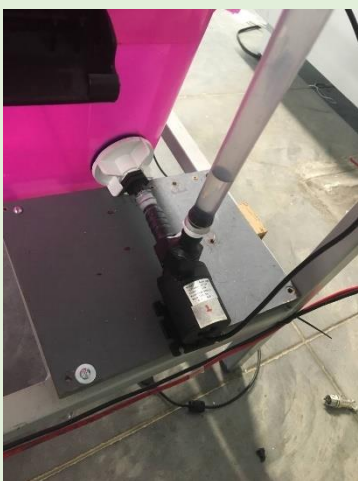
Especificaciones del banco

El módulo cuenta con cuatro tanques cilíndricos extruidos en acrílico transparente cuyo espesor es de 3 mm, el diámetro 300 mm y una altura de 400 mm, los cuatro tanques contarán con las mismas dimensiones. La disposición de los cuatro tanques está en forma matricial 2x2 de forma vertical permitiendo la conexión individual de los tanques superiores con los inferiores, y existiendo un quinto tanque con la función de reserva.

La práctica consiste controlar obtener las ganancias del controlador proporcional e integral de un control PI con estructura en cascada. Se definirá un punto de establecimiento en función de unos parámetros iniciales establecidos.

Se cuenta con:

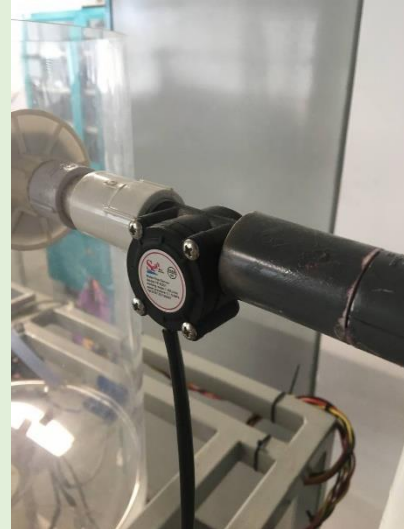
- Dos bombas DC de 12 voltios sumergibles que van a permitir el suministro de agua a los tanques



- Cuatro sensores de nivel HC-SR04 uno para cada tanque que se encarga de determinar la altura del agua



- Dos sensores de caudal ubicadas entre las bombas de alimentación y los tanques superiores de descarga los cuales permitirán realizar la caracterización de las bombas estableciendo el caudal suministrado en función del tiempo y el voltaje



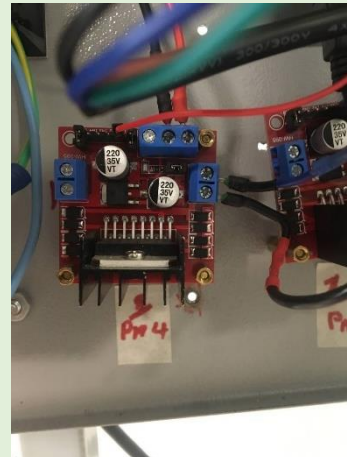
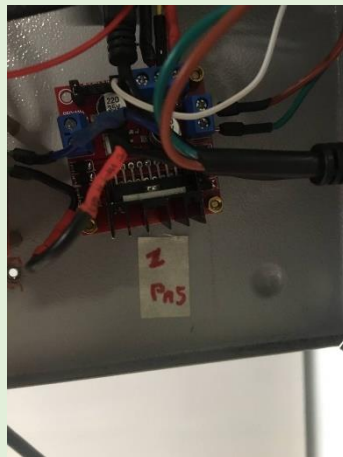
- Un microcontrolador arduino mega 2560 que opera directamente con el entorno de Matlab-Simulink, este permite digitalizar señales identificadas como entradas en el sistema junto con las que se vayan a manipular, con el fin de obtener y registrar cambios que se consideran salidas



- Una baquela conectada al arduino mega con el fin de en ella realizar las conexiones al arduino para mantener un orden de los elementos del sistema (protección y mecanismo de organización electrónico entre los elementos como actuadores y sensores y la placa Arduino)



- Dos puentes H uno para cada bomba que permite el control de estas con el Arduino



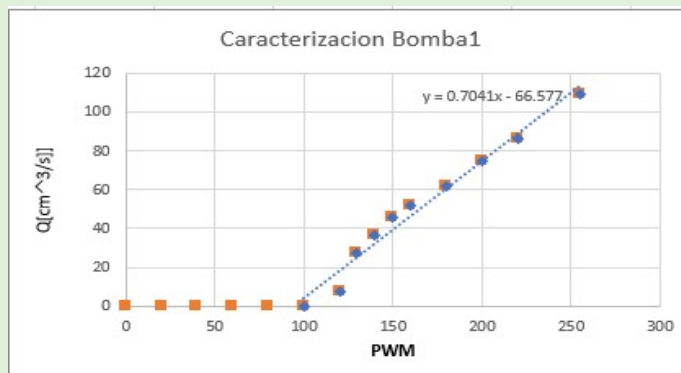
Pasos importantes a seguir

1. Definir las características y parámetros de funcionamiento del banco didáctico definiendo la constante de funcionamiento de las bombas y las áreas de apertura de las válvulas

Parámetros importantes de funcionamiento:

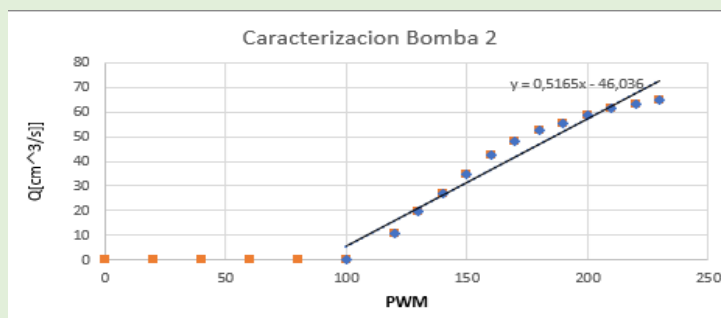
Descripción	Símbolo	Unidades
Área transversal de tanques	A1, A2, A3, A4	cm ²
Área de drenaje de los tanques	a1, a2, a3, a4	cm ²
Constante de las bombas	K1, K2	[(cm ³)/(s-PWM)]
Gravedad	g	cm/s ²

Caracterización experimental de la bomba 1



$$K1=0,7041$$

Caracterización experimental de la bomba dos:



$$K2=0,5165$$

2. Establecer las variables controlables del sistema (alturas, PWM) y determinar los elementos de control (actuadores, sensores y bastidor)

3. Definir un modelo matemático acorde a las necesidades de control de los cuatro tanques acoplados tomando en cuenta la teoría, en este caso se tiene presente un modelo no lineal debido a que se debe tomar en cuenta la resistencia generada por los porcentajes de apertura de las válvulas:

$$C = \frac{d_v}{d_H} ; \text{Capacitancia}$$

$$v = A_t * h$$

$$C * d_H = d_v = q_i - q_o$$

$$d_v = A_t * \frac{dh_t(t)}{dt}$$

$$A_t * \frac{dh_t(t)}{dt} = q_i - q_o$$

$$q_e = k_v * a$$

$$q_s = k_v * a * \sqrt{\Delta p}$$

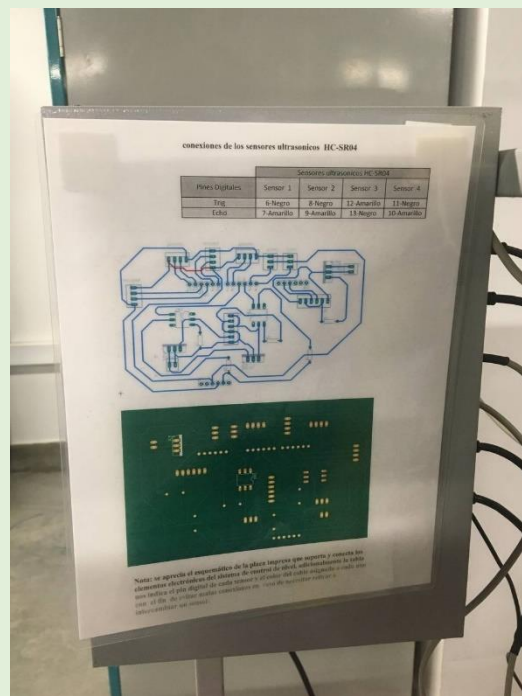
Es importante analizar para el modelo matemático las perturbaciones en este caso presentes para los tanques inferiores. Se deben analizar los voltajes, constantes de las bombas, porcentajes de apertura de las válvulas, tanto de las perturbaciones como las de las salidas de los tanques superiores, las áreas de entrada y áreas de las válvulas.

4. Puesta en marcha del sistema:

- Verificar que el tanque de reserva tenga agua para poder trabajar



- Energizar el banco didáctico
- Energizar el arduino conectándolo a un portátil o un computador del laboratorio
- Abrir los programas de la práctica (matlab-simulink)
- Corroborar que todo esté conectado de manera correcta en la baqueta según la guía presente en el laboratorio:



- Comprobar que los sensores estén correctamente conectados

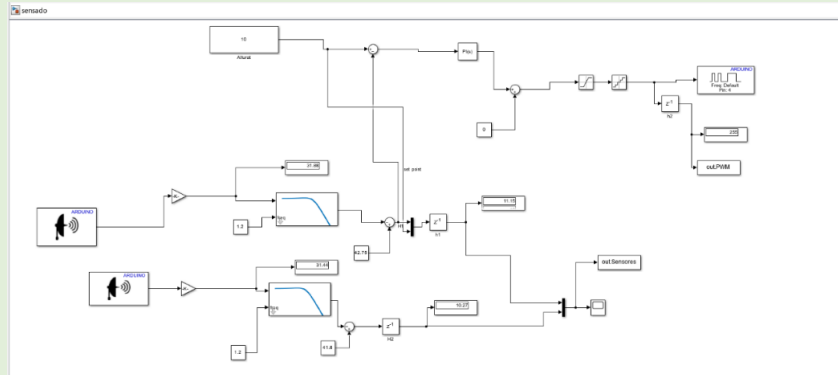


- Encender el banco presionando el interruptor



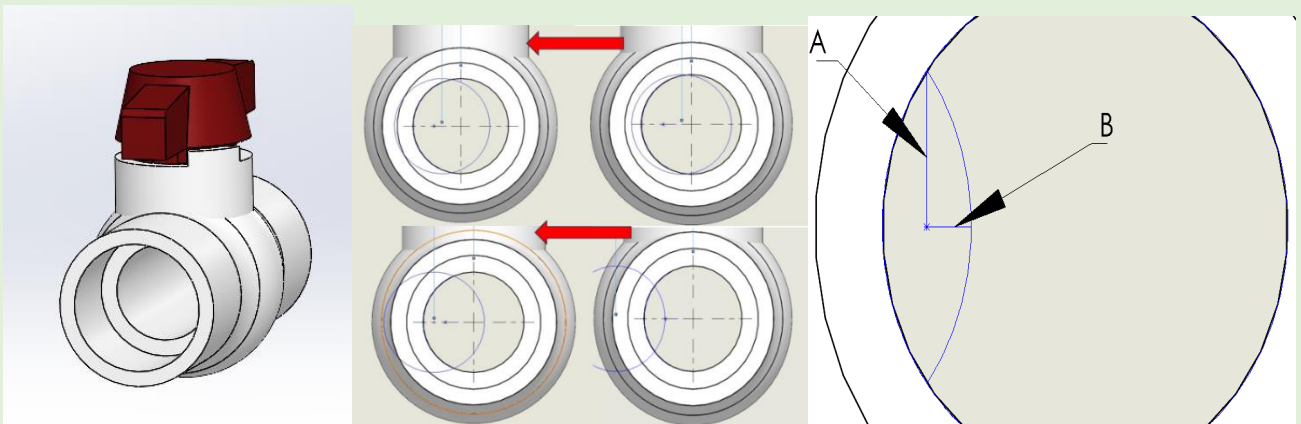
5. Una vez la planta esta lista para operar se procederá a realizar una estimación experimental del funcionamiento de la planta, para esto se necesitará el archivo de simulink ubicado en la carpeta de “simulink para la toma de datos experimentales” donde se encuentran los bloques para el control, monitoreo y guardado de datos en tiempo real del funcionamiento de la planta

Diagrama de bloques para la obtención de datos experimentales



Debido al tamaño de la planta y dinámica de la misma, la prueba de escalón realizada no presentó una estabilización que permita validar el comportamiento de la misma, por tanto las pruebas experimentales se realizarán mediante la estimación empírica de las ganancias de un controlor proporcional integral, que garanticen la estabilización del sistema en un setpoint determinado

- Definir diferentes aperturas y calcular el área para cada una de las válvulas de descarga de los cuatro tanques:



$$area_{elipse} = \pi * A * B$$

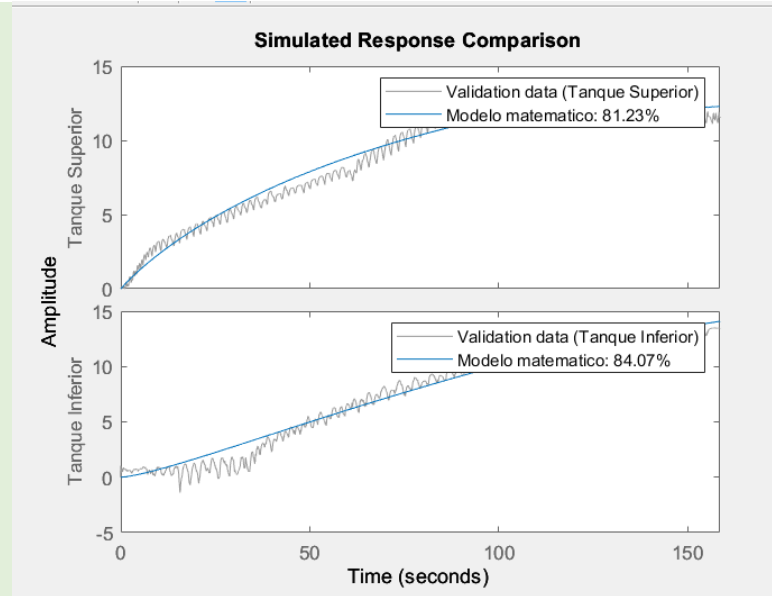
6. Correr el programa de simulink mencionado en el paso anterior y realizar la adquisición de datos con el fin de comprobar que el sistema se estabilice con las ganancias del controlador propuestas, si la planta no alcanza la altura requerida para el nivel de los tanques; será necesario cambiar las ganancias y realizar la prueba las veces que sean necesarias hasta que el sistema se estabilice

Ejemplo de la comparación:

7. Una vez realizada la adquisición de datos de la estabilización del sistema se procede a guardar dicha información para su posterior análisis

8. Implementación del método de caja gris para la validación el comportamiento real de la planta en contraste con el modelo matemático establecido

9. En la carpeta de validación del modelo de caja gris, abrir los códigos “función T” e “identificación T” en los cuales se deberán añadir los parámetros iniciales de la planta, comprobar el modelo matemático descrito y cargar los datos guardados anteriormente. Al correr el código de identificación se deberá obtener una respuesta similar a la siguiente después de que el sistema realice las iteraciones pertinentes para la comparación del modelo matemático definido y el comportamiento real del sistema:



Nota. Respuesta esperada >70%

10. Comenzar con la linealización de las ecuaciones de los tanques, primero linealizar los tanques superiores, para ello se busca el punto de equilibrio, esto llevando la variación de la altura a 0 y despejar para hallar los valores, con el punto de equilibrio definido utilizar series de Taylor, se utiliza la primera derivada de las series (jacobiana), y luego de linealizar hallar los espacios de estado para posteriormente determinar las funciones de transferencia

Punto de equilibrio:

$$\frac{dh}{dt} = 0$$

Series de Taylor:

$$F(x) = F(x^*) + \nabla F(x^*)\Delta x + \frac{1}{2} \frac{d^2}{dx^2}(x^*)\Delta x^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3}{dx^3}(x^*)\Delta x^3$$

Espacio de estados:

$$\dot{X}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$

$$Y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t)$$

Función de transferencia a partir de espacio de estados:

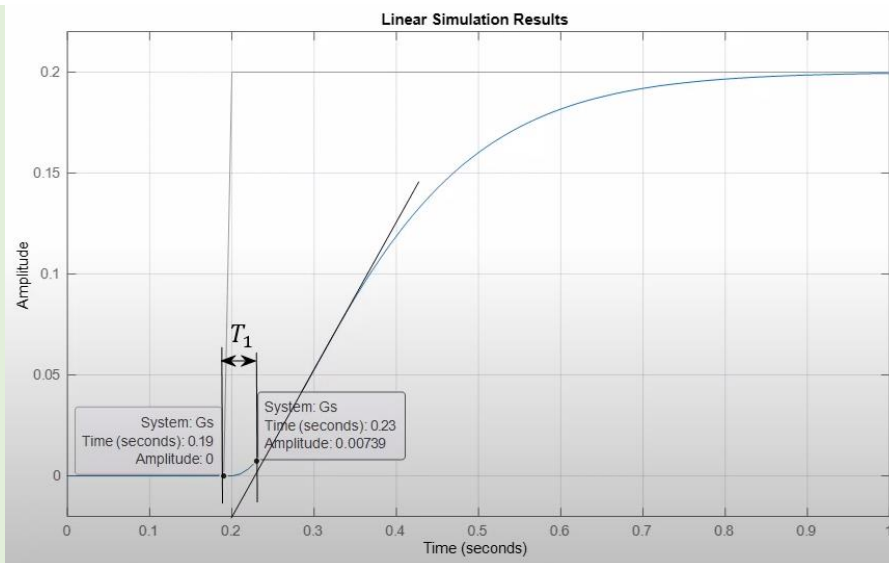
$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$$

Este proceso se facilita utilizando Matlab para linealizar y obtener los espacios de estado y la función de transferencia, hay que utilizar los códigos recurrentes y definir bien las ecuaciones, pero es importante saber de forma teórica de donde sale todo

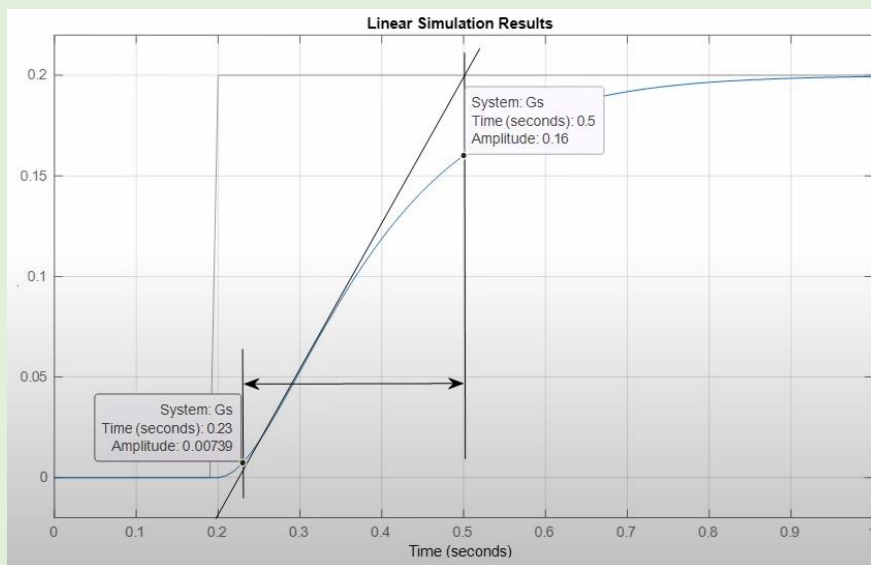
11. Se repite el proceso de obtener el punto de equilibrio y utilizar series de Taylor y espacios de estados para obtener las funciones de transferencia para los tanques inferiores, pero en este caso hay que tomar en cuenta la diferencia en la variable de entrada y salida de los tanques superiores e inferiores por tanto, se toman como un bloque separado el subsistema de los tanques uno y tres y el subsistema de los tanques tres y cuatro partiendo de los parámetros ya establecidos para los tanques superiores. Se reevaluarán la función transferencia teniendo en cuenta la dinámica del sistema cuando los tanques superiores e inferiores están interconectados (se linealiza 1-2 y 3-4 como subgrupos)

12. Ya linealizado el proceso, lo que sigue a continuación es realizar una sintonización con métodos que permitan hallar nuevas ganancias con el fin de corroborar las de la linealización y hacer una comparación de la respuesta real con la experimental. Para los tanques superiores (1 y 3) se utiliza el método de Ziegler-Nichols, el cual consiste en analizar la respuesta de escalón del sistema para hallar los tiempos muertos y definir dx y dy , con los que se consigue el valor de la constante del sistema (K_0), con estos se puede hallar las ganancias y definir el PID y el diagrama de bloques reducido (GT)

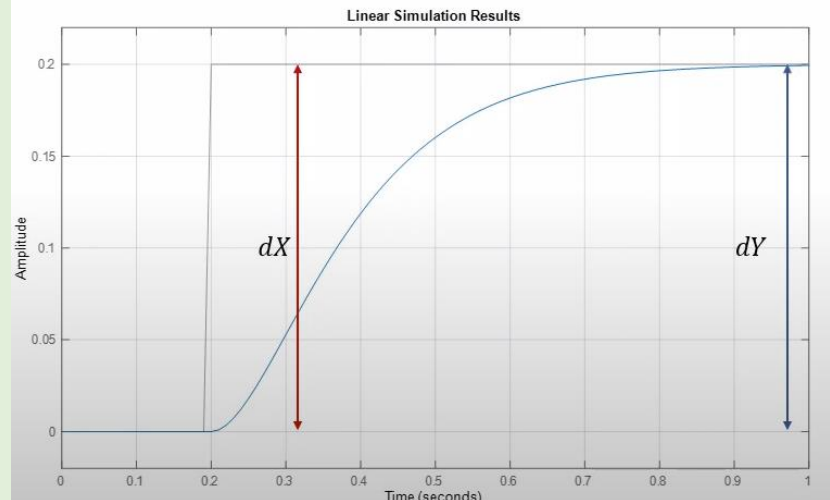
Medición de T1:



Medición de T2:



Obtención de dx y dy gráfica de escalón:



Constante de tiempo del sistema:

$$K_0 = \frac{dx * T_2}{dy * T_1}$$

Constantes del sistema:

Control	K_p	K_i	K_d
P	K_0		
PI	$0.9K_0$	$0.27K_0/T_1$	
PD	$1.6K_0$		$0.60K_0/T_1$
PID	$1.2K_0$	$0.60K_0/T_1$	$0.60K_0/T_1$

Definiendo el PID:

$$PID = Kp + Kd * tf([1 \ 0], [1]) + Ki * tf(1, [1 \ 0])$$

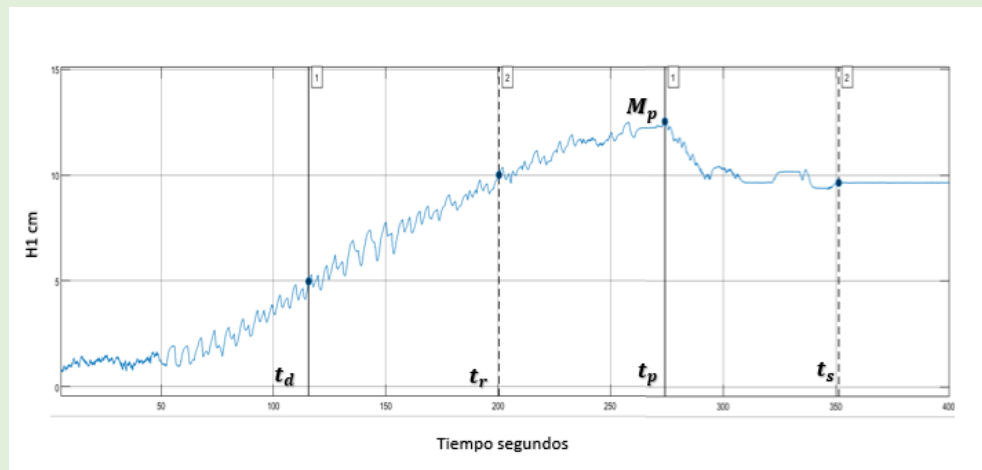
tf: Función de transferencia

Sistema completo retroalimentado:

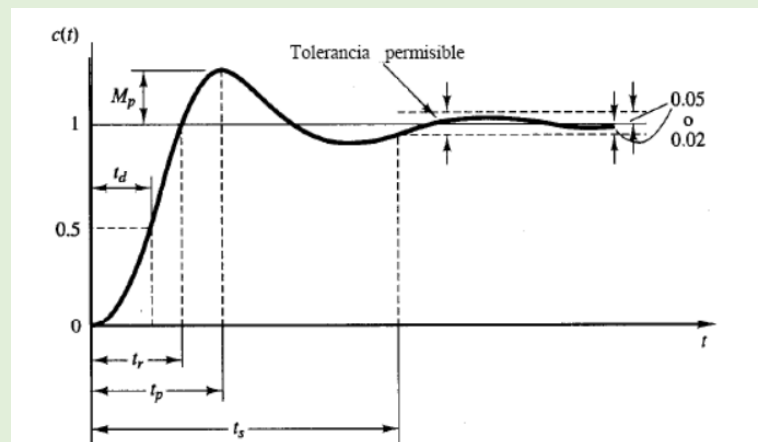
$$GT = Gs * \frac{PID}{1 + Gs * PID}$$

13. Determinar el desempeño del controlador con las gráficas después de sintonizar con Ziegler-Nichols, se compara la estabilización con el comportamiento real para determinar si el tiempo de retardo, de crecimiento, pico, de establecimiento y el porcentaje de sobresalto estén dando valores aceptables, y se contrastan los tiempos de estabilización de ambos tanques para ver si hay similitud en las respuestas de ambos subsistemas

Ejemplo del comportamiento:



Escalón unitario:



Tiempo de retardo (t_d)

Tiempo de levantamiento (t_r)

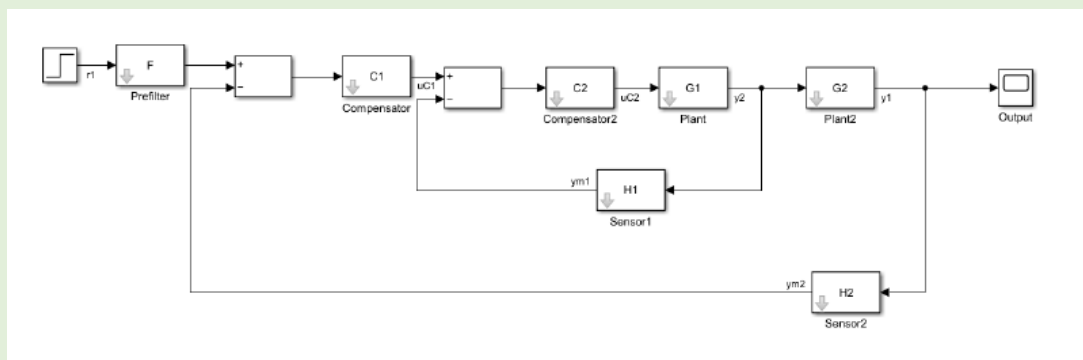
Tiempo pico(t_p)

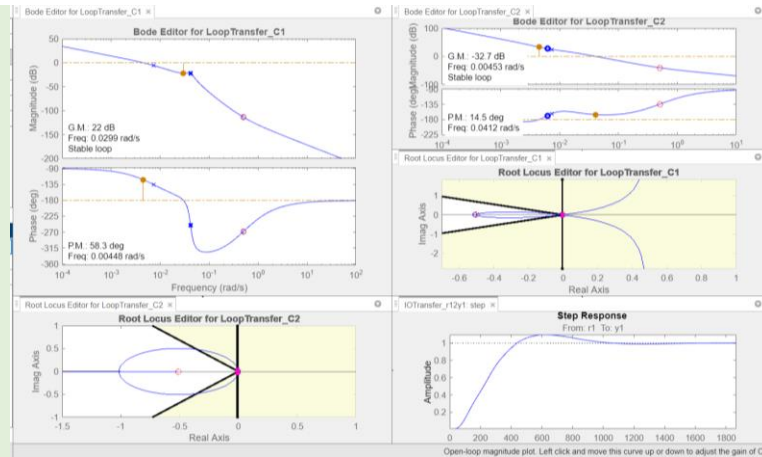
Sobrepaso máximo (M_p)

Tiempo de asentamiento (t_s)

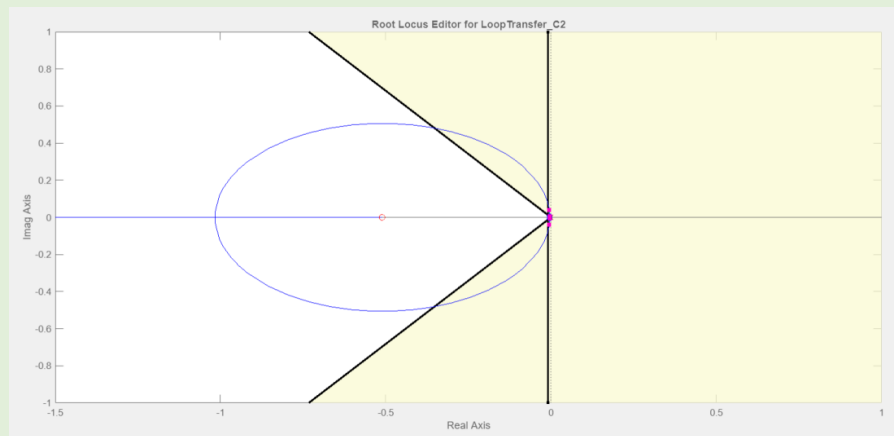
14. Para la sintonización de los tanques inferiores no se puede utilizar el mismo método de sintonización debido a la complejidad, por esto se analizan por subsistemas y no individualmente, se analizan los tanques 1-2 y 3-4 teniendo en cuenta las variables de entrada y salida de cada subsistema ya que la altura de los recipientes dos y cuatro dependen de su caudal de salida en función de la resistencia hidráulica de la válvula y del caudal de salida de los recipientes uno y tres. Para ello se define una nueva arquitectura de control en cascada. Se parte del espacio de estados del modelo matemático, lo que permite evaluar dichas perturbaciones mediante la retroalimentación de las alturas cuyo comportamiento afecta la variable principal, eliminando las perturbaciones del control. Por ello primero se abre el modelo de simulink de los tanques en cascada, para ello abrir el archivo de simulink de la carpeta específica

Modelo del control en cascada para los tanques superior e inferior:





Ejemplo de lugar de raíces y ceros del compensador mediante Matlab de uno de los tanques:



16. Se procede a determinar las ganancias de cada controlador, para esto se determinaron las ecuaciones de compensación para cada controlador y se igualaron con la ecuación

$$C = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s)$$

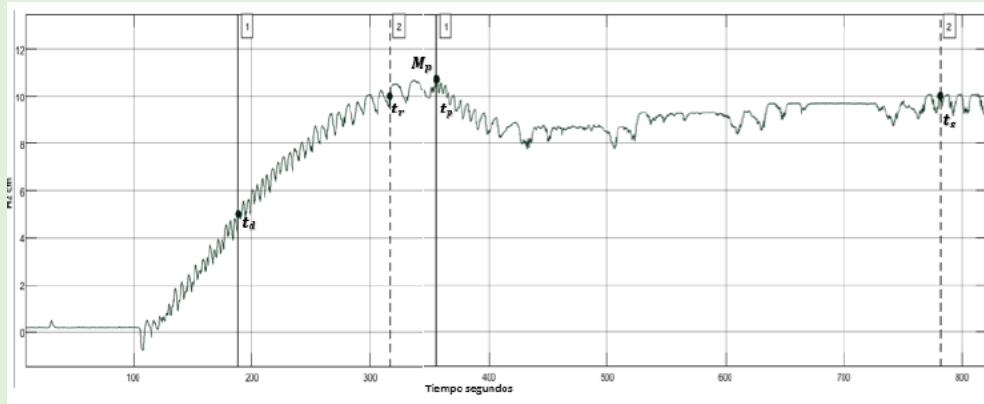
$$K_d=0$$

17. Ya definida la arquitectura de control se procede a insertar el integrador y el cero real para cada compensador

18. Con todo esto ya definido se procede a obtener la nueva gráfica de escalón de los tanques con el fin de analizar los parámetros importantes del tiempo de retardo, de crecimiento, pico, de establecimiento y

el porcentaje de sobresalto, para con esto comparar como se hizo anteriormente el comportamiento de la estabilización experimental con los datos reales y así validar que se comporte de forma acertada

Ejemplo de la gráfica de respuesta y comportamiento de escalón unitario de uno de los tanques para tomar como referencia:



19. Finalizar práctica:

- Una vez finalizada la práctica volver a oprimir el interruptor para apagar el banco
- Desconectar el banco de la corriente
- Vaciar los tanques y dejar el agua en el tanque de reserva para futuras prácticas

20. Sacar conclusiones

Objetivos de la práctica

1. Afianzar conocimientos adquiridos en control, automatización y sistemas dinámicos
2. Comparar el comportamiento del sistema real con el ideal obtenido con las ecuaciones
3. Evidenciar efectos de perturbaciones en el control de nivel

Materiales

Se procede a dar una lista de los elementos necesarios para llevar a cabo la práctica.

1. Banco didáctico de cuatro tanques dinámicamente acoplados

2. Lápiz y papel
3. Calculadora
4. Computador portátil (recomendado) con acceso a arduino, matlab y simulink
5. Cable USB tipo B (de impresora)
6. Bata de laboratorio