

Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para Control de Dinámica Acoplada de Tanques
Hidráulicos para el Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Control

Juan Sebastián Calderón Silgado y Lined Johana Mesa Rojas

Trabajo de Grado Para Optar por el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Carlos Borrás Pinilla

PhD. Ingeniería Mecánica

Codirector

Helio Sneyder Esteban Villegas

MsC. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

A Dios primeramente por permitirme culminar esta meta tan importante y por todas las bendiciones que me otorga.

A mis papás por todo su cariño y apoyo plenamente incondicional, a quienes debo todo quien soy hoy en día.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme todos los espacios y herramientas propicias para mi desarrollo profesional.

A mi director Carlos Borrás y mi codirector Helio Esteban por todas las enseñanzas, su guía y gran acompañamiento.

A mis amigos por su comprensión y cariño, han sido un gran apoyo personal y profesional a lo largo de este proceso.

Lined Mesa Rojas.

Agradecimientos

En primera instancia quiero darle gracias a DIOS por regalarme esta oportunidad de estudio y cada una de las bendiciones que me ha dado para llegar hasta el lugar donde estoy.

A mis padres y familiares por su amor incondicional, paciencia, esfuerzo, consejos y sobre todo la confianza en mí.

A la Universidad industrial de Santander por convertirse en un espacio de risas, de aprendizaje y memorias que llevo conmigo. Al personal de comedores por su labor tan ardua, pero que hacen con mucho amor.

A los profesores por su pasión de enseñanza, por brindarme cada granito de conocimiento y motivación para seguir avanzando en este camino. A mi director Carlos borras y mi codirector Helio Estaban que además de ser un guía excepcional se ha convertido en un amigo, gracias por compartir sus conocimientos conmigo.

Por ultimo y no menos importante a mis amigos por su apoyo y recuerdos sin ellos este paseo hubiera sido aburrido.

“El que no comparte sus conocimientos, deja morir con él los frutos de su sabiduría”

Juan Sebastián Calderón Silgado

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Planteamiento del Problema.....	15
1.1 Justificación.....	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo general	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
2. Referentes Teóricos.....	17
2.1 Internacional.....	17
2.2 Nacional	17
2.3 Local.....	18
3. Marco Teórico	18
3.1 Criterio de Estabilidad de Routh	18
3.2 Dinámica de Tanques Acoplados.....	22
3.3 Linealización por Series de Taylor.....	30
3.4 Estrategias de control	30
3.5 Arquitectura de Control en Cascada.....	31
3.6 Métodos de sintonización.....	32
3.6.1 Sintonización por método Ziegler-Nichols	32
3.6.2 Sintonización por PID Tuner MATLAB.....	35
3.7 Filtro pasa baja Butterworth.....	36
4. Metodología	37
4.1 Requerimientos de la planta	38

4.1.1	Descripción de la planta	39
4.1.2	Sistema de tanques	40
4.1.3	Hardware	41
4.1.4	Software	41
4.2	Selección de componentes	42
4.2.1	Actuadores.....	42
4.2.2	Modulo Driver.....	43
4.2.3	Sensores de nivel.....	44
4.2.4	Caudalímetro	45
4.2.5	Servomotor	45
4.3	Modelado matemático de la planta.....	46
4.4	Diseño de la planta	48
4.4.1	Diseño y análisis estructural.....	49
4.4.2	Diseño de Hardware	52
4.4.3	Diseño del software.....	55
4.5	Pruebas de estabilización	56
4.6	Parámetros de operación	58
4.6.1	Caracterización de los actuadores.	58
4.6.2	Caracterización de la perturbación.....	61
4.6.3	Validación de caja gris.	63
4.6.4	Validación de parámetros para el modelo no lineal	65
4.7	Linealización de la planta.....	68
4.8	Diseño del controlador PID.....	69

4.8.1	Funciones de transferencia por caja negra	69
4.8.2	Sintonización de los controladores.....	72
5.	Resultados	76
5.1	Construcción del banco de pruebas	76
5.2	Modelado no lineal del sistema de tanques	78
5.3	Diseño del sistema de control.....	81
5.4	Respuesta de la planta real.	84
5.5	Criterio de la integral de valor absoluto del error IAE.....	86
6.	Conclusiones	88
	Referencias Bibliográficas	90
	Apéndices.....	93

Lista de Figuras

Figura 1. Representación de control en lazo cerrado.....	19
Figura 2. Estabilidad de un sistema por asignación de polos.....	20
Figura 3. Sistemas de nivel en líquido.....	23
Figura 4. Ejemplo de diagrama de bloques.....	27
Figura 5. Tiempo de establecimiento.....	28
Figura 6. Ejemplo de respuesta rampa unitaria.....	29
Figura 7. Ejemplo de respuesta impulso unitario.....	29
Figura 8. Esquema de control en cascada con dos etapas.....	32
Figura 9. Ejemplo de sintonización PID Ziegler-Nichols.....	33
Figura 10. Respuesta escalón unitario en forma S.....	34
Figura 11. Oscilación sostenida en periodo P_{cr}	35
Figura 12. Diagrama de flujo metodológico.....	38
Figura 13. Subsistemas del banco de control de nivel.....	40
Figura 14. Bomba RS-360SH.....	42
Figura 15. Módulo driver L298N.....	43
Figura 16. Sensor de ultrasonido HC-SR04.....	44
Figura 17. Especificaciones técnicas FS300A.....	46
Figura 18. Esquemático de variables del proceso.....	47
Figura 19. Disposición espacial de tanques y elementos hidráulicos.....	49
Figura 20. Diseño de estructura banco de pruebas.....	50
Figura 21. Análisis estático, estudio de tensión.....	51
Figura 22. Análisis estático, estudio de Desplazamiento.....	51

Figura 23. Análisis estático, estudio de Deformación unitaria.	52
Figura 24. Esquemático de optoacoplador 4N25M.	54
Figura 25. Esquemático completo para el módulo de control.	55
Figura 26. Diagrama de bloques para obtención de datos de estabilización.	57
Figura 27. Datos de estabilización de la planta.....	58
Figura 28. Comportamiento grafico del rango de operación de las bombas en paralelo.	60
Figura 29. Servo-válvula adaptada para el sistema.....	61
Figura 30. Rango de apertura de la válvula.	62
Figura 31. Respuesta de validación de parámetros para el sistema	64
Figura 32. Planta virtual del modelo matemático no lineal.	66
Figura 33. Diagrama de bloques para validación del modelo no lineal.....	66
Figura 34. Respuesta de validación de parámetros del modelo no lineal.	67
Figura 35. Ubicación de polos de funciones linealizadas.	69
Figura 36. Resultado de estimación de ecuación de transferencia de cada tanque.....	70
Figura 37. Polos y ceros de ecuación G1	71
Figura 38. Polos y ceros de ecuación G2.....	72
Figura 39. Modelo de simulación de control en cascada para el sistema.	73
Figura 40. Entrono de sintonización por PID Tuner.....	74
Figura 41. Ejemplo de sintonización Ziegler-Nichols para modelo de caja gris.	75
Figura 42. Respuesta escalón de simulación de los modelos matemáticos.	76
Figura 43. Sistema dinámico construido.....	77
Figura 44. Módulo caja de control construido.....	78
Figura 45. Estimación inicial de los parámetros del modelo.	79

Figura 46. Estimación final de los parámetros del modelo.....	80
Figura 47. Respuesta escalón de simulación del modelo por caja gris.....	82
Figura 48. Respuesta escalón de simulación del modelo por caja negra.	83
Figura 49. Diagrama de bloques para control de plata real en cascada.	84
Figura 50. Prueba del controlador en cascada real de la planta.	85
Figura 51. Diagrama de bloques para IAE.....	86

Lista de Tablas

Tabla 1. Reglas de sintonización según Ziegler-Nochols.....	34
Tabla 2. Lista de requerimientos para el diseño del sistema.....	38
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la bomba RS-360SH.....	42
Tabla 4. Especificaciones técnicas modulo driver L298N.....	43
Tabla 5. Especificaciones técnicas del sensor de ultrasonido HC-SR04.....	44
Tabla 6. Especificaciones técnicas FS300A.....	45
Tabla 7. Especificaciones técnicas servomotor MG 996R.....	46
Tabla 8. Elementos para el sistema de Hardware.....	53
Tabla 9. Datos del rango de caudal para el sistema de bombas.....	59
Tabla 10. Datos de rango de apertura de la servo-válvula.....	62
Tabla 11. Parámetros del modelo matemático de la planta.....	65
Tabla 12. Consideraciones para la estimación de ecuación de transferencia.....	69
Tabla 13. Parámetros de estimación inicial.....	78
Tabla 14. Resultados de los parámetros de estimación.....	80
Tabla 15. Datos de entrada y salida en cada etapa de control.....	81
Tabla 16. Ecuaciones de transferencia lineales del sistema.....	81
Tabla 17. Ganancias para los controladores del modelo por caja gris.....	82
Tabla 18. Funciones de transferencia por caja negra del sistema.....	83
Tabla 19. Ganancias para los controladores del modelo por caja negra.....	83
Tabla 20. Resultados de simulación y proceso real.....	87

Lista de Apéndices

Apéndice A. Construcción de la planta.....	93
Apéndice B. Modelo no lineal para dinámica de tanques acoplados.....	94
Apéndice C. Códigos de programación MATLAB para validación de caja gris.....	94
Apéndice D. Código de programación Arduino para datos de caudal.....	95
Apéndice E. Códigos de programación MATLAB espacio de estados.....	95
Apéndice F. Presupuesto.....	97
Apéndice G. Manual didáctico de la planta para el estudiante.....	97

Resumen

Título: Diseño y construcción de un banco de pruebas para control de dinámica acoplada de tanques hidráulicos para el laboratorio de sistemas dinámicos y control.*

Autor: Juan Sebastián Calderón Silgado, Lined Johana Mesa Rojas.**

Palabras Clave: Dinámica de tanques acoplados, sistema de control, modelo lineal, modelo linealizado.

Descripción:

El documento presenta el desarrollo de un banco de pruebas de control, donde se describe el funcionamiento y modelos matemáticos para un sistema dinámico de dos tanques acoplados, siendo este uno de los sistemas de control clásicos en ingeniería, para afianzar conceptos sobre técnicas de sintonización, modelos LTI y uso de herramientas Matlab.

La construcción y puesta en marcha del banco de pruebas se hizo teniendo en cuenta una dinámica en la que se entrega un caudal a un tanque superior, que cuenta con un acople de válvula a un tanque inferior; el caudal entre tanques dependió del grado de apertura de dicha válvula por lo que esta última fue considerada una perturbación dentro del sistema. La validación de datos de funcionamiento de la planta se realizó por medio de caja gris, esto permitió caracterizar y linealizar el comportamiento de variables. El modelo de la planta se obtuvo por validación de caja negra y fue comparado con la dinámica linealizada, de este modo fue posible garantizar la estabilidad del sistema construido, posterior a esto fue posible diseñar y sintonizar el sistema de control para el nivel en el tanque inferior de la planta.

La toma de pruebas de funcionamiento y control de la planta validaron el diseño estructural como del controlador, de este modo se obtuvo como resultado que para en el sistema dinámico acoplado se ajusta el modelo no lineal, así como el modelo linealizado, por otro lado, la metodología para validación de parámetros se adapta de manera óptima y con resultados satisfactorios, posterior a esto fue posible crear un manual didáctico para el estudiante con el objetivo de fortalecer su proceso de formación académica en las asignaturas de control.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla

Abstract

Title: Design and construction of a test bench to control the coupled dynamics of hydraulic tanks for dynamic control systems laboratory. *

Author: Juan Sebastián Calderón Silgado, Lined Johana Mesa Rojas. **

Key Words: Coupled tank dynamics, control system, linear model, linearized model.

Description:

The next document presents the control test bench development, where it describes the operation and mathematical models for a dynamic system from two coupled Tanks, being one of the classic's control systems in engineering to guarantee concepts about tuning techniques, LTI models and MATLAB tools.

The construction and start-up of the test bench was made taking in account a process where we provide a flow to an upper tank, which has a valve coupling to a lower tank; The flow between tanks depended on the opening rank of this this valve, because this was considered a disturb inside the system. The validation of the plant operating data it was made through a gray box, this allowed characterize and linearize the behavior of variables. The non lineal model was obtained through black box validation, and it was compared with the linearized dynamics, in that way it was possible to guarantee the stability of the built system, eventually it was possible to design and tune the control system for the level in the lower tank of the plant.

The collection of functional tests and control of the plant validated both the structural and controller design, in this way, we got as a result that in the coupled dynamic system the nonlinear model is fitted, such as the linearized model. In the other hand, the methodology for parameter validation is optimally adapted and with satisfactory results, afterwards it was possible to create a didactic manual for the student with the aim of strengthening their academic training process in the control subjects.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla

Introducción

Los sistemas de tanques dinámicamente acoplados comúnmente son desarrollados a partir de una metodología que describe el ajuste de modelos matemáticos clásicos para transporte de fluidos. Son múltiples las industrias que poseen este tipo de control en sus procesos de producción, tales como la industria de refinería y de alimentos, así como cualquier ámbito donde sea necesario el control de almacenamiento de fluidos, este ejemplo de control será desarrollado y descrito por medio de un banco educativo de pruebas, siendo un modelo de amplio análisis en la rama de sistemas dinámicos y control.

El control de procesos en la industria representa en los últimos años un gran avance tecnológico, así como de ingeniería, esto es aplicado a campos de acción que requieran el control de variables como temperatura, presión, humedad, nivel, entre otros. En este documento presenta el diseño y construcción de un banco de pruebas para control de nivel en tanques, donde se ejecutan procesos reales para un sistema LTI.

La ejecución de este proyecto es un compromiso con el ámbito educativo a nivel de control de procesos para los estudiantes de ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Mediante la construcción de un nuevo ejemplo de dinámica acoplada de tanques, se representa la implementación de conceptos y temas puntuales de ingeniería de control ejecutados a escala, así como el acercamiento a experiencias y practicas reales de procesos presentes en la industria actual.

1. Planteamiento del Problema

1.1 Justificación

En la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander es claro el compromiso con la educación integral de los estudiantes de pregrado, los laboratorios son parte fundamental de este proceso de formación, por ello las correctas practicas con los equipos y herramientas disponibles acercan más a los estudiantes a un correcto desempeño profesional, así como a la aplicación de conceptos. Dentro del laboratorio de sistemas dinámicos y control, en los últimos años se han venido implementando modelos reales por parte de estudiantes de pregrado que propician la enseñanza de temas de automatización y control clásicos. En base a esto se plantea el diseño y construcción de un banco de pruebas experimental para tanques hidráulicos dinámicamente acoplados, en el que por medio del diseño y sintonización de módulos de control PID con modelo dinámico no lineal y linealizado de tipo LTI, se logre medir, caracterizar y controlar el nivel en la planta de operación de tanques dinámicamente acoplados; un sistema automatizado con gran disponibilidad y un alto enfoque industrial y didáctico que adicionalmente incentiva la innovación e investigación dentro de la comunidad estudiantil.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo general*

Construir un banco de pruebas para medición y control del nivel en tanques hidráulicos con enfoque educativo para la implementación de pruebas en el laboratorio de sistemas de control de la escuela de Ingeniería Mecánica.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Modelar y simular la dinámica no lineal acoplada de tanques hidráulicos para caracterizar y ajustar la planta dinámica partiendo de modelos de sistemas dinámicos hidráulicos considerando perturbación al sistema.
- Diseñar e implementar el modelo matemático con herramienta de simulación numérica y un controlador PID para el control de nivel del modelo linealizado de dos tanques hidráulicos dinámicamente acoplados.
- Diseñar y construir experimentalmente el banco prototipo para medir y controlar el nivel de llenado de dos tanques hidráulicos no lineales con dinámica acoplada para el laboratorio de sistemas dinámicos y control de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS. Validar el modelo matemático con la experiencia del banco de pruebas.

Características dimensionales y generales del banco:

1. Numero de tanques: 2
2. Capacidad de tanques: 3 a 5 galones de agua.
3. Potencia máxima de bomba centrífuga: 1/3 hp
4. Accesorios: válvula proporcional de control, sensores de nivel, microcontrolador, etc.

- Generar un manual didáctico y de operación, donde se afiancen los conceptos vistos en clases de ingeniería de control, sistemas dinámicos y dinámica de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS desde un punto de vista experimental e industrial.

2. Referentes Teóricos

En cuanto al diseño y construcción de bancos de control de nivel de agua se encuentran diversas metodologías, así como diferentes resultados, ya sea por el uso de diferentes dispositivos de control o de medición o incluso por el diseño en si del mismo banco. A continuación, se exponen distintos trabajos de nivel internacional, nacional y local en los que se realizó diseño y control para nivel en tanques acoplados.

2.1 Internacional

En la universidad de católica de Valparaíso, Chile (Pérez, 2018). Expone en detalle las dificultades que se presentan tanto en el modelado del sistema como en el sistema de alimentación, así como también los métodos de resolución. Exactamente es un sistema dinámico para el control del nivel de dos tanques interconectados, donde se realizó validación de modelo no lineal, así como linealización para lograr un ajuste de parámetros y construcción del banco respecto a esto. Las pruebas incluyeron dentro de este trabajo un ajuste para la perturbación según el grado de apertura, desde 40% hasta 90% y para cada ajuste una sintonización con controlador de tipo PI.

2.2 Nacional

Para la empresa de Colcafe un estudiante del instituto tecnológico metropolitano para la solución de una problemática en el control de nivel y suministro en los tanques de almacenamiento de ACPM, diseñó mediante el uso de PLC y sensores que permitan la medición de forma continua que a su vez cumpliera con la normativa ATEX un sistema automatizado de llenado. Brindando a

los empleados mayor seguridad y a su vez eficiencia en los procesos, demostrando así las ventajas que presenta un sistema de medición continua, como lo hace el sensor TORRIX el cual es un sensor de nivel magnetostrictivo (Andersson Arbeláez, ITM 2018).

2.3 Local

A nivel local en el 2014 en la universidad industrial de Santander, estudiantes proponen la “instrumentación y control del nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS” (G). Se realizaron cálculos de los parámetros del sistema presentados por las resistencias y capacitancias hidráulicas, luego obtuvieron un modelo para la función de transferencia en el cual relacionaban el caudal de entrada con el nivel del tanque de salida. La sintonización de los parámetros para el controlador PID la realizaron con el primer método de Ziegler & Nichols de forma manual. Sin embargo, mencionan que tuvieron mejores resultados de los parámetros de sintonización a través de la auto sintonización automática del controlador industria. Para futuros trabajos recomiendan hacer “la implementación de recirculación de líquidos, la implementación de un sistema de censado que sea cercano a los valores reales, la implementación de un sistema de control que contemple la interacción de flujo entre los dos tanques” (Peñaranda et al., 2014).

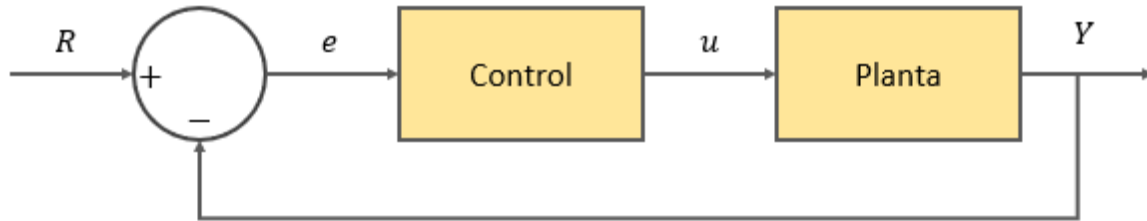
3. Marco Teórico

3.1 Criterio de Estabilidad de Routh

Una de las consideraciones más relevantes a solucionar es la estabilidad del sistema de control lineal en lazo cerrado, por tanto, es imprescindible saber cuáles son las condiciones que volverían inestable al sistema de estudio y buscar las posibles soluciones para evitar la inestabilidad.

Figura 1.

Representación de control en lazo cerrado.



Nota. Representación en diagrama de bloques del sistema de control de una planta en lazo cerrado.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{B(s)}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} = \frac{B(s)}{A(s)}$$

La función de transferencia (FT) de un sistema describe la planta, dicha función de transferencia en lazo cerrado describe la relación entre la salida y la entrada mediante una función algebraica como lo es una razón, siendo el numerador la salida o respuesta del proceso y el denominador la señal de entrada. Dos características importantes de la FT son los polos y los ceros, donde los ceros son las raíces de la función algebraica que se encuentra en el numerador y los polos las raíces que se encuentran en el denominador.

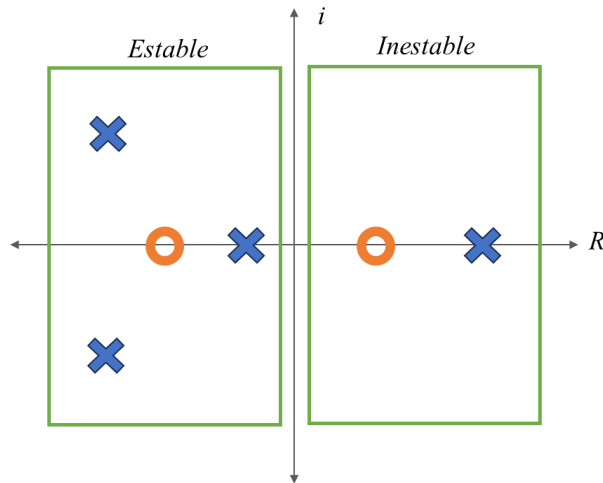
$$FT = \frac{Y(s)}{X(s)} ;$$

$$\text{Ceros} \rightarrow Y(s) = 0 ; \text{ Polos} \rightarrow X(s) = 0$$

Para hallar los valores de los polos y ceros basta con igualar a cero cada parte, Los ceros determinan la dinámica y los polos la estabilidad de la planta, para comprender mejor es posible graficar en el plano complejo S .

Figura 2.

Estabilidad de un sistema por asignación de polos.



Nota. Representación de estabilidad según ubicación de polos y ceros en el plano imaginario.

Sabiendo bien que las raíces del denominador de la función de transferencia corresponden a los polos y estos determinan la estabilidad del sistema, con que un solo polo este en la parte derecha del plano complejo S basta para que la función transferencia de la planta sea inestable, para solucionar esto se aplica un controlador que haga estable la función de transferencia trasladando el polo al lado izquierdo. Otra condición es cuando la función transferencia tiene un único polo y este se encuentra en el origen, estas funciones de transferencias se conocen como marginalmente estables ya que se encuentran muy próximo a volverse inestable por estar muy cerca al semiplano derecho.

El criterio de estabilidad de Routh permite saber con exactitud cuántos polos están en el semiplano derecho, más no la ubicación. Estos son los pasos para realizar el arreglo de Routh.

1. Identificar el polinomio del denominador $A(s)$, organizar de mayor a menor según las potencias del polinomio, se puede asumir $a_n = 0$ para evitar que aparezcan polos en el origen.

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n$$

2. Construir la tabla de Routh colocando como primera columna todas las potencias S de mayor a menor.
3. Con el polinomio del punto 1 se completa las dos primeras filas de la siguiente forma.

$$\begin{array}{cccc}
 s^n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \dots \\
 s^{n-1} & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \dots \\
 s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 \dots \\
 s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 \dots \\
 & \cdot & \cdot & \cdot \\
 & \cdot & \cdot & \cdot \\
 & \cdot & \cdot & \cdot \\
 s & e_1 & & \\
 s^0 & f_1 & &
 \end{array}$$

Se puede tomar que las primeras dos filas y la primera columna son datos que ya se conocen. Los anteriores pasos se continúan hasta que no queden más elementos, una equivalencia del número total de filas es $n+1$. Para la determinación de los coeficientes desconocidos se realiza una multiplicación cruzada de la siguiente manera.

$$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}$$

$$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1}$$

Este proceso se continúa hasta evaluar la n -ésima fila. La primera columna de coeficientes es esencial para realizar este criterio, al observar el número de cambio de signo de esta misma

columna indica el número de polos inestables. Nótese que no es importante saber con exactitud los valores, basta con saber el número de cambio de signo.

Casos especiales

- Cuando un número de la primera columna de cualquier fila es cero, en este caso se reemplaza por un número positivo muy pequeño ε y se continúa evaluando el polinomio.
- Si el coeficiente que está encima del cero (ε) tiene el mismo signo que el que está debajo de él, quiere decir que tiene dos raíces en $S = \pm j$.
- Si el signo del que está encima del cero (ε) es contrario al que está debajo de él, quiere decir que hay un cambio de signo después de este.
- Cuando una fila es totalmente cero, se crea un polinomio auxiliar con la fila anterior a la fila de los ceros, se halla la derivada de dicho polinomio, se toman los coeficientes de la derivada y se reemplazan en la fila de los ceros para continuar con el array.

3.2 Dinámica de Tanques Acoplados

Para el análisis del modelo matemático de sistemas de nivel de líquido es necesario dividir lo regímenes de flujo en laminar y turbulento. Si la magnitud del número de Reynolds es mayor que 3000 se dice que el flujo se encuentra en régimen turbulento y flujo laminar si el número de Reynolds es menor a 2000. En la práctica el flujo en los procesos industriales con frecuencia resulta ser turbulento lo cuales son presentados mediante ecuaciones diferenciales no lineales, dichas ecuaciones deberán ser linealizadas si la región de operación está limitada.

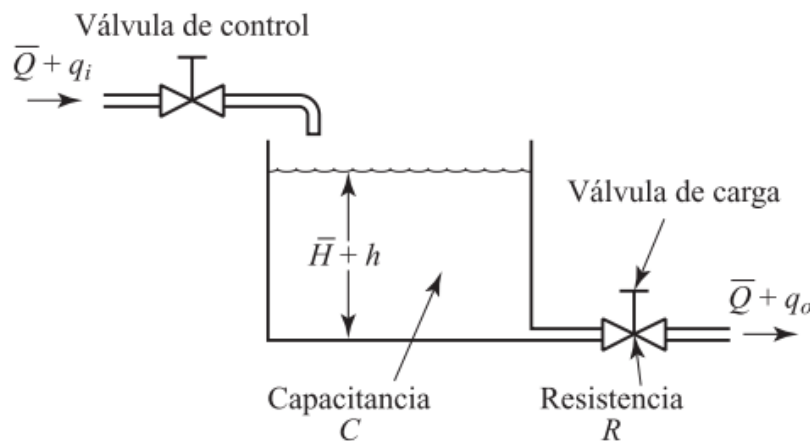
Según Ogata ((Ogata, 2010) para los sistemas de nivel de líquido se introduce el concepto de resistencia y capacitancia para describir en forma simple las características dinámicas de tales

sistemas. La resistencia R se define como el cambio en la diferencia de nivel necesaria para producir un cambio de una unidad en el caudal.

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

Figura 3.

Sistemas de nivel en liquido



Nota. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 102), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

Para el flujo en régimen laminar a través de la restricción la relación de caudal en estado estable y la altura en estado estable se determina:

$$Q = KH$$

Donde:

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

K = Coeficiente, $\text{m}^2/\text{seg} = 1/R_h$

H = Altura en estado estable, m

La resistencia del flujo en régimen laminar es constante y análoga a la resistencia eléctrica. Tal linealización es válida siempre y cuando la variación en la altura y el caudal sean pequeños a partir de sus valores respectivos en estado estable. La relación que hay entre el caudal de salida y la resistencia es inversamente proporcional. Por lo tanto, la ecuación se puede reescribir de la siguiente manera

$$Q = \frac{H}{R_h}$$

$$R_{hl} = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q}$$

Si el flujo es turbulento a través de la restricción, el caudal se determina usando la ecuación:

$$Q = K\sqrt{H}$$

Donde:

Q = caudal del líquido en estado estable, m³ /seg

K = coeficiente, m²/seg

H = altura en estado estable, m

$$R_{ht} = \frac{dH}{dQ}$$

De la esta última ecuación se obtiene:

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

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

$$R_{ht} = \frac{2H}{Q}$$

Por otro lado, la capacitancia C se define de manera general como el cambio necesario en la cantidad del líquido almacenado, para producir un cambio de una unidad en el potencial, dicho potencial es la cantidad que indica el nivel de energía del sistema (altura). La capacitancia es igual al área transversal. por lo tanto, si esta es constante la capacitancia será constante para cualquier altura.

Considerando el sistema que aparece en la figura 3, siendo todas las letras mayúsculas parámetros estables en el tiempo y las letras minúsculas pequeñas variaciones que pueden haber de esos parámetros estables para llevar a cabo la linealización del sistema, se retoma la definición de capacitancia en el régimen del tiempo y se obtiene:

$$qi - qo = C \frac{dh}{dt}$$

$$R_h * qo = h$$

Despejando y reemplazando para dejar todo en función de la constante de resistencia R y el caudal de entrada qi :

$$R_h qi = R_h C \frac{dh}{dt} + h$$

En el dominio de S y suponiendo la condición inicial de cero, se obtiene

$$R_h Qi(s) = (R_h Cs + 1)H(s)$$

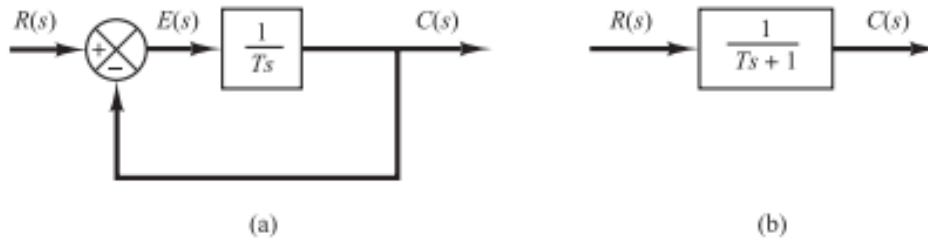
Considerando qi la entrada y h la salida, la función de transferencia del sistema es:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_h}{R_h C s + 1}$$

En la práctica del diseño y análisis de sistemas de control la señal de entrada para el sistema no se conoce con anticipación, solo en algunos casos especiales se conoce con anticipación dicha señal y se puede expresar de forma analítica o mediante curvas. Para esto se debe tener una base de comparación de diversos sistemas de control; en otras palabras, una base de prueba y error donde se especifiquen las señales de entrada de las pruebas particulares y comparando las respuestas de varios sistemas a estas señales. El uso de las señales de prueba se justifica ya que existe una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba común y luego ser capaz de manejar las señales de entrada reales. Las señales de prueba al ser funciones del tiempo muy simples facilitan el análisis matemático y experimental de sistemas de control. Las funciones más usadas son escalón, rampa, parábola, impulso, etc.

Otros grandes rasgos para tener en cuenta son el tipo de respuesta que presentará el sistema de control y cómo será la dinámica de este. Se tienen dos tipos de respuesta; una transitoria que se refiere a la que va de un estado inicial a uno final, y otra respuesta de estado estacionario que se entiende como la manera en que se comporta la salida del sistema conforme t tiende a infinito. Por otro lado, están los sistemas con dinámica de estabilidad absoluta, estabilidad relativa y error en estado estacionario.

Considerando un sistema de primer orden como lo plantea Ogata (Ingeniería de control moderna, 5 Ed) presentando un diagrama de bloques simplificado.

Figura 4.*Ejemplo de diagrama de bloques*

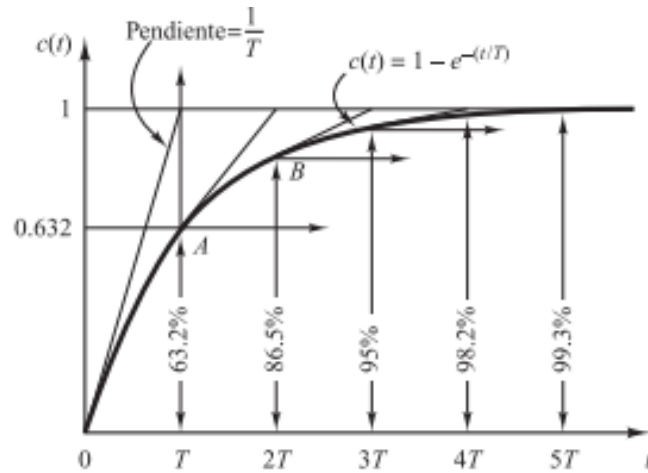
Nota. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 161), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

Para una respuesta escalón unitario que es $1/s$, reemplazando $R(s) = 1/s$ en la ecuación anterior y desarrollando en fracciones simple, y tomando la transformada inversa de Laplace de obtiene.

$$c(t) = 1 - e^{-t/T}; t \geq 0$$

Cuando $t = T$ se observa que la salida $c(t) = 0.632$ lo que indica que alcanza el 63.2% del cambio total. Es aquí donde entra un concepto para el diseño de controladores que es llamado el criterio del 2% que equivale a un tiempo de establecimiento de $4T$ ($ts = 4T$) tener en cuenta que entre mayor sea el valor de T más lento será el sistema.

Figura 5.*Tiempo de establecimiento*

Nota. La figura representa la curva de respuesta exponencial. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 161), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

La transformada de Laplace para una señal de entrada tipo rampa unitario es $R(s) = 1/s^2$, y se ve expresada de la siguiente manera

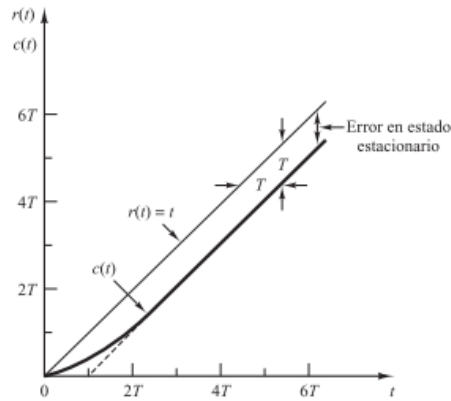
$$c(t) = t - T + Te^{-t/T}; \quad t \geq 0$$

$$e(t) = r(t) - c(r) = T(1 - e^{-t/T})$$

De esta manera si t tiende a infinito, la parte exponencial tenderá a cero y, por tanto, el error $e(t)$ se aproxima a T.

Figura 6.

Ejemplo de respuesta rampa unitaria.



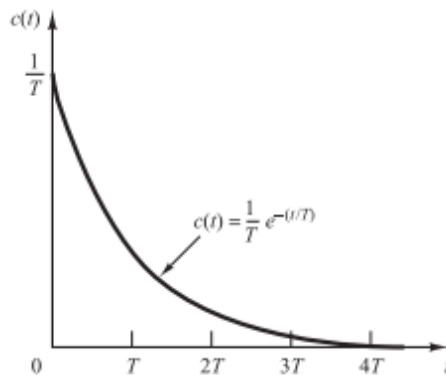
Nota. Respuesta de respuesta rampa unitaria para un sistema de primer orden. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 163), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

En el caso de que la entrada sea un impulso unitario, $R(s) = 1$ la salida aplicando la transformada inversa de Laplace se obtiene como resultado

$$c(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T}; \quad t \geq 0$$

Figura 7.

Ejemplo de respuesta impulso unitario



Nota. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 163), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

3.3 Linealización por Series de Taylor

La serie de Taylor ayuda a aproximar un sistema no lineal a la linealidad mediante la retención de términos lineales. Para estos se necesitan señales que puedan considerarse pequeñas y que se encuentre cerca del punto de equilibrio (condición de operación), ya que la operación normal de un sistema puede ocurrir cerca de dicho punto, este sistema es considerado dentro de un rango de operación limitado que además de obtener la linealidad será un sistema invariante en el tiempo. Los puntos que no son considerados deben ser suficientemente pequeños, es decir; se desvían ligeramente de la condición de operación.

Suponiendo un sistema no lineal con salida y que a su vez es función de x_1 y x_2 como entradas, se obtiene:

$$y = f(x_1, x_2)$$

Aplicando la serie de Taylor alrededor del punto de equilibrio \bar{x}_1, \bar{x}_2 la ecuación se transforma en:

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} (x_1 - \bar{x}_1) + \frac{\partial f}{\partial x_2} (x_2 - \bar{x}_2) \right]$$

Evaluando $x_1 = \bar{x}_1$ y $x_2 = \bar{x}_2$ cerca al punto de equilibrio, $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$, k_1 y k_2 las derivadas parciales como se presentan se obtienen:

$$y - \bar{y} = k_1(x_1 - \bar{x}_1) + k_2(x_2 - \bar{x}_2)$$

3.4 Estrategias de control

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado (Ogata, Ingeniería de control moderna, 5 Ed). Siendo así un sistema debe interpretarse como un concepto amplio que se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, algunos

ejemplos de estos son los sistemas físicos, empresariales, biológicos, entre otros. En el caso del diseño de sistemas de control para proceso de censado de suministro, almacenamiento y/o nivel de dicho componente; como lo es en este caso de estudio es de preferencia la obtención de un sistema de control robusto, que básicamente consiste en una aproximación razonable asumiendo desde el comienzo que existe un error o incertidumbre entre la planta real y el modelo matemático obtenido, para asegurar que el controlador diseñado basado en el modelo funcionará adecuadamente cuando se aplique en la planta real.

Existen dos modelos de sistemas de control; el sistema de lazo cerrado también conocido como retroalimentación, que básicamente calcula la diferencia que hay entre la salida y la entrada tratando así de obtener la estabilidad más precisa posible al punto de referencia, son aconsejables el uso de este modelo para sistemas con perturbaciones y que no se conocen los datos de entrada. Este modelo hace posible el uso de componentes relativamente pocos precisos y económicos para obtener el control adecuado. Por otro lado, está el modelo de lazo abierto en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control, básicamente en estos sistemas no se mide la salida ni se retroalimenta para comparar con la entrada. El sistema de control de lazo abierto solo se usa cuando se tiene la relación entre la entrada y la salida con ausencia de perturbaciones externas e internas.

3.5 Arquitectura de Control en Cascada

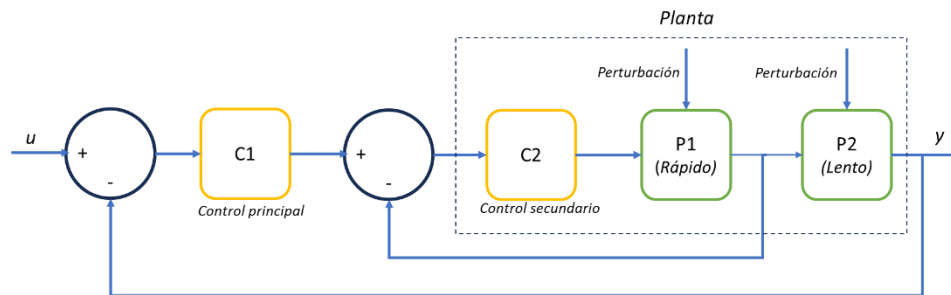
Cuando existen sistemas que implican la ejecución de varios subprocesos o etapas, es común encontrar ciertos niveles de propagación de perturbación dentro de las partes, un método para lograr excluir dichas perturbaciones dentro de las plantas de manera rápida es mediante el control en cascada.

Este tipo de arquitectura de control contiene un controlador por cada etapa, así por ejemplo para una planta de dos etapas habrá dos controladores y cada uno contará con realimentación, esta

ultimo garantiza que se eliminen las perturbaciones de forma rápida. Para el diseño de este tipo de control se considera un proceso lento o secundario, así como un proceso rápido o principal. Es importante tener en cuenta que una de las condiciones más importantes para implementar este diseño de control es que la variable a ser controlada haga parte del proceso lento de la planta.

Figura 8.

Esquema de control en cascada con dos etapas.



Nota. El diagrama de bloques representa la estructura para un control en cascada típico de dos etapas con perturbación.

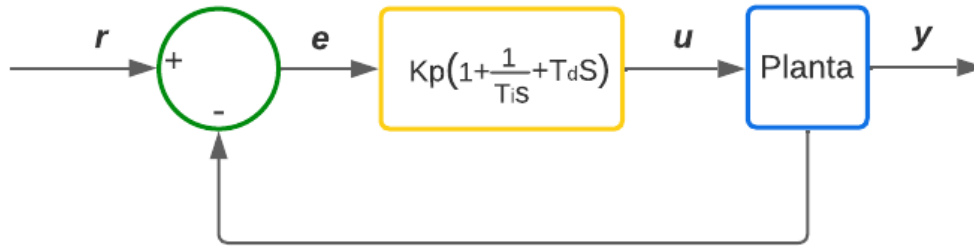
3.6 Métodos de sintonización.

3.6.1 Sintonización por método Ziegler-Nichols

Es de interés el entendimiento de la regla de sintonización de Ziegler-Nichols. Una vez obtenido el modelo matemático el paso a seguir es hallar los parámetros del controlador que cumpla especificaciones del estado transitorio y estacionario del sistema de lazo cerrado. En el método Ziegler-Nichols se dan valores a los parámetros K_p , T_i , T_d , basándose en las respuestas a escalón experimentales o un valor K_p que produce estabilidad marginal. Las reglas de Ziegler-Nichols son muy convenientes en plantas que no se conocen los modelos matemáticos, pero también se pueden aplicar para plantas las cuales se conoce el modelo matemático, para estos casos se siguen un conjunto de valores para los parámetros de controlador.

Figura 9.

Ejemplo de sintonización PID Ziegler-Nichols.



Nota. El diagrama de bloques representa la ecuación de transferencia para un controlador PID dentro del proceso de control.

K_p = Ganancia proporcional

T_i = Tiempo integral

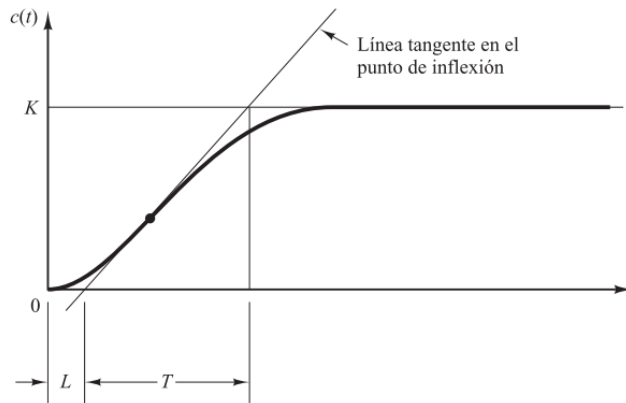
T_d = Tiempo derivativo

Adicional a esto el sistema puede presentar en su respuesta escalón una sobre elongación que puede resultar no deseada, para mitigar esto basta con hacer unos ajustes fino hasta obtener el resultado deseado, cabe aclarar que todo es experimental.

El primer método para la respuesta de la planta a una entrada escalón se obtiene de manera experimental, dicha respuesta se ve reflejada en forma de S si la planta no tiene integradores ni polos dominante complejos conjugados. La característica de la curva en forma de S está dada por dos parámetros, el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . estos dos parámetros se hallan trazando una recta tangente al punto de inflexión y observando las intersecciones con lo eje del tiempo y de la línea $c(t)=K$

Figura 10.

Respuesta escalón unitario en forma S.



Nota. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 569), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

A partir de los parámetros mencionados se construye una tabla la cual muestra los valores que toman las constantes K_p , T_i , T_d , dependiendo del tipo del controlador que se desea construir.

Tabla 1.

Reglas de sintonización según Ziegler-Neohols.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

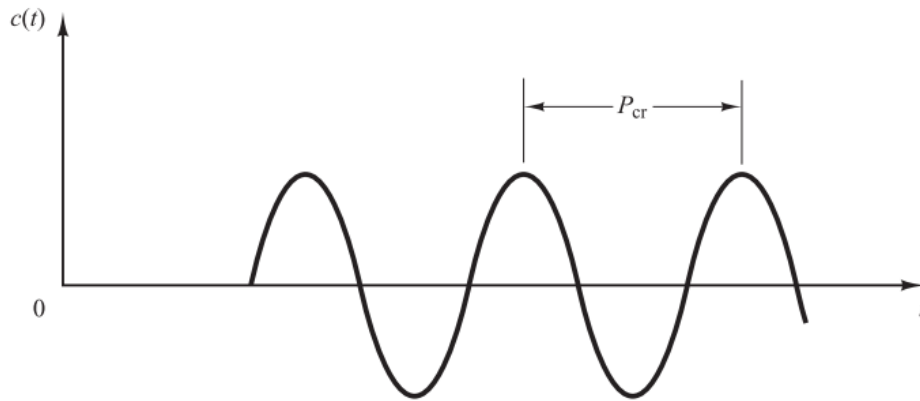
Nota. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 570), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

En el segundo método se fijan los valores $T_i=\infty$ y $T_p=0$. Haciendo uso solo de la acción del control proporcional, para esto se le asignan valores K_p desde cero hasta un valor crítico K_{cr} , buscan una salida con oscilaciones sostenidas. Por lo tanto, la ganancia K_{cr} y el periodo P_{cr} se

determinan de forma experimental. Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces no sería posible aplicar este método.

Figura 11.

Oscilación sostenida en periodo P_{cr}



Nota. Adaptado de Ingeniería de control moderna (p. 571), por Ogata, K, 2010. Pearson Educación.

3.6.2 Sintonización por PID Tuner MATLAB

La herramienta de simulink en Matlab para controladores; Tuner, ofrece una alternativa de sintonización en bucle rápido que ajusta las ganancias respecto a un equilibrio de rendimiento frente a robustes. Esta herramienta es ajustable para controladores de tipo PI, PID con filtro derivativo y PID con dos grados de libertad, el rendimiento de los controladores se puede analizar tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

Dentro de un modelo Simulink es posible obtener los valores para las ganancias del controlador que hacen posible que la respuesta escalón unitario satisfaga las características del comportamiento de la planta, partiendo de un modelo LTI importado, este modelo puede ser tanto lineal como lineal, asimismo, el orden de la planta no limita el uso del complemento. Con un controlador respectivamente diseñado en cuanto a dominio, tiempo de muestreo y forma, el PID

Turner linealiza automáticamente el modelo en un punto de funcionamiento especificado según las condiciones iniciales que posea, la respuesta para un step es fácilmente visualizada en la interfaz del complemento respecto del ajuste asignado y los valores de las ganancias K_p , K_i , K_d son cargados de forma interactiva dentro del controlador una vez se cuenta con una respuesta óptima.

3.7 Filtro pasa baja Butterworth

Hace referencia a un filtro digital cuya finalidad es entregar una salida de señales de banda plana. Existen distintos modos de diseño de un filtro Butterworth; en MATLAB las señales son separadas dependiendo del orden, así como de la frecuencia de corte normalizada y los coeficientes entregados corresponden a la función de transferencia.

$$[b, a] = \text{butter}(n, W_n)$$

Donde:

$[b, a]$: coeficientes de la ecuación de transferencia

n : orden de la ecuación

W_n : Frecuencia de corte normalizada

Para la frecuencia de corte en filtros digitales se establece un rango de 0 a 1, donde 1 puede corresponder a la mitad de la tasa de muestreo.

$$W_n = \frac{f_c}{f_s/2}$$

Donde:

f_c : frecuencia de corte

f_s : Frecuencia de muestreo

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{a(1) + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}}$$

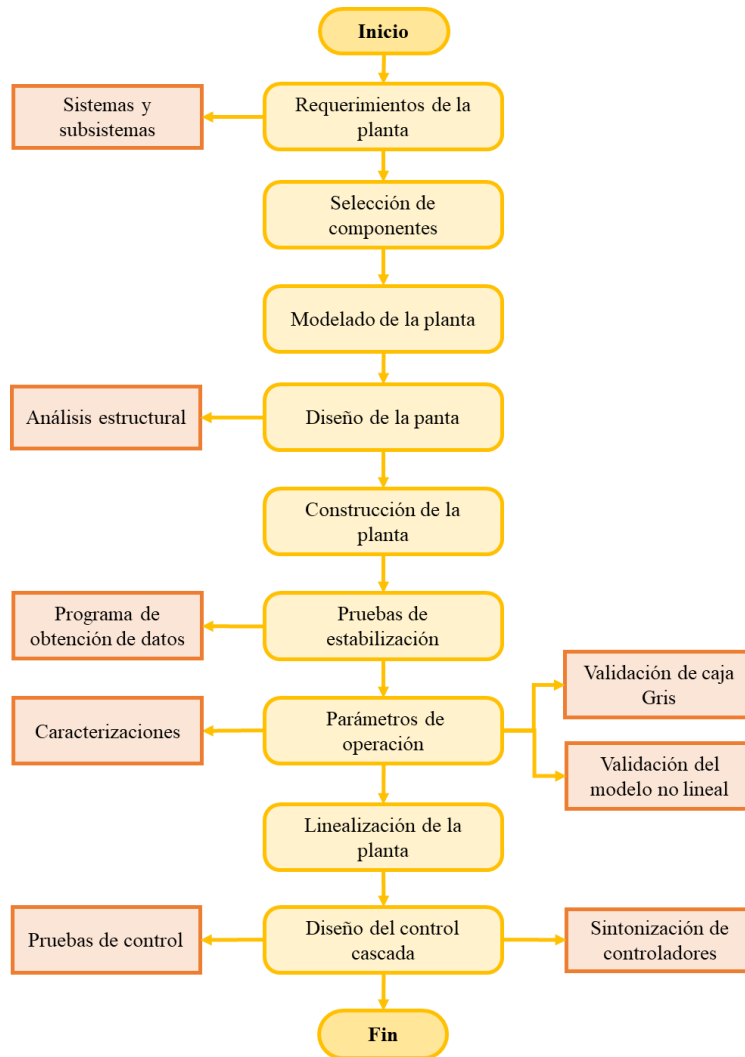
Los coeficientes entregados de la ecuación de transferencia son reemplazados para obtener la función del filtro pasa baja que se incluye dentro del código de programación. Dentro del entorno de Simulink la implementación del filtro se da a través de bloques donde se asigna de igual modo la frecuencia de corte y la frecuencia de muestreo.

4. Metodología

La metodología empleada es una adaptación de los distintos modelos de control de nivel en tanques de los que se tiene referencia a nivel internacional, nacional y local anteriormente expuestos. La metodología tiene como fin último cumplir con los objetivos establecidos bajo los lineamientos del diseño de control de sistemas dinámicos, para esto se sigue el paso a paso del diagrama de flujo presentado.

Figura 12.

Diagrama de flujo metodológico.



Nota. La figura anterior representa el paso a paso de la metodología que será implementada para la ejecución del proyecto y cumplimiento de los objetivos.

4.1 Requerimientos de la planta

Tabla 2.

Lista de requerimientos para el diseño del sistema

Requerimientos	Factores de relevancia	Prioridad
----------------	------------------------	-----------

Número de tanques	Dos tanques para control dinámico	alta
Velocidad de llenado de los tanques	Capacidad de llenado de la unidad de suministro al sistema (sistema de bombeo)	alta
Volumen de tanques	La visualización de llenado es importante para el desarrollo de pruebas por lo que se consideran tanques rectangulares de 50x20x20 cm	media
Volumen de depósito	Para almacenar todo el fluido circulante se requiere mínimo un volumen de 13 gal	media
Nivel de llenado	Este nivel será determinado según la práctica, con un rango entre 10 a 40 cm	alta
Corriente DC	La corriente continua facilita y asegura el control del sistema	alta
Presupuesto	se cuenta con \$2`000,000 para la compra y construcción del sistema	alta

Nota. La tabla anterior indica la prioridad de cada requerimiento dentro del proceso de diseño y construcción del banco de pruebas.

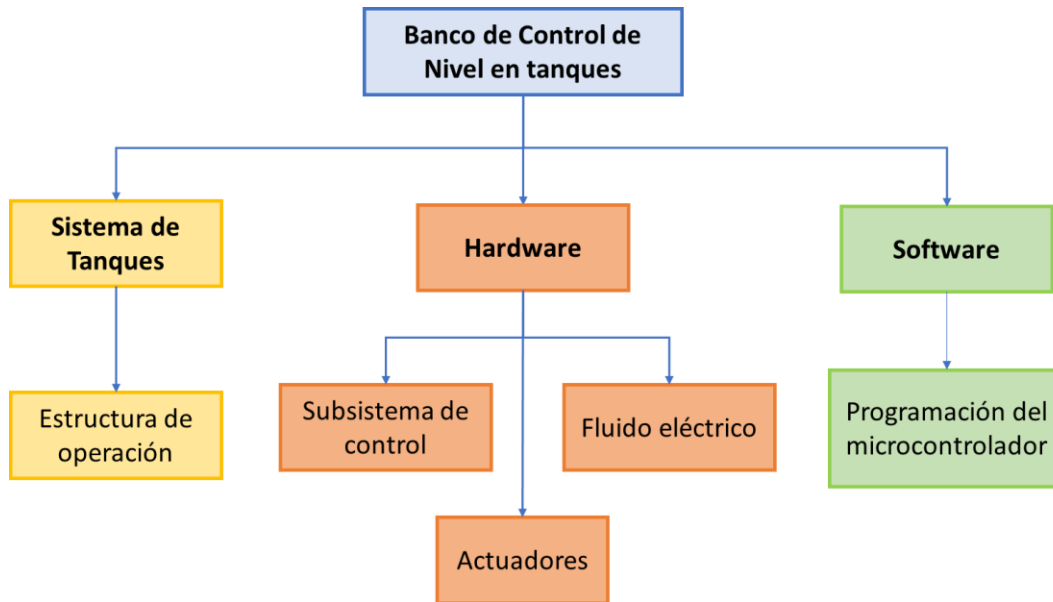
El diseño del banco de control dinámico de tanques hidráulicos acoplados se ejecuta en base a los requerimientos planteados e identificados, así como la disponibilidad de las partes en el mercado y disponibilidad de espacio dentro del laboratorio de control.

4.1.1 Descripción de la planta

En el banco de pruebas para control de nivel en tanques acoplados se identifican tres grandes partes o sistemas, así como sus respectivos subsistemas, es de importancia identificarlos para un correcto diseño.

Figura 13.

Subsistemas del banco de control de nivel.



Nota. La figura anterior representa la división de sistema y respectivos subsistemas que hacen parte del banco de pruebas.

4.1.2 Sistema de tanques

En base a los requerimientos, el sistema consta de dos tanques con capacidad volumétrica de 5,3 gln y un depósito que debe suplir el consumo de los tanques y fluido circulante. La forma geométrica tanto de los tanques como del depósito por comodidad de diseño se define como rectangular y en material acrílico transparente por su amplia disponibilidad en el mercado y estética de la estructura. Las conexiones entre los tanques y el depósito, por efectos de manufactura y costo se plantean en manguera plástica transparente y blanda de ½ pulgada acoplada a tubos PVC, mientras que la regulación de salida del fluido de los tanques será por medio de válvulas de bola también de ½ pulgada con acoples reductores.

4.1.3 Hardware

Para el diseño de control del sistema se decidió usar una placa Arduino UNO por su amplia disponibilidad en el mercado, su bajo costo y su amplio uso para programación y control, así mismo para remplazar cableado y uso de protoboard se diseñará una placa PCB.

Los elementos de comunicación son sensores de nivel en cada tanque y caudalímetro cerca al sistema de bombeo. Así mismo para la regulación del PWM del sistema de bombeo es necesaria la implementación de dispositivos puente h o modulo driver.

Los actuadores son los elementos encargados de suministrar el fluido del depósito a través de la tubería a los tanques; es decir bombas o sistema de bombeo de preferencia DC para asegurar la regulación de los PWM que se define como la variable manipulada. Este subsistema debe ser capaz de suministrar el fluido necesario para los tanques conforme a los requerimientos.

El banco de pruebas estará conectado a la red eléctrica del laboratorio, tensión de 120V por lo que es necesaria la transformación de corriente alterna AC a corriente directa DC, para ello se implementa una fuente swicheada de 12V, con amplia disponibilidad en el mercado y bajo costo.

4.1.4 Software

Toda la parte de programación de microcontrolador se diseñará en la herramienta MATLAB Simulink que es una herramienta con amplia aplicación para la placa, cuenta con variedad de librerías, complementos y es de uso libre, simultáneamente es compatible con gran cantidad de elementos electrónicos para lecturas y señales analógicas. Es de especial interés para la parte de sintonización de control PID por la amplia gama de complementos y fácil lenguaje de programación por bloques.

4.2 Selección de componentes

4.2.1 Actuadores

El sistema de bombeo debe suplir la capacidad de los tanques, así como asegurar el control por lo que se requieren bombas tipo DC. Se opta entonces por un sistema de bombeo de cuatro bombas idénticas conectadas en paralelo para asegurar mayor caudal y que cuentan con las siguientes especificaciones técnicas.

Figura 14.

Bomba RS-360SH.



Nota. Adaptado de Genphoal, 2023

Tabla 3.

Especificaciones técnicas de la bomba RS-360SH.

Especificaciones Técnicas	
Voltaje de operación	3V~12V
Corriente de operación	1.7A~4A
Flujo volumétrico	1.5~2 L/min
Diámetro de salida	4.4 mm

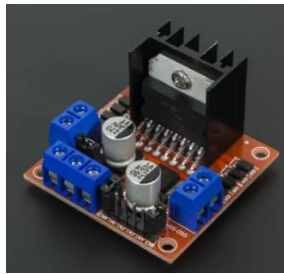
Nota. Adaptado de Genphoal, 2023 (<https://www.andmotor.com/wp-content/uploads/2015/02/RS-360-Mini-DC-4-12V.jpg>)

4.2.2 Modulo Driver

Para la regulación de PWM de las bombas se adquieren dos módulos driver de referencia L298N que es la mejor opción de regulación dentro del mercado debido a su bajo costo, doble puerto, regulador de voltaje y su amplio rango de tensión de entrada.

Figura 15.

Modulo driver L298N.



Nota. Adaptado de Vistrónica, 2023

Tabla 4.

Especificaciones técnicas modulo driver L298N.

Especificaciones Técnicas	
Interfaz de potencia	7V~46V
Corriente máxima	2A por canal
Nivel de entrada de señal de control	Nivel alto $2.3V \leq V_{in} \leq V_{ss}$ Nivel bajo $-0.3V \leq V_{in} \leq 1.5V$
Voltaje de control	5V
Corriente de control	36mA
Potencia de salida	25W

Nota. Adaptado de St, 2023 (<https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>)

4.2.3 Sensores de nivel

Los sensores por ultrasonido son una excelente opción para medir nivel, cuentan con gran disponibilidad en el mercado y con una amplia precisión por lo que es la mejor opción.

Figura 16.

Sensor de ultrasonido HC-SR04.



Tabla 5.

Especificaciones técnicas del sensor de ultrasonido HC-SR04.

Especificaciones Técnicas	
Voltaje de entrada	5V
Frecuencia de operación	20kHz~400kHz
Angulo del sensor	<15°
Distancia de detección	2cm~450cm
Precisión	0.3cm

Nota. Adaptado de ALLDATASHEET.COM, 2023 (<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132204/ETC2/HCSR04.html>)

4.2.4 Caudalímetro

Como se menciona es necesario la adaptación de un transductor de caudal cercano a la salida del sistema de bombeo para conocer con precisión el caudal que se está suministrando. La referencia seleccionada es un sensor FS300A efecto Hall, cuenta con un rotor con paletas accionado al pasar el fluido, cuya salida es la frecuencia de una onda cuadrada proporcional al caudal, para ello cuenta con un factor k de conversión. El transductor posee las siguientes especificaciones técnicas.

Tabla 6.

Especificaciones técnicas FS300A.

Especificaciones Técnicas	
Voltaje de operación	5V~24V DC
Corriente de operación	15mA (5V)
Rango de flujo	1~60 L/min
Conexión	3/4"
Factor de conversión	5.5
Diámetro de salida	4.4 mm

Nota. Adaptado de Vistronica, 2023 (<https://www.vistronica.com/sensores/caudal/sensor-de-flujo-3-4-fs300a-detail.html>)

4.2.5 Servomotor

El acople de los tanques se realiza por medio de elementos hidráulicos como mangueras y válvulas, es de suma importancia el grado de apertura de la válvula pues de esto depende la cantidad de caudal que es suministrado en el acople. Para el accionamiento de apertura de válvula

se selecciona e implementa un servomotor para el control de posición, será parte del sistema de control y cuenta con las siguientes características.

Figura 17.

Especificaciones técnicas FS300A.

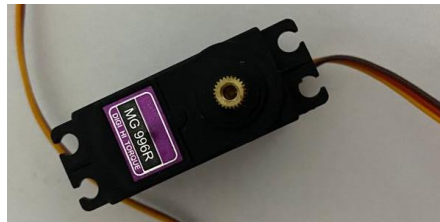


Tabla 7.

Especificaciones técnicas servomotor MG 996R.

Especificaciones Técnicas	
Voltaje de entrada	4.8 ~ 7.2 VDC
Corriente de consumo	900 mA
Rango de rotación	270°
Velocidad de operación	0.17 s/16° (4.8V) 0.14 s/16° (6.0V)
Torque	9.4 kg/cm (4.8V) 11 kg/cm (6.0 V)

Nota. Adaptado de Vistronica, 2023 (<https://www.vistronica.com/sensores/caudal/sensor-de-flujo-3-4-fs300a-detail.html>)

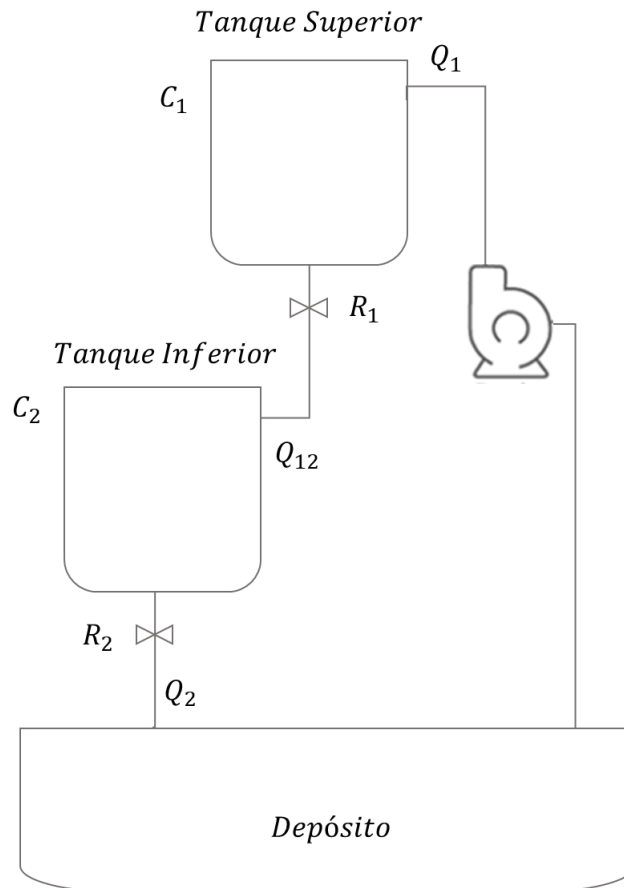
4.3 Modelado matemático de la planta

Del esquemático del sistema de los tanques con arreglo en cascadas T1 y T2 de sección transversal A_1 y A_2 respectivamente de igual dimensión. El subsistema de bombeo entrega Q_1 a

T1, los tanques se encuentran conectados mediante una servo-válvula de caudal variable Q_{12} , la salida de T2 es representada por Q_2 . Dicho modelo está caracterizado por dos ecuaciones diferenciales no lineales las cuales son válidas sí $H_1 \geq H_2$. Estas ecuaciones describen el balance de flujo del sistema.

Figura 18.

Esquemático de variables del proceso.



Nota. La figura muestra gráficamente las variables del proceso en el banco de pruebas.

$$A \cdot \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{12} \quad (1)$$

$$A \cdot \frac{dh_2}{dt} = Q_{12} - Q_2 \quad (2)$$

Siendo:

$$Q_1 = K_m \cdot u \quad (3)$$

K_m es una constante de relación caudal/pwm $\left[\frac{m^3}{pwm \cdot s} \right]$ y u representada el PWM aplicado a las bombas como se vio anteriormente en el apartado de Caracterización de la bomba.

Aplicando el teorema de Torricelli los caudales Q_{12} y Q_2 se obtiene que:

$$Q_{12} = s_1 \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (4)$$

$$Q_2 = s_2 \sqrt{2g \cdot h_2} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (5)$$

Donde s_1 y s_2 representan la sección transversal del orificio de la válvula y la sección transversal de la manguera del taque dos respectivamente, y g la gravedad se reemplazan las ecuaciones x_3, x_4, x_5 en las ecuaciones x_1, x_2 y desarrollándose se obtienen las ecuaciones de estado que describen el sistema, las que serán usadas para el análisis de simulación, modelado y sintonización en la herramienta de Matlab.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} \left(k_m \cdot u - s_1 \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)} \right) \quad (6)$$

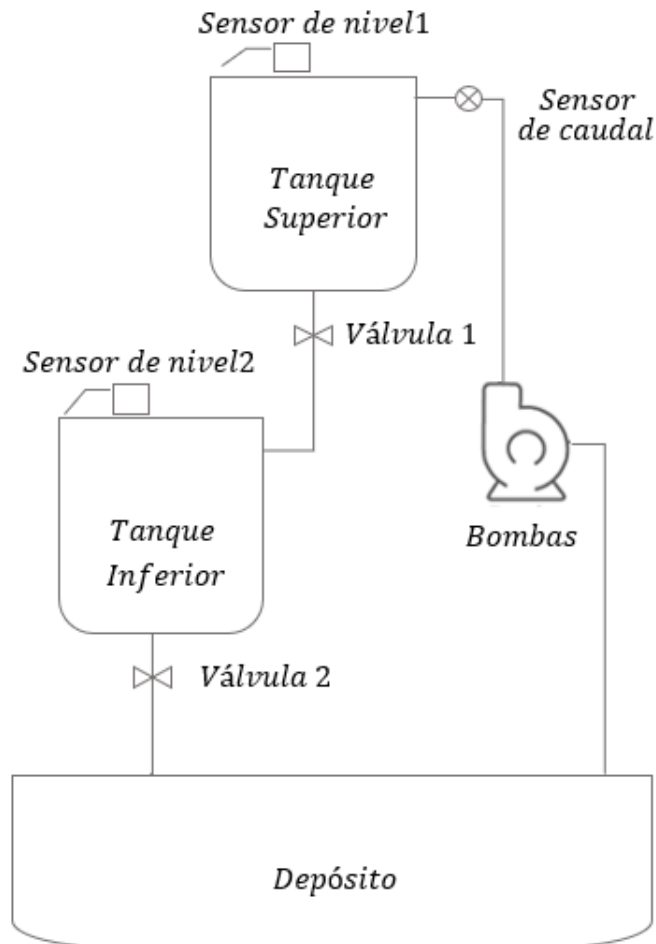
$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} \left(s_1 \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)} - s_2 \sqrt{2g \cdot h_2} \right) \quad (7)$$

4.4 Diseño de la planta

La disposición espacial de los componentes del sistema se plantea de la siguiente forma, teniendo en cuenta la dinámica e interacción de los tanques y demás partes necesarias para la correcta operación.

Figura 19.

Disposición espacial de tanques y elementos hidráulicos.



Nota. La figura muestra gráficamente el diseño planteado para el banco de pruebas.

Una vez definida la disposición espacial de los tanques, el depósito y demás elementos dentro de este sistema, así como la dinámica e interacción entre los mismos es posible diseñar la estructura soporte.

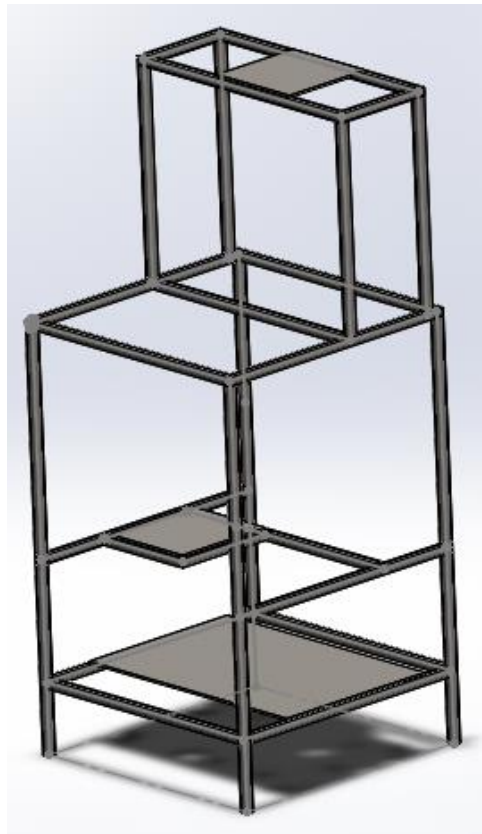
4.4.1 Diseño y análisis estructural

El bastidor del banco de pruebas fue diseñado con perfilaría metálica estructural como tubería cuadrada de 3/4" calibre 18 acero al carbón, ángulo de 1/4" calibre 18 acero al carbón, se

realizó en paneles en pensando en que el transporte, armado y desmonte de este fuera fácil y versátil, estos paneles están unidos mediante tornillería galvanizada de $\frac{1}{4}$ " x $1\frac{1}{2}$ ". En las siguientes páginas, se muestran los diferentes análisis estáticos estructurales que se hicieron con la ayuda de la herramienta SolidWorks.

Figura 20.

Diseño de estructura banco de pruebas.



Nota. La figura muestra el diseño realizado en SolidWorks para el análisis estructural.

Figura 21.

Análisis estático, estudio de tensión.

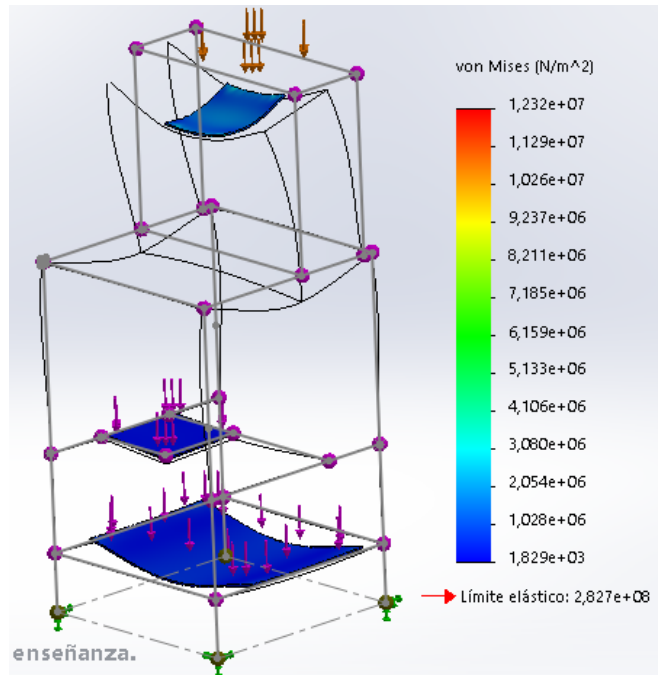


Figura 22.

Análisis estático, estudio de Desplazamiento.

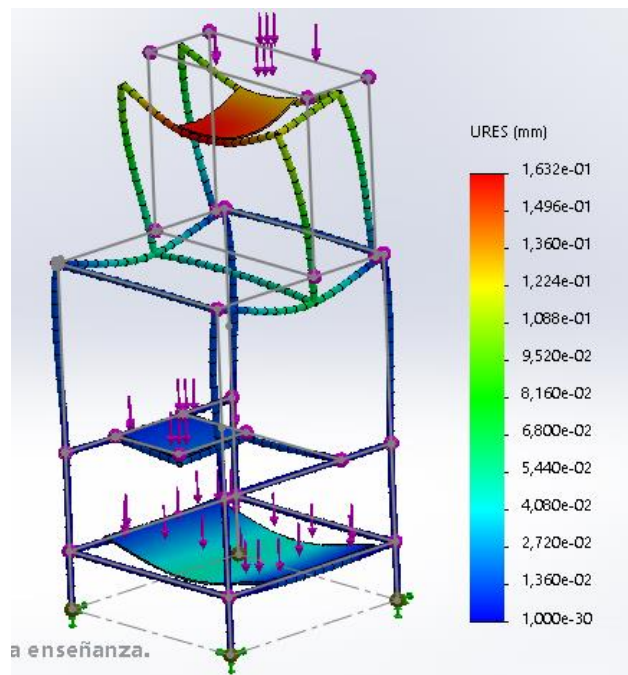
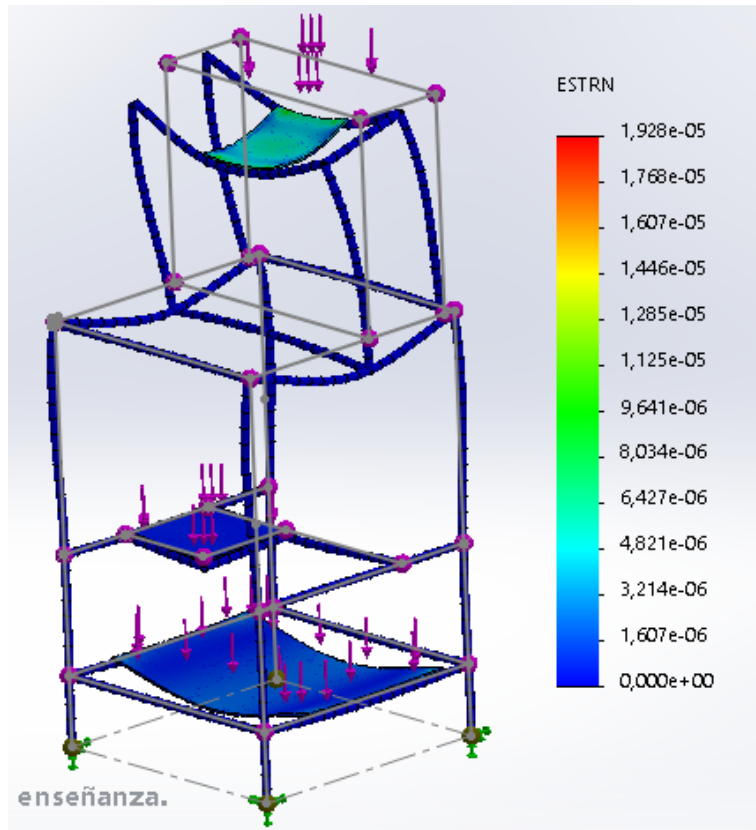


Figura 23.

Análisis estático, estudio de Deformación unitaria.



Al ser tan pequeños los resultados de los estudios estáticos la herramienta SolidWorks exagera de manera grafica para ilustrar de alguna forma los resultados, sin embargo, se puede observar en las escalas de colores los respectivos resultados numéricos que se obtuvieron en las diferentes zonas de la estructura, dando como resultado una deformación y desplazamiento unitarios bajos respecto de la carga a la que es sometida.

4.4.2 Diseño de Hardware

Para el diseño de los tres subsistemas mencionados en la figura 14 y según la selección de componentes se enumeran los elementos que hacen parte del hardware en la siguiente tabla.

Tabla 8.*Elementos para el sistema de Hardware.*

Elemento	Cantidad	Subsistema
Sensor de ultrasonido HC-SR04	2	Control
Modulo driver L298N	2	Control
Caudalímetro FS300A	1	Control
Arduino UNO	1	Control
Tarjeta PCB	1	Control
Bombas RS-360SH	4	Operación
Servomotor MG 996R	2	Control
Fuente 12V	1	Potencia eléctrica

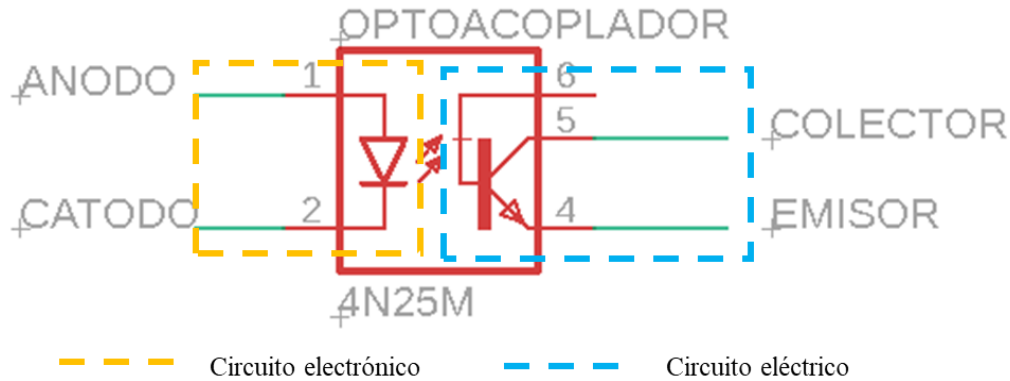
Nota. La tabla presenta la identificación de cada componente eléctrico u electrónico a su respectivo subsistema.

El subsistema de control cuenta con dos circuitos integrados; el circuito electrónico de control y el circuito eléctrico de potencia. Para el circuito de control el microcontrolador como se menciona es el Arduino UNO que cuenta con rango de tensión de entrada de 3V a 5V.

Para la comunicación de los circuitos involucrados y debido a que cada uno maneja un voltaje diferente, se incluye un optoacoplador cuya función es aislar dichos circuitos sin perder la comunicación. El uso del optoacoplador puede evitar o disminuir el ruido en las señales de los sensores entregando una lectura más precisa, así como dar mayor seguridad en el circuito al separar la carga eléctrica de la carga electrónica de control.

Figura 24.

Esquemático de optoacoplador 4N25M.



Nota. Adaptado de EAGLE 9.6.2, 2023.

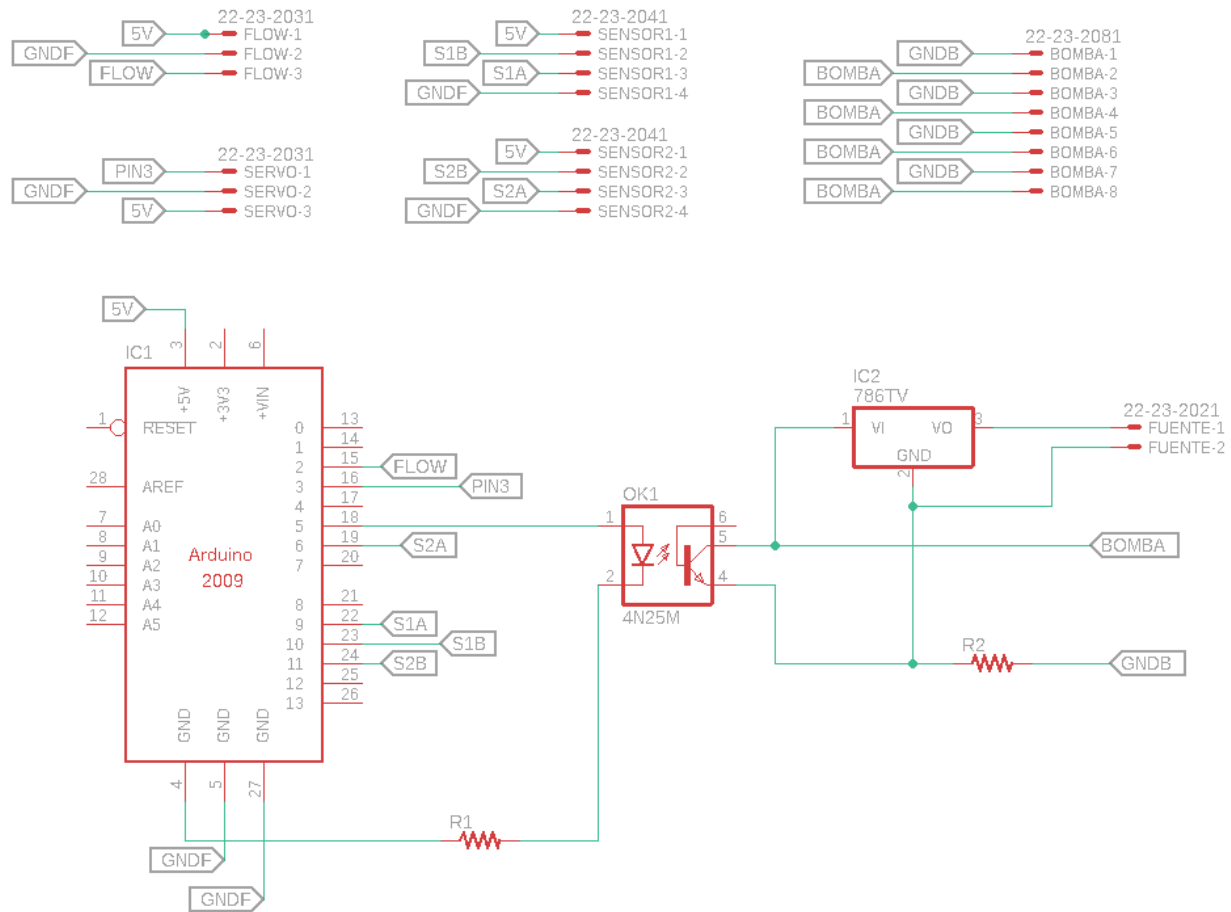
Se incluye dentro del circuito eléctrico de potencia un regulador de voltaje, debido a las variaciones de línea que se puedan presentar. Su función consiste en la limitación de corriente interna y protección del área de operación (sistema de bombeo y driver) manteniendo una salida de voltaje continua.

Por otro lado, la conexión de bombas en paralelo para bombas idénticas asegura una mayor entrega de caudal al sistema. El caudal resultante y entregado a los tanques será entonces la suma de los caudales individuales de cada bomba, de este modo como las bombas estarán conectadas en paralelo pueden compartir una misma tierra.

Una vez se concluyen las conexiones de salidas y entradas del microcontrolador Arduino UNO y demás componentes, se diseña la placa o tarjeta PCB mediante el uso de la herramienta EAGLE 9.6.2 compatible para Arduino, que cuenta con múltiples librerías y complementos para elementos electrónicos. De esta herramienta se extrae el modelo esquemático del módulo completo de control.

Figura 25.

Esquemático completo para el módulo de control.



Nota. Adaptado de EAGLE 9.6.2, 2023

4.4.3 Diseño del software.

El procesador principal del sistema como se ha mencionado es el microcontrolador Arduino UNO, que además de ser una parte del subsistema del hardware trabaja en un entorno con software abierto. El lenguaje de programación al que se encuentra anclado está dentro del entorno de MATLAB Simulink, que proporciona librerías compatibles con el microcontrolador, amplia capacidad de almacenamiento y toma de datos como demás herramientas y complementos útiles para desarrollar el ambiente final de operación del software de control PID. La interfaz consiste

básicamente en digitalizar las señales que son consideradas dentro del sistema como entradas o aquellas que requieren manipulación para obtener y registrar los cambios que serán considerados salidas para ser interpretadas, visualizadas y tener control sobre el proceso.

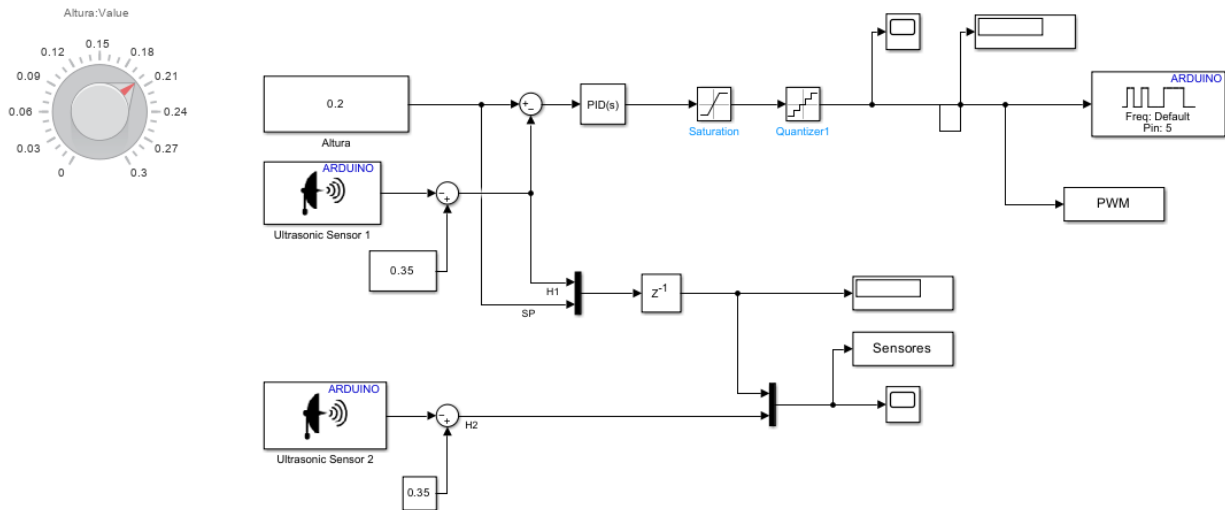
Simulink permite la adaptación para Arduino desde sus librerías y la comunicación con el microcontrolador desde el uso de complementos, esta comunicación se realiza por bloques para adquisición de señales analógicas, así como bloques complementarios para operación, visualización y almacenamiento de datos. La naturaleza de los bloques para adquisición o entrada de datos se configura según corresponda la naturaleza de las señales que se involucran en el proceso de control, también es importante considerar la calidad de lectura de las señales de cada componente. Por otro lado, para la identificación y resolución de las variables que hacen parte del modelo PID del proceso se recurre al entorno propio de MATLAB.

4.5 Pruebas de estabilización

El programa por el que se obtienen y guardan los datos de las pruebas realizadas en la planta real se desarrolla en el entorno de Simulink MATLAB y hace parte de todo el diseño del software previamente expuesto.

Figura 26.

Diagrama de bloques para obtención de datos de estabilización.

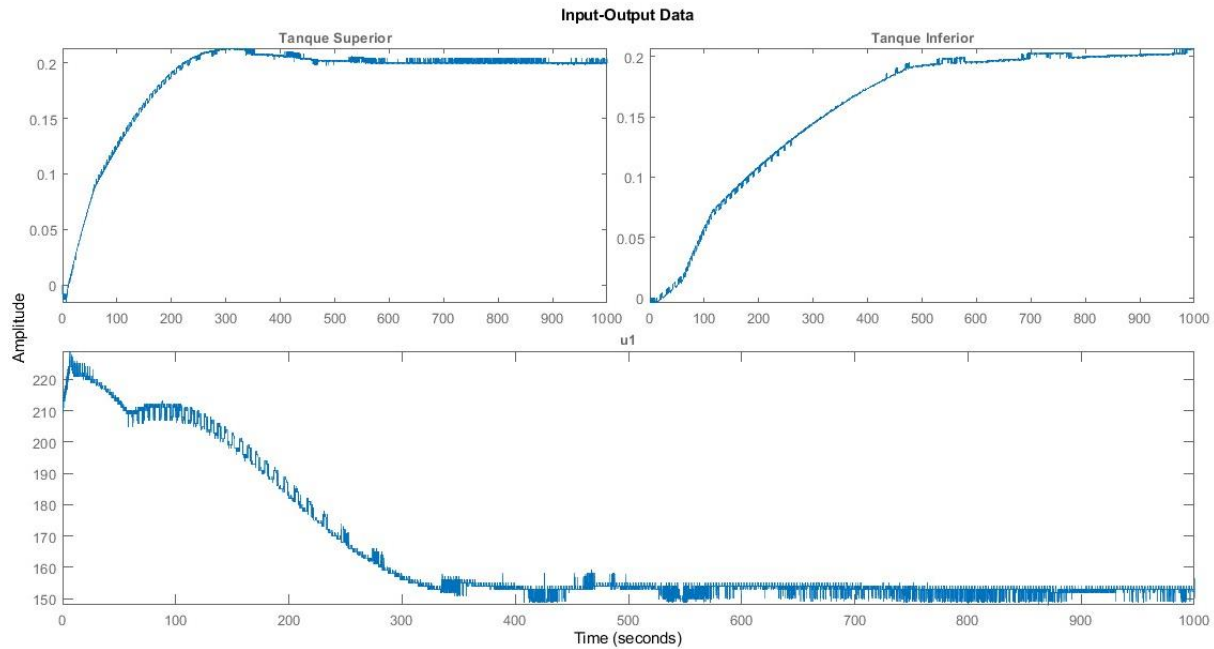


Nota. La figura muestra el diagrama de bloques empleado para el uso de pruebas de estabilización en la planta, donde se consideran particularmente la lectura de los sensores para el nivel de los tanques y la señal de PWM entregada a las bombas por medio del módulo driver. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

El objetivo de este apartado es obtener y guardar datos de medidas de altura para los dos tanques cuando alcanzan un punto de equilibrio, es decir las alturas se mantienen a lo largo del tiempo, adicionalmente se capturan los datos de variación de PWM como se muestra a continuación.

Figura 27.

Datos de estabilización de la planta.



Nota. Datos obtenidos de la estabilización de la planta para ambos tanques alrededor de los 0.2 m respecto a la variación del PWM presentada en la figura inferior. Adaptado de MATLAB R2022b, 2023.

4.6 Parámetros de operación

4.6.1 Caracterización de los actuadores.

Los actuadores dentro de cualquier sistema de control son los encargados de ejercer los cambios dentro de la planta que afectan a la variable de interés o variable a controlar, dentro de los modelos de control PID estos cambios son ejecutados respecto a las señales que sean recibidas y el Setpoint asignado.

Dentro del modelo de control de nivel y para este caso particular, se clasifican como actuadores a las bombas conectadas en paralelo. Para conocer los rangos de operación se realizan

pruebas de funcionamiento para conocer el comportamiento de caudal entregado respecto de PWM. Los datos fueron adquiridos por programación de Arduino y fue necesario implementar el diseño de un filtro pasa baja Butterworth (Apéndice D).

Tabla 9.

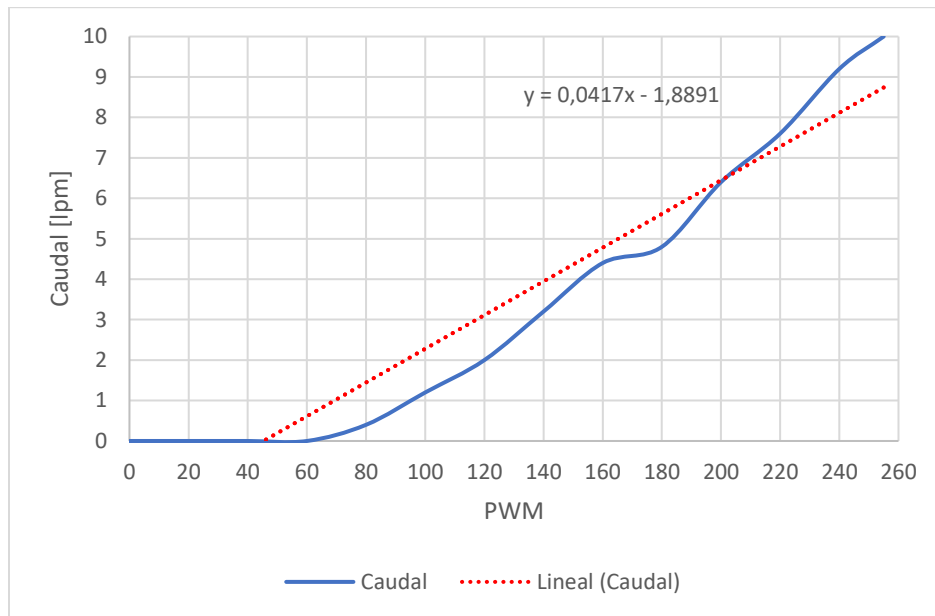
Datos del rango de caudal para el sistema de bombas.

PWM	Caudal [lpm]
0	0,00
10	0,00
20	0,00
40	0,00
60	0,00
80	0,69
100	2,96
120	4,32
140	7,16
160	10,83
180	11,14
200	13,12
220	18,31
255	19,73

Nota. La tabla muestra los datos obtenidos por lectura de Arduino para el sensor de caudal, estos datos fueron procesados respecto al factor de conversión para obtenerlos en litros por minuto.

Figura 28.

Comportamiento grafico del rango de operación de las bombas en paralelo.



Nota. El grafico representa el comportamiento del caudal entregado al sistema respecto del aumento de PWM asignado y su línea de tendencia.

Con los datos obtenidos es posible linealizar el comportamiento de los actuadores con relación al PWM entregado como se muestra en la figura y teniendo en cuenta que la zona de operación de las bombas se encuentra en un rango de 80 a 255 PWM, esto quiere decir que para los actuadores es importante considerar un rango de zona muerta de 0 a 80 PWM, esto es de bastante interés de aquí en adelante para los modelos matemáticos.

$$q_{bp} = k_m * u$$

Donde:

q_{bp} : Caudal entregado al sistema por las bombas.

k_m : Valor constante de la pendiente de la curva.

u : Pwm entregado a las bombas en paralelo (u).

Por lo tanto, el valor de la pendiente de la ecuación de comportamiento linealizada para los actuadores será usada más adelante como:

$$k_m = 0,04 \frac{l}{min} * \frac{1 m^3}{1000 l} * \frac{1 min}{60 s} = 6,66 \times 10^{-7} m^3/s$$

4.6.2 Caracterización de la perturbación

La perturbación en los sistemas de control suele darse de manera interna, es decir que corresponde a una señal dentro de la planta que puede afectar las señales de salida. Dentro del sistema de control de nivel y en este caso en particular la perturbación presente proviene del grado de apertura de válvula del tanque superior (1), es decir el caudal de salida y que es entregado al tanque inferior (2), para conocer el rango de perturbación se realizan pruebas del comportamiento de salida de caudal en relación con el grado de apertura de la servo-válvula, teniendo en cuenta que el rango de apertura esta entre 0° a 90° grado, siendo 0° totalmente abierta y 90° totalmente cerrada.

Figura 29.

Servo-válvula adaptada para el sistema.

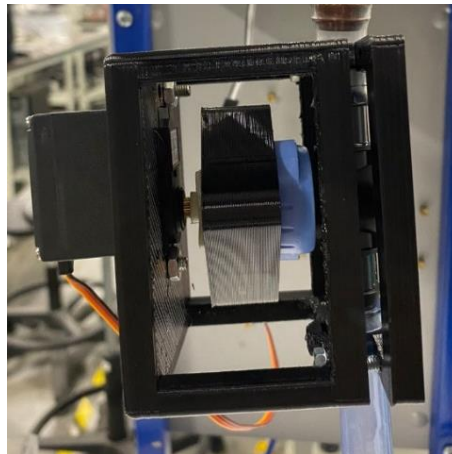
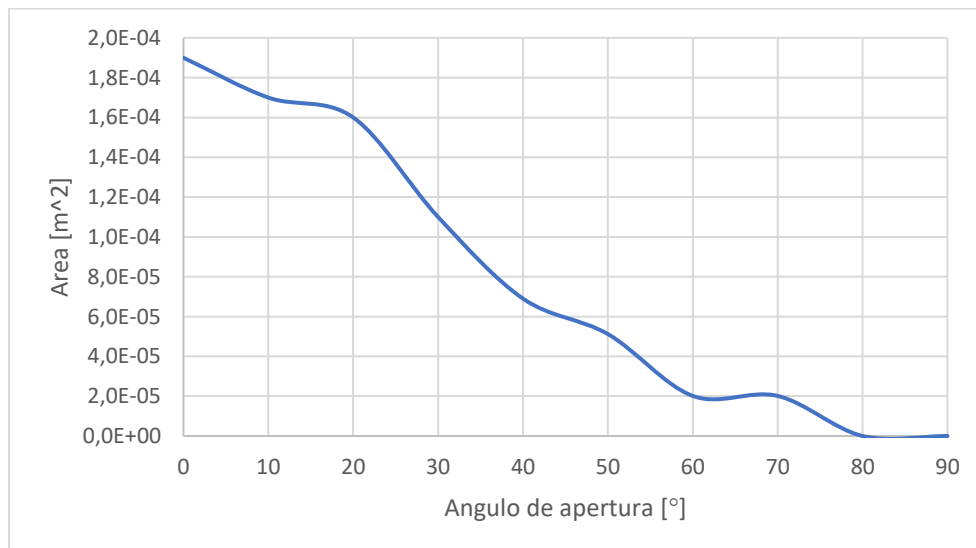


Tabla 10.*Datos de rango de apertura de la servo-válvula.*

Angulo [°]	Area [m ²]
90	0,00
80	0,00
70	2.01×10^{-5}
60	2.01×10^{-5}
50	5.12×10^{-5}
40	6.90×10^{-5}
30	1.10×10^{-4}
20	1.60×10^{-4}
10	1.70×10^{-4}
0	1.90×10^{-4}

Figura 30.*Rango de apertura de la válvula.*

Nota. El gráfico representa el comportamiento del caudal entregado al sistema respecto del aumento del grado de apertura asignado, así como su línea de tendencia.

Para obtener la validación del modelo de perturbación de la válvula y el parámetro de resistencia se realiza el cálculo del área transversal de la salida por teorema de Torricelli.

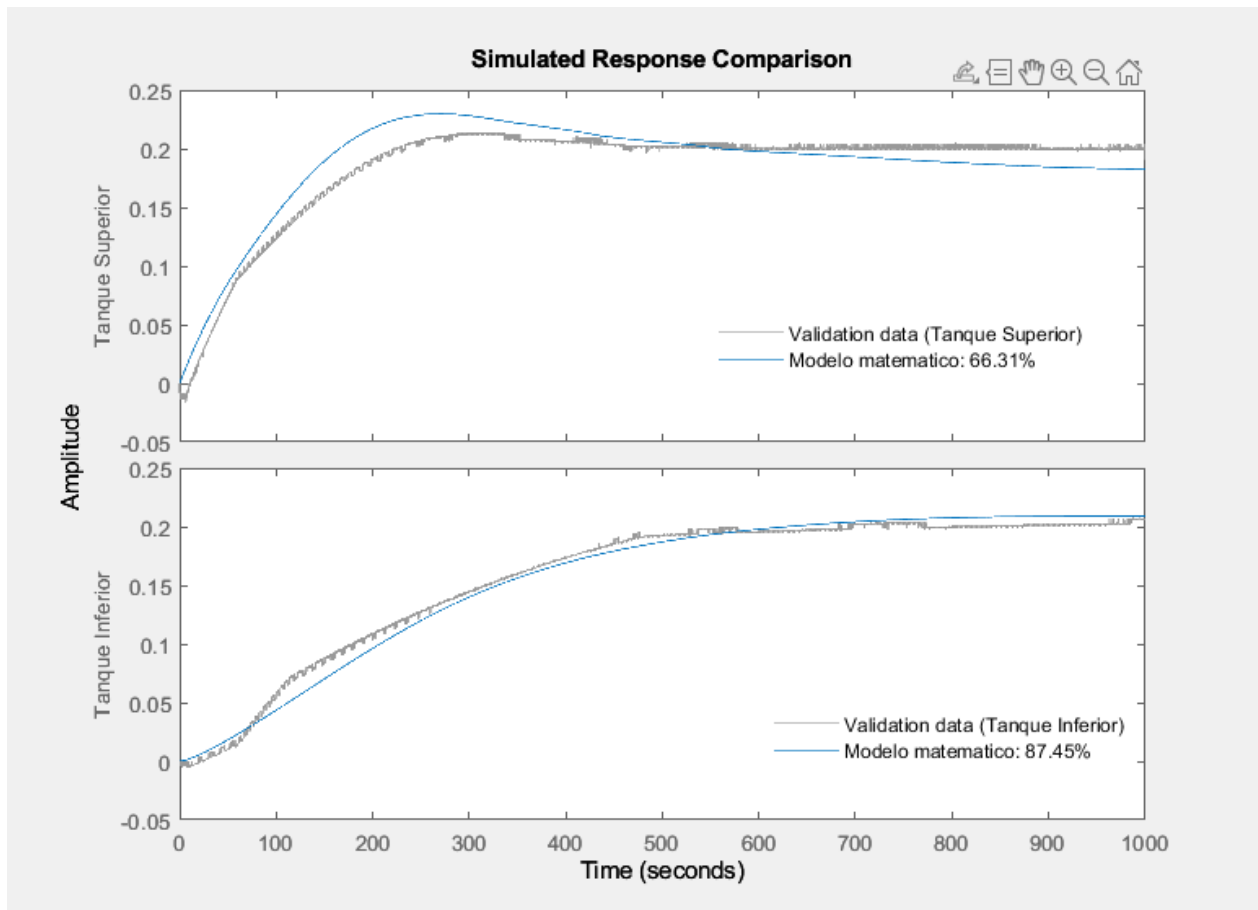
$$t = \sqrt{\frac{2(h_o - h_f)}{g}} \left(\frac{A_T^2}{A_v^2} \right)$$

4.6.3 Validación de caja gris.

El modelo no lineal de la planta con dinámica acoplada de dos tanques hidráulicos se soporta en base a modelos para sistemas de nivel en líquido consultados en la literatura como se muestra en el apéndice B y descrito en el índice 4.3. Los datos de las pruebas obtenidas de estabilización para la planta son cargados a la herramienta Matlab con un total de 13342 muestras de entrada (Pwm) y salida (Alturas) con tiempo de muestreo de 0.075 [seg]. Estas muestras son procesadas con parámetros iniciales asignados correspondientes a las caracterizaciones realizadas, además se establece el orden y los estados iniciales del modelo, de este modo es posible que la herramienta calcule la salida en cada posición en base a dichos argumentos, y mediante un solucionador de ecuaciones diferenciales (Runge-Kutta 45) entregue como resultado una estimación inicial. Para lograr un alto porcentaje de validación, se realiza un nuevo proceso de estimación mediante cálculos iterativos para el modelo, con un total de 15 iteraciones que arrojo como resultados nuevos parámetros con un ajuste de validación mayor. Lo descrito plantea la validación de parámetros para el modelo no lineal de caja gris (Apéndice C) que consiste en conclusión en hallar los parámetros que se establecen como desconocidos dentro de la función y que logran describir la planta de manera matemáticamente satisfactoria.

Figura 31.

Respuesta de validación de parámetros para el sistema



Nota. La figura muestra la ventana luego de que el proceso de iteración que realiza MATLAB ha terminado con la respuesta más favorable. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Como el resultado de validación de datos es superior al 60% en ambos tanques, es prudente trabajar a partir de ahora con los valores de parámetros obtenidos para el modelo matemático de tipo no lineal.

Tabla 11.*Parámetros del modelo matemático de la planta.*

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Capacitancia Tanque 1	A1	0.04	m^2
Capacitancia Tanque 2	A2	0.04	m^2
Resistencia válvula 1	R1	2.6×10^{-5}	m^2
Resistencia Válvula 2	R2	2.4×10^{-5}	m^2
Linealización de bombas	Km	6.6×10^{-7}	m^3/s

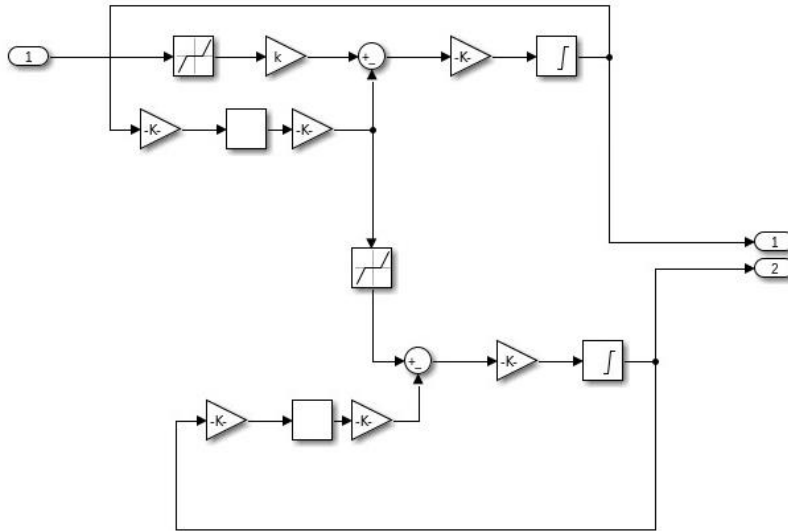
Nota. La tabla anterior presenta los resultados obtenidos del proceso de iteración que hacen posible la validación del modelo matemático.

4.6.4 Validación de parámetros para el modelo no lineal

Con base en el modelo no lineal de la planta representado en forma de variables de estado en simulink, es posible validar el modelo matemático no lineal obtenido de la parametrización en comparación directa con la toma de datos, esto representa una forma adicional de corroborar que el modelo planteado se ajusta a la planta.

Figura 32.

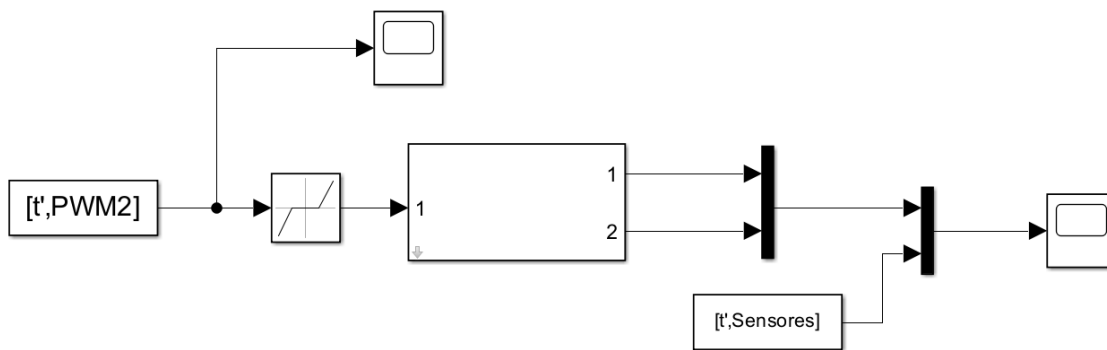
Planta virtual del modelo matemático no lineal.



Nota. La figura anterior representa mediante Simulink el modelo matemático no lineal implementado. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Figura 33.

Diagrama de bloques para validación del modelo no lineal.

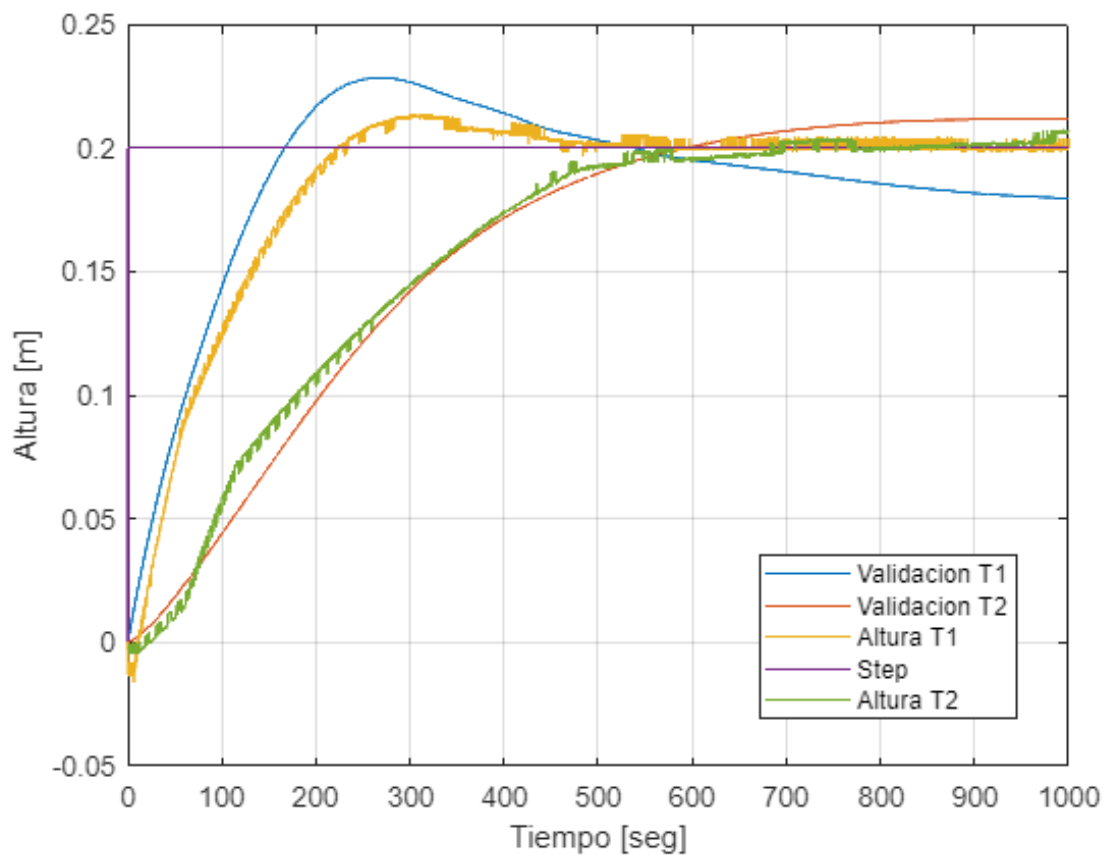


Nota. La figura anterior representa mediante diagrama de bloques la entrada y salida de datos para validación de parámetros incluidos en el subsistema no lineal anterior. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Con base en los parámetros obtenidos de validación de caja gris, los resultados de la tabla 10 son cargados para el subsistema mostrado, una vez ejecutada la simulación se presenta el comportamiento del modelo respecto de los datos cargados, de esta forma se corrobora que el modelo matemático ya parametrizado efectivamente es válido para la planta real.

Figura 34.

Respuesta de validación de parámetros del modelo no lineal.



Nota. La figura anterior muestra la curva de estabilización de las alturas de los tanques, comparadas con la curva de parámetros para el modelo no lineal. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

4.7 Linealización de la planta

Para la linealización de la planta es necesario recurrir a las series de Taylor y a las ecuaciones (6) y (7) del sistema, primero se obtienen las ecuaciones que serán parte de la matriz de estados del sistema:

$$\dot{h}_1 = \frac{\partial}{\partial h} = \left(-\frac{R_1}{A_1} \sqrt{\frac{2g}{h_1}} \right) h_1 + \frac{k_m}{A_1} u$$

$$\dot{h}_1 = \alpha h_1 + \beta u$$

$$\dot{h}_2 = \frac{\partial}{\partial h} = \left(\frac{1}{2} \frac{k_m}{A_1} \sqrt{\frac{2g}{h_1}} \right) h_1 + \left(\frac{1}{2} \frac{k_m}{A_2} \sqrt{\frac{2g}{h_2}} \right) h_2$$

$$\dot{h}_2 = \frac{\partial}{\partial h} = \theta h_1 + \varphi h_2$$

Tras el procesamiento de datos de las matrices de estado, mediante el código Matlab expuesto en el apéndice F, se obtienen las ecuaciones de transferencia para los tanques superior e inferior respectivamente evaluadas en un punto de equilibrio $h_1 = 0.2[m]$.

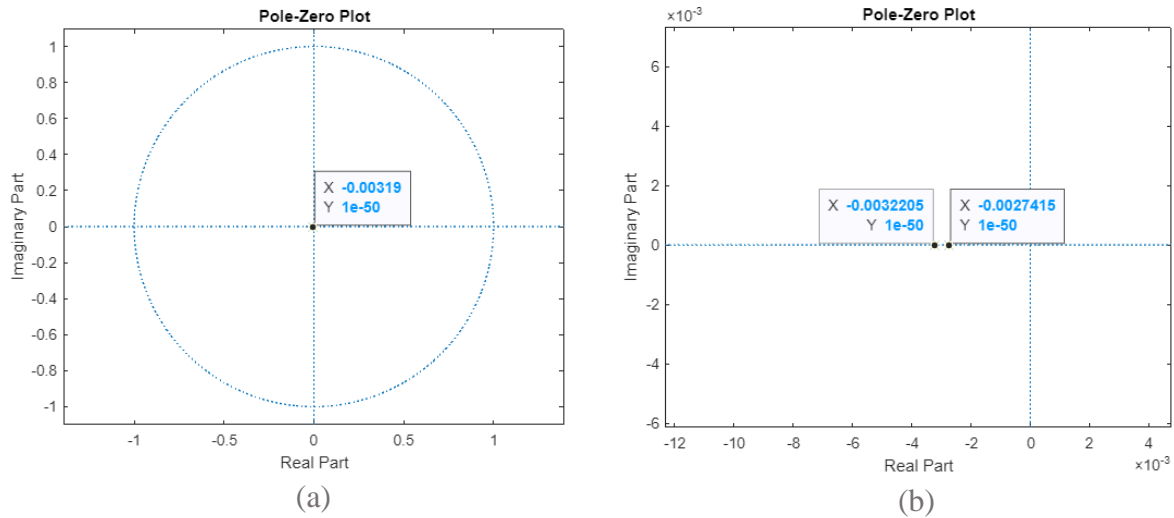
$$Tf_1 = \frac{1.65 \times 10^{-5}}{s + 0.003219} \quad (8)$$

$$Tf_2 = \frac{5.311 \times 10^{-8}}{s^2 + 0.005962s + 8.829 \times 10^{-6}} \quad (9)$$

La ecuación linealizada para el tanque superior es de primer orden, mientras que para el tanque inferior es de orden dos. La primera función de transferencia no tiene ceros infinitos, y en cambio poseen un único polo en el plano imaginario, mientras que la ecuación dos posee dos polos y ningún cero infinito, por lo cual ambas funciones lineales son estables según criterio de Routh.

Figura 35.

Ubicación de polos de funciones linealizadas.



Nota. La figura presenta los polos de las funciones transferencia linealizadas del tanque superior (a), así como del tanque inferior (b), todos los polos se ubican sobre la región izquierda del plano imaginario, esto concluye la estabilidad del sistema.

4.8 Diseño del controlador PID

4.8.1 Funciones de transferencia por caja negra

Mediante la herramienta System identification de MATLAB, también conocida como sisotool, es posible estimar las ecuaciones de transferencia de la planta para modelo por caja negra, con base en el procesamiento de datos de dominio del tiempo obtenidos de prueba de estabilización.

Tabla 12.

Consideraciones para la estimación de ecuación de transferencia.

Tanque	Datos de entrada	Datos de salida
Tanque 1	PWM	Altura 1

 Tanque 2

Altura 1

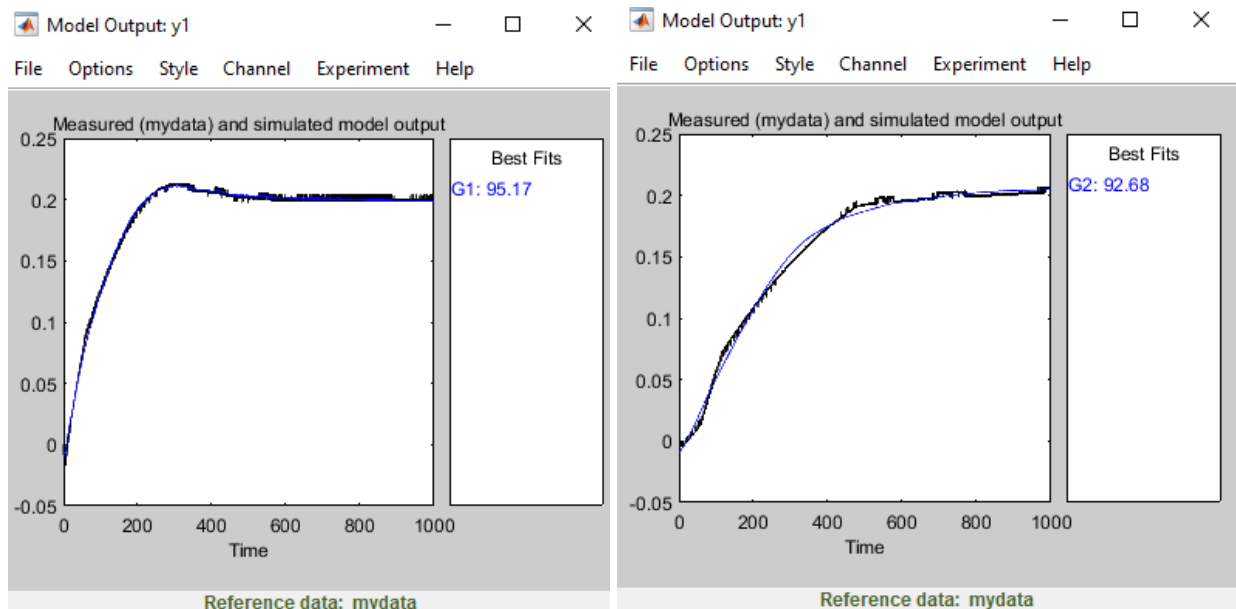
 Altura 2

La configuración dentro de la herramienta System Identification, parte desde la carga de datos iniciales según las consideraciones de la tabla anterior, donde para una primera estimación de ecuación de transferencia del tanque superior se agregan los datos de PWM como entrada y los datos de lectura del sensor del respectivo tanque como salida, mientras que para estimar la ecuación de transferencia del segundo tanque los datos de entrada esta vez serán las altura del tanque superior y los de salida la altura inferior.

en cada configuración se asignan a la estimación de la ecuación de transferencia dos polos y un cero para tiempo continuo, esto limita que los ceros esten en el plano izquierdo de s y que por lo tanto el sistema sea estable.

Figura 36.

Resultado de estimación de ecuación de transferencia de cada tanque.



Nota. Respuesta de validación de datos para la ecuación de transferencia con un ajuste de 95.17% y 92.68% para el tanque 1 y el tanque 2, respetivamente. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

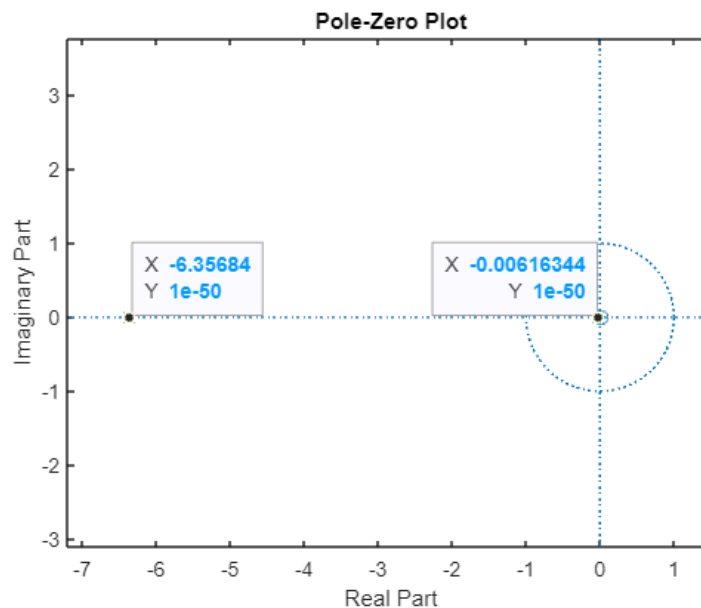
Como el ajuste de validación de datos para la ecuación de transferencia es óptimo; mayor al 90%, es posible emplear los resultados de estos modelos de ecuación para la sintonización del controlador. Las características de los modelos de ecuación de transferencia

$$G_1(s) = \frac{-0.002219s + 5.097 \times 10^{-5}}{s^2 + 6.363s + 0.03918} \quad (10)$$

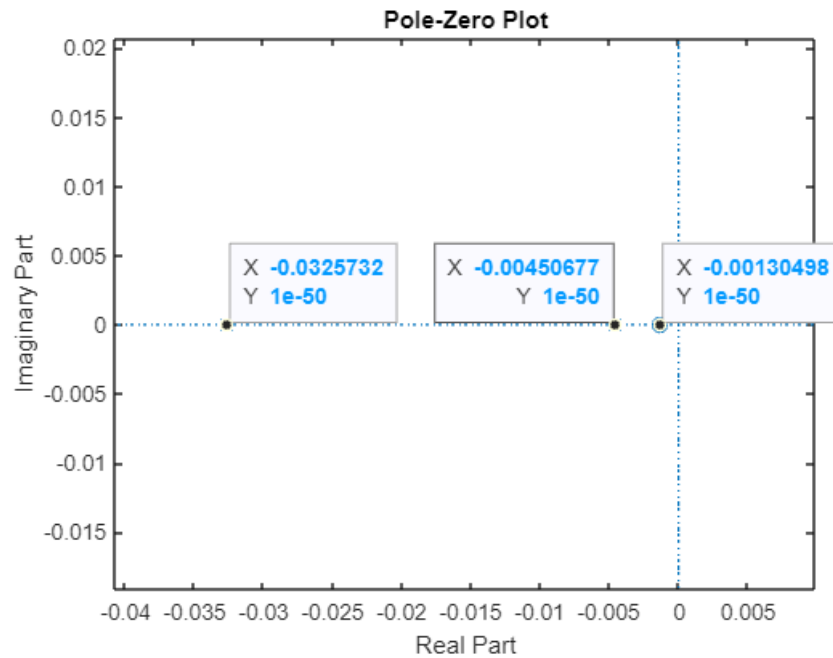
$$G_2(s) = \frac{0.1164s + 0.0001519}{s^2 + 0.03708s + 0.0001468} \quad (11)$$

Figura 37.

Polos y ceros de ecuación G1



Nota. La función de transferencia según modelo de caja negra (10) posee dos polos en el semiplano izquierdo s , por lo cual el sistema en esta etapa es estable.

Figura 38.*Polos y ceros de ecuación G2*

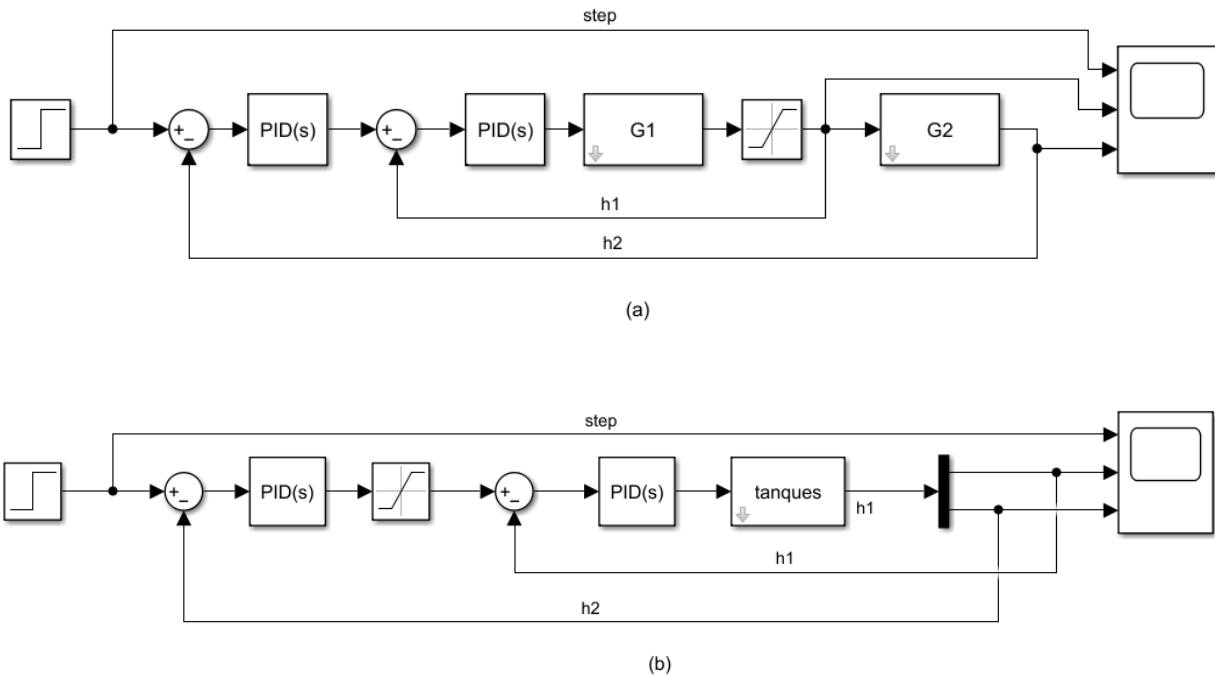
Nota. La función de transferencia según modelo de caja negra (11) posee dos polos en el semiplano izquierdo s , por lo cual el sistema en esta etapa es estable.

4.8.2 Sintonización de los controladores

Para la sintonización total de la planta primero se realiza una simulación con base en las ecuaciones de transferencia halladas tanto por el modelo de caja negra como por el modelo de caja gris y que describen el comportamiento del sistema.

Figura 39.

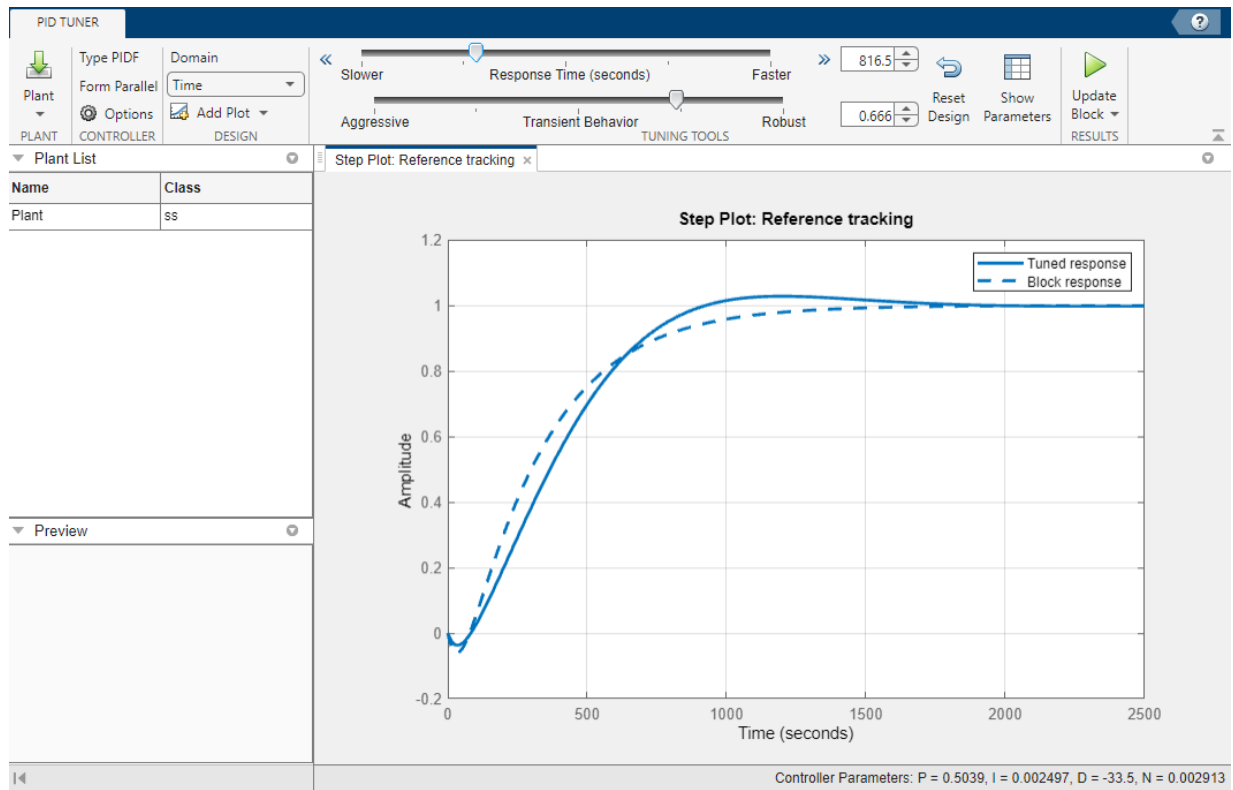
Modelo de simulación de control en cascada para el sistema.



Nota. La figura (a) representa el diagrama de bloques para simulación de control según modelo de caja negra, mientras que la figura (b) para el modelo de caja gris. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Considerando ya la estructura de los controladores se define primero la sintonización del proceso secundario o rápido; en este caso el llenado del tanque superior y una vez ajustado es posible sintonizar el PID del proceso primario o lento; llenado de tanque inferior.

Inicialmente se considera el diseño del controlador como tipo cascada, asegurando de esta manera la realimentación de las alturas de cada tanque. Para la sintonización de los controladores PID en el modelo caja negra, se realiza por medio de PID Tuner ya que este es capaz de proporcionar una repuesta de bucle rápido respecto de un tiempo de estabilización y grado de robustes ajustable.

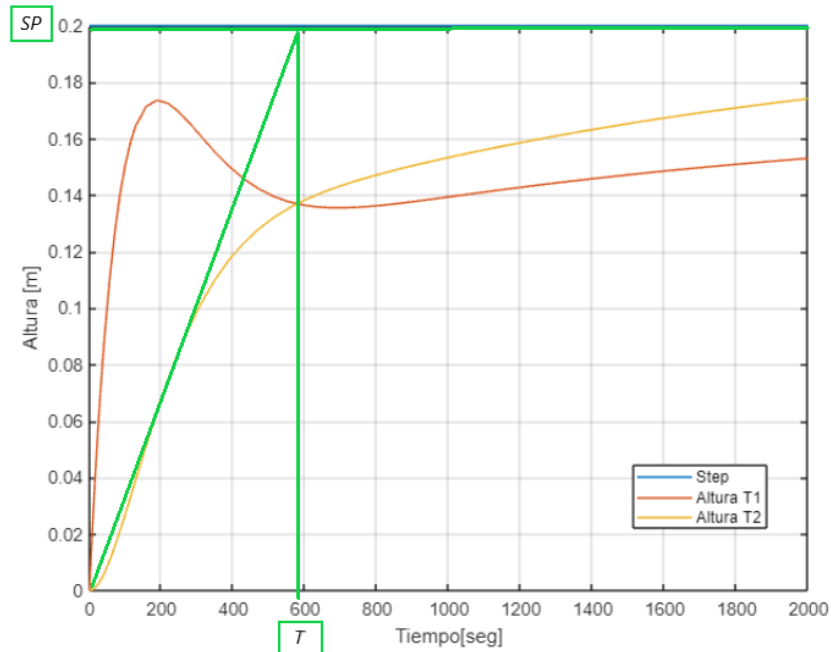
Figura 40.*Entrono de sintonización por PID Tuner*

Nota. Se cargan las funciones de transferencia que hacen parte del control en cascada siendo G1 o Tf1 la acción rápida y G2 o Tf2 la acción corta. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Para la sintonización de las funciones de transferencia del modelo de caja gris se analiza la respuesta escalón unitario de la planta a cierto set point con valores de ganancias iniciales en los controladores para sintonizar por el primer método de Ziegler-Nichols.

Figura 41.

Ejemplo de sintonización Ziegler-Nichols para modelo de caja gris.

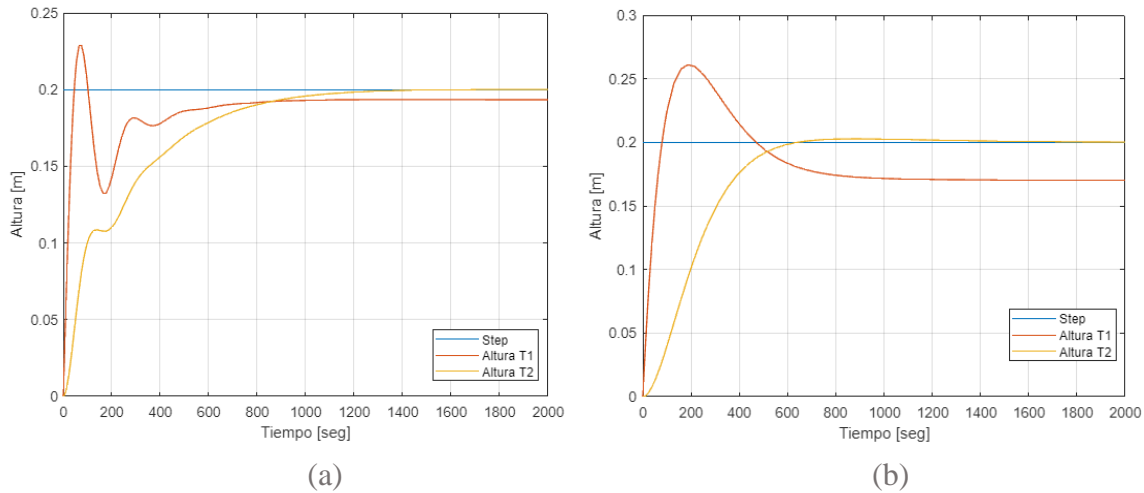


Nota. La figura representa un ejemplo de sintonización con Ziegler-Nichols para el modelo de caja gris donde por el primer método se halla las ganancias de los controladores. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Dentro del modelo de simulación de control en cascada de la figura 41 se cargan las ganancias para cada controlador obtenidas de la sintonización con respuesta escalón favorable y se simula el comportamiento de la planta respecto de las funciones de transferencia implicadas para valores de set-point entre 0.1 y 0.3 m.

Figura 42.

Respuesta escalón de simulación de los modelos matemáticos.



Nota. La figura (a) representa el comportamiento del modelo caja negra, mientras que la figura (b) el comportamiento del modelo caja gris, ambas con setpoint de 0.2[m]. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

5. Resultados

5.1 Construcción del banco de pruebas

La construcción del banco de pruebas se hizo teniendo en cuenta la validación del modelo de simulación, de esta manera el diseño tuvo en cuenta el tipo de acople y dinámica entre el número de tanques planteados. El análisis estructural realizado en SolidWorks valido por otro lado la estabilidad y funcionalidad del diseño respecto de las condiciones de operación y componentes involucrados.

Dentro de la parte de construcción se incluye el módulo de control, esta parte implicó múltiples pruebas de funcionamiento y conexiones para el diseño del esquema completo de la tarjeta PCB según el esquemático presentado en el índice 4.4.2, una vez construido el banco fue

posible completar la validación del modelo, así como también implementar la simulación planteada del controlador.

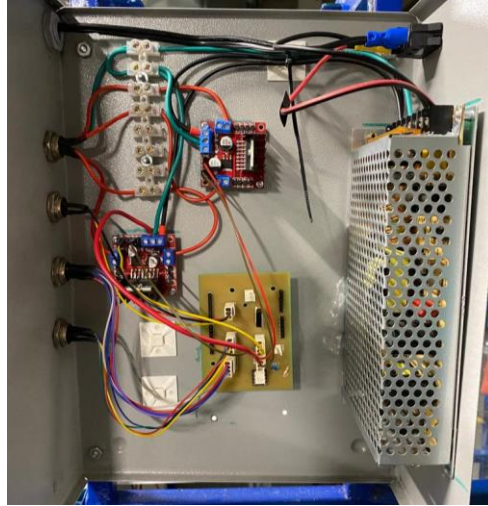
Figura 43.

Sistema dinámico construido.



Figura 44.

Módulo caja de control construido.



5.2 Modelado no lineal del sistema de tanques

El modelo no lineal de la planta inicialmente fue validado con los resultados de parámetros de caracterización de los actuadores, perturbación y demás características conocidas de la planta, con dichos argumentos se realizó entonces la primera estimación de parámetros para el modelo matemático que arrojó el siguiente resultado.

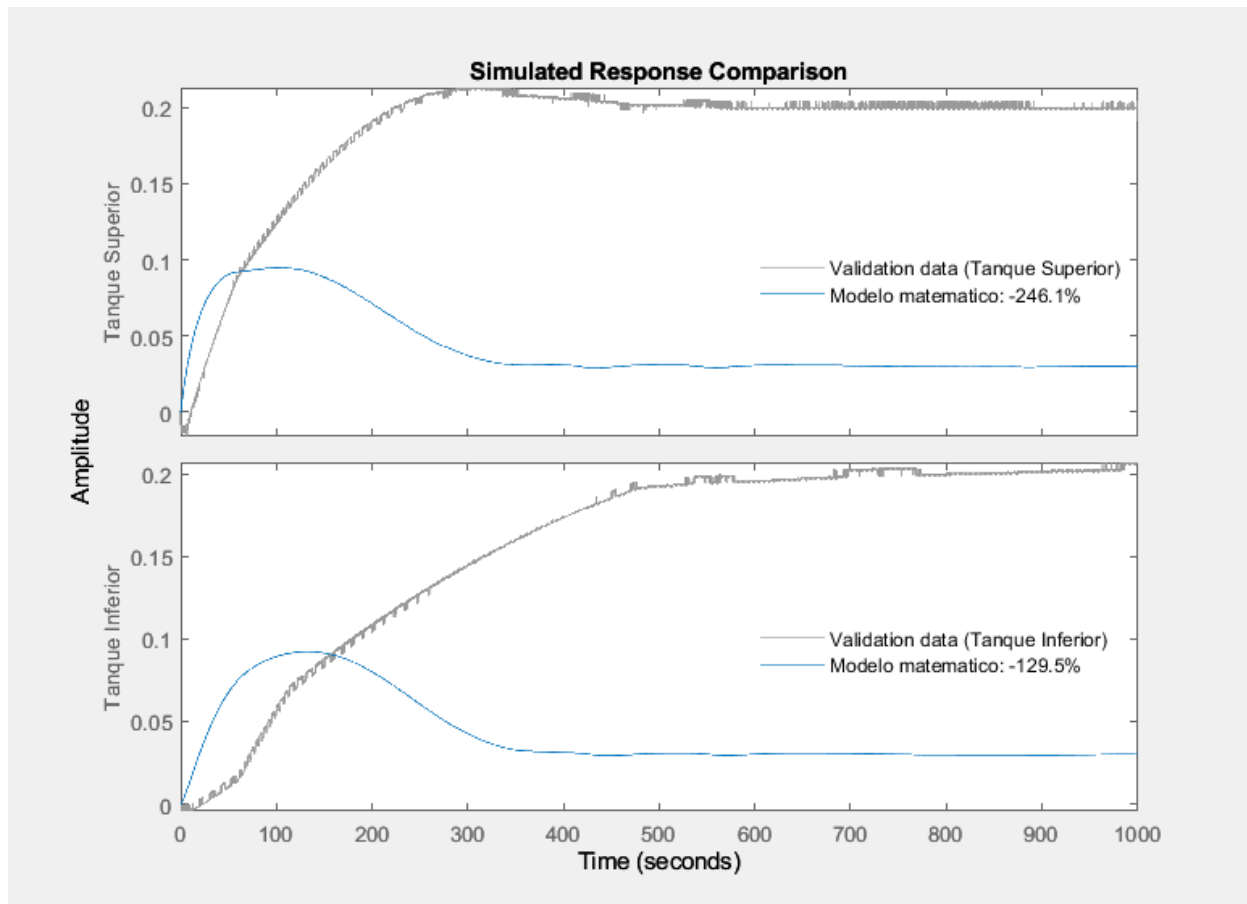
Tabla 13.

Parámetros de estimación inicial.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Capacitancia Tanque 1	A1	0.04	m^2
Capacitancia Tanque 2	A2	0.04	m^2
Resistencia válvula 1	R1	1.9×10^{-4}	m^2
Resistencia Válvula 2	R2	1.9×10^{-4}	m^2
Linealización de bombas	Km	6.6×10^{-7}	m^3/s

Figura 45.

Estimación inicial de los parámetros del modelo.



Para obtener un mayor ajuste de respuesta de validación, se realizaron estimaciones e iteraciones con base en el funcionamiento de caja gris; es decir; partiendo de ciertos parámetros conocidos fue posible estimar los valores de parámetros que se ajustan y describen la dinámica de la planta. La nueva respuesta de validación que representa y modela de mejor manera la planta cuenta con los siguientes parámetros.

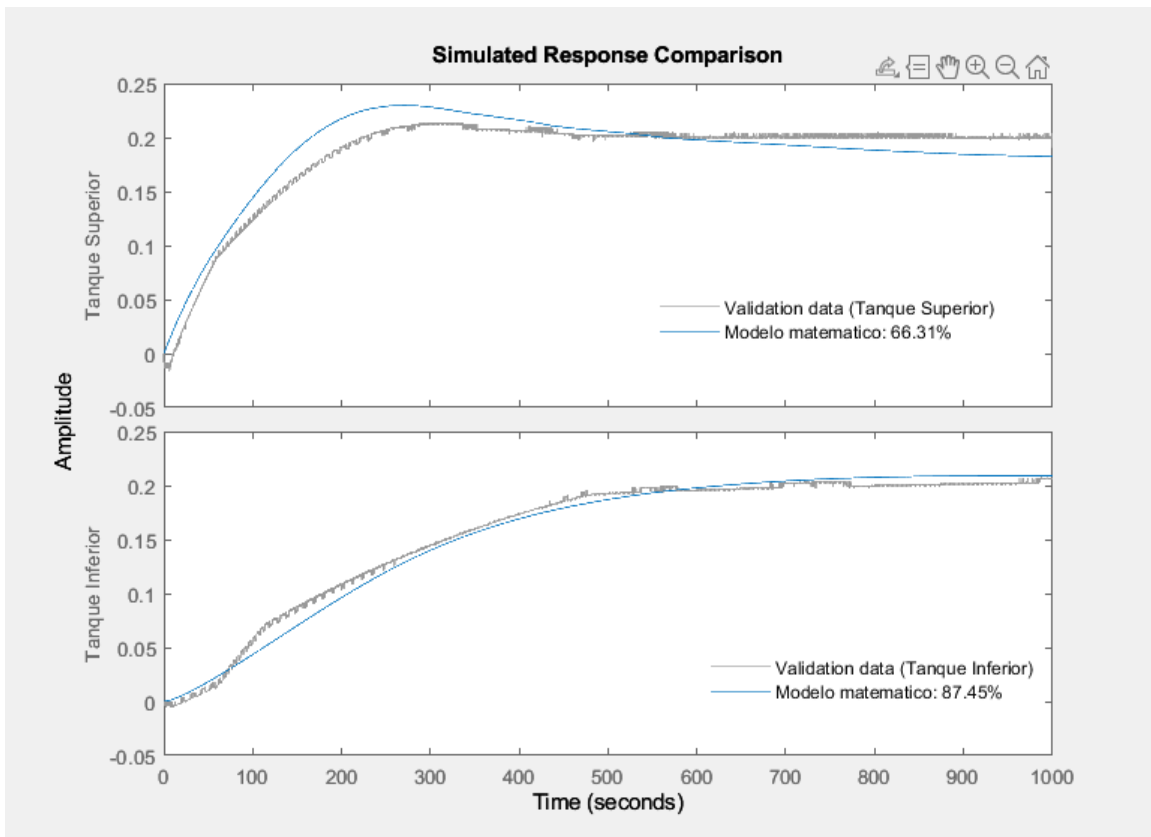
Tabla 14.

Resultados de los parámetros de estimación

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Capacitancia Tanque 1	A1	0.04	m^3
Capacitancia Tanque 2	A2	0.04	m^3
Resistencia válvula 1	R1	2.6×10^{-5}	m^2
Resistencia Válvula 2	R2	2.4×10^{-5}	m^2
Linealización de bombas	Km	6.6×10^{-7}	m^3/s

Figura 46.

Estimación final de los parámetros del modelo.



5.3 Diseño del sistema de control

El diseño de control en cascada se adaptó a los requerimientos de diseño del sistema por lo cual las simulaciones de control se realizaron bajo este criterio y con controladores tipo PID. Las consideraciones de entrada y salida de cada etapa se presentan a continuación.

Tabla 15.

Datos de entrada y salida en cada etapa de control.

Etapa	Entrada	Salida
Etapa 1	PWM	Altura T1
Etapa 2	Altura T1	Altura T2

Para un primer diseño y simulación del sistema de control se linealización las ecuaciones del modelo no lineal, esto se explicó a detalle en el índice 4.7 y se calculó con ayuda de la herramienta Matlab según se muestra en el apéndice E. La sintonización para los controladores PID se realizó por método Ziegler-Nichols.

Tabla 16.

Ecuaciones de transferencia lineales del sistema.

Tanque 1	$Tf_1 = \frac{1.65 \times 10^{-5}}{s + 0.003219}$
Tanque 2	$Tf_2 = \frac{5.311 \times 10^{-8}}{s^2 + 0.005962s + 8.829 \times 10^{-6}}$

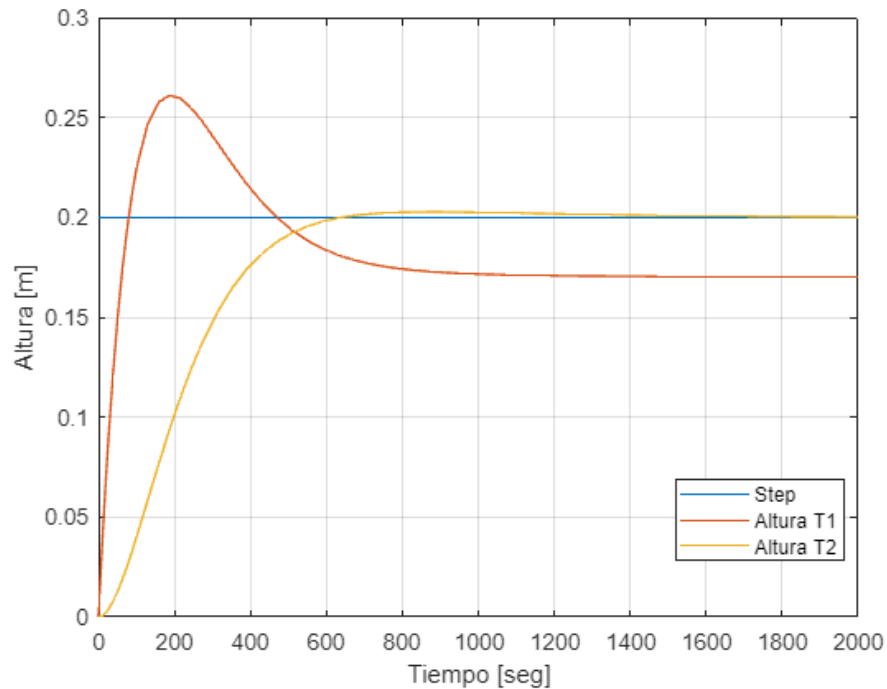
Tabla 17.

Ganancias para los controladores del modelo por caja gris.

Controlador	Kp	Ki	Kd
C1	1.2	0.004	0
C2	1000	5	0

Figura 47.

Respuesta escalón de simulación del modelo por caja gris.



Para un segundo diseño y simulación del sistema de control, se obtuvieron las ecuaciones de caja negra del sistema con ayuda de la herramienta System Identification, este método es ampliamente conocido y fue explicado en el índice 4.8.1, mientras que para la respectiva sintonización de los controladores PID se recurre a la herramienta Tune como se detalló en el índice 4.8.2.

Tabla 18.

Funciones de transferencia por caja negra del sistema.

Tanque 1	$G_1(s) = \frac{-0.002219s + 5.097 \times 10^{-5}}{s^2 + 6.363s + 0.03918}$
Tanque 2	$G_2(s) = \frac{0.1164s + 0.0001519}{s^2 + 0.03708s + 0.0001468}$

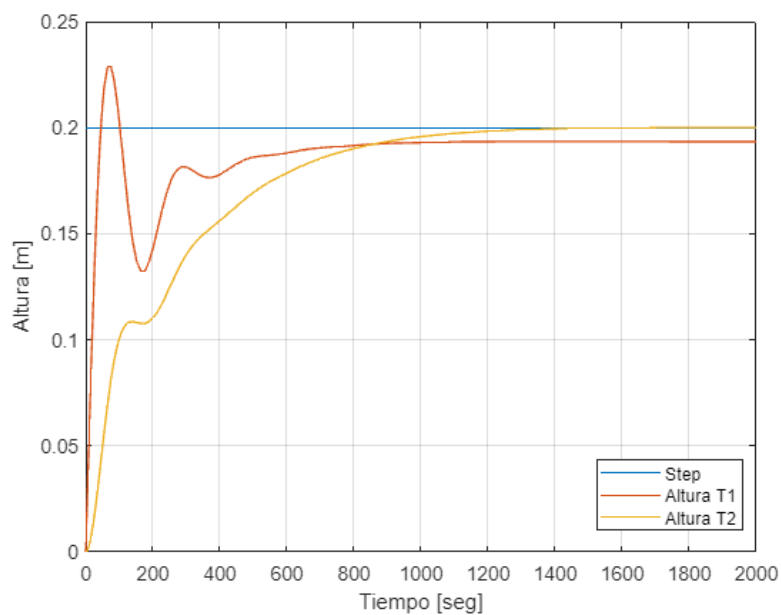
Tabla 19.

Ganancias para los controladores del modelo por caja negra.

Controlador	Kp	Ki	Kd
C1	1.2	0.004	0
C2	1000	5	0

Figura 48.

Respuesta escalón de simulación del modelo por caja negra.

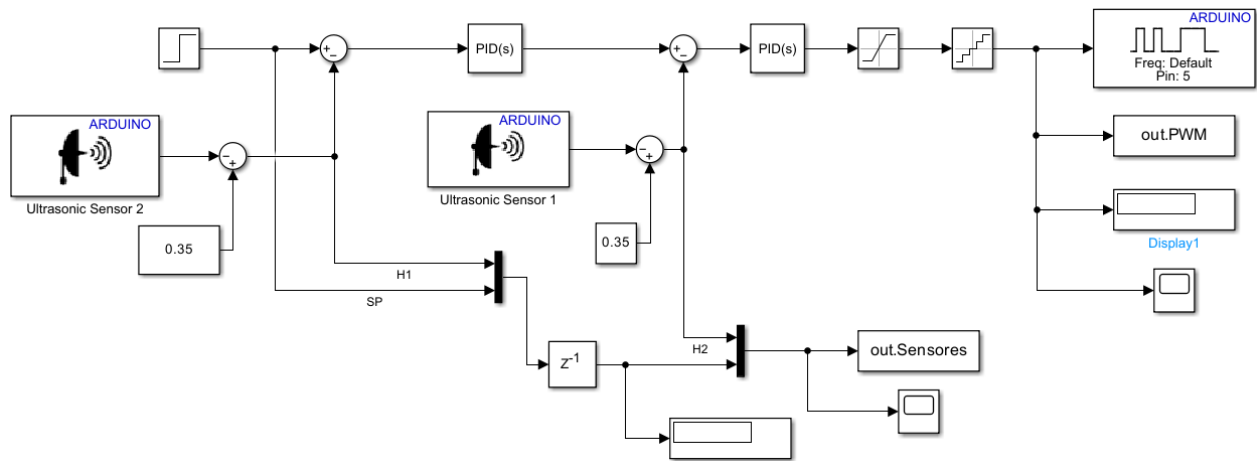


5.4 Respuesta de la planta real.

Los resultados de sintonización de la simulación son empleados en el diagrama de bloques de control de la planta real de la siguiente manera.

Figura 49.

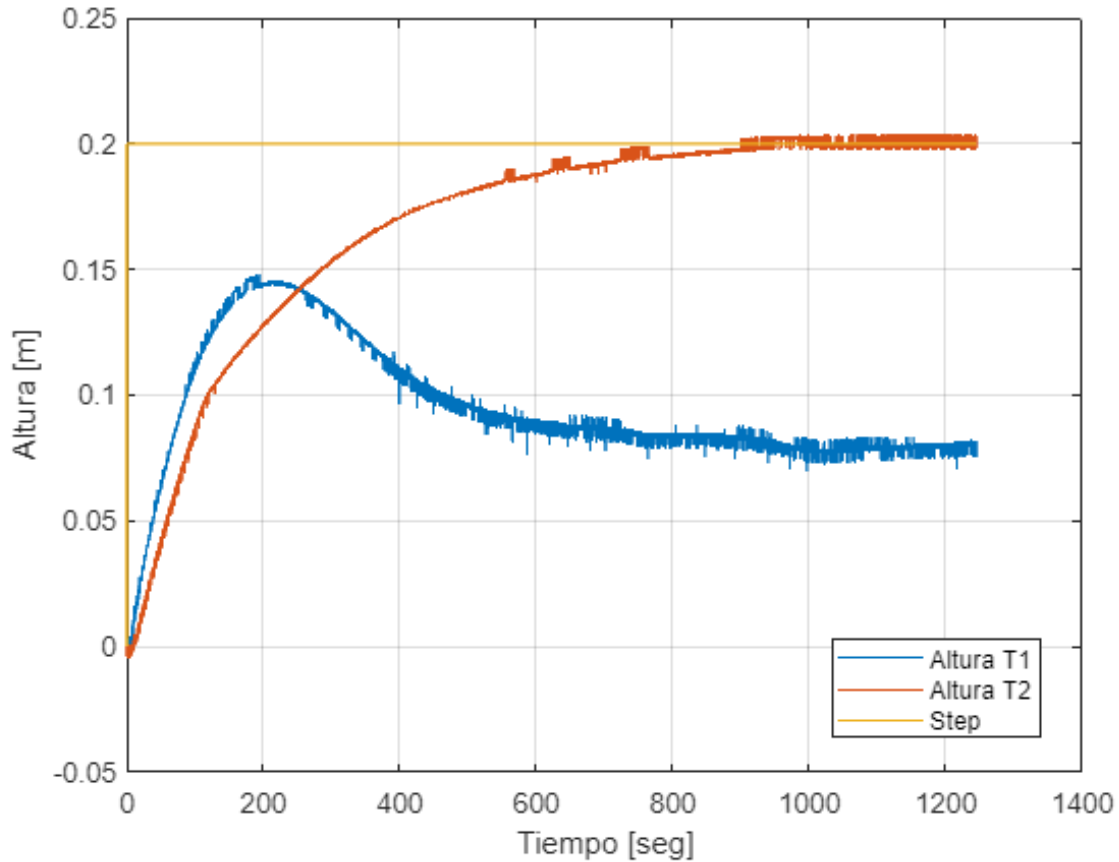
Diagrama de bloques para control de planta real en cascada.



Nota. El diagrama de bloques es usado luego de la sintonización para obtener la respuesta real del sistema. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Figura 50.

Prueba del controlador en cascada real de la planta.



Nota. Respuesta de la curva de control de la planta real a un set point de 0.2 [m] con sintonización del modelo lineal. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

La respuesta del sistema real evidencia el control del proceso lento y por ende la variable controlada, alcanza el set point indicado y logra mantenerse en el tiempo, su tiempo de estabilización esta alrededor de los 800 a 1000 segundos luego de iniciar la planta, por otro lado, para el comportamiento del tanque superior que posee el proceso rápido las simulaciones son capaces de mostrar una caída de altura, sin embargo dentro de la prueba escalón real se observa

que esta última variable no logra alcanzar el set point sin embargo, se mantiene estable en el tiempo.

5.5 Criterio de la integral de valor absoluto del error IAE

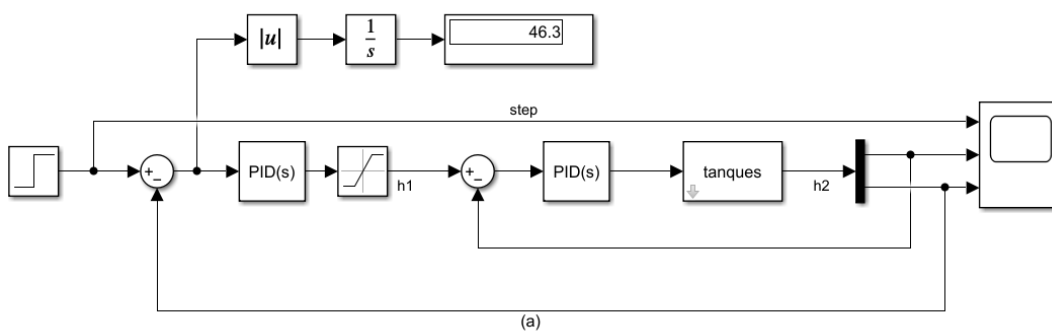
El criterio de la integral de valor absoluto es un índice de desempeño que dentro de los sistemas de control permite determinar si el ajuste en las ganancias de los controladores es óptimo, esto en base a la integral del error que pasa por un valor absoluto dentro de un sistema en lazo cerrado.

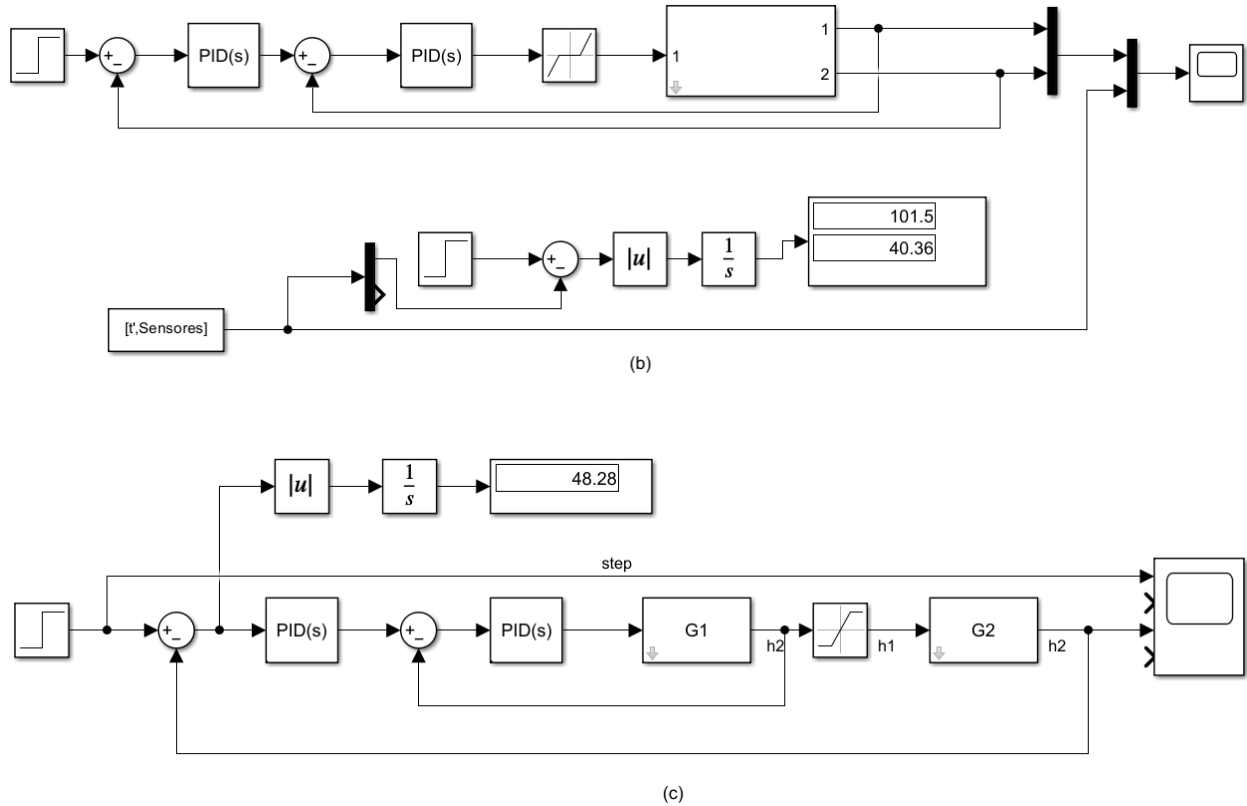
$$\int_0^T |e(t)|dt$$

Para la simulación en el sistema linealizado de la planta el índice de desempeño se calcula con base en la figura 41 (b) y se añade un bloque integrador, así como un bloque de valor absoluto a la salida del primer sumador; es decir el error de entrada al controlador como se indica a continuación.

Figura 51.

Diagrama de bloques para IAE





Nota. Las figuras (a) y (c) muestran la respuesta del criterio IAE de la simulación de control por caja gris y caja negra respectivamente, mientras que la figura (b) indica la respuesta del criterio IAE para la prueba real obtenida. Adaptado de Simulink MATLAB R2022b, 2023.

Tabla 20.

Resultados de simulación y proceso real.

Modelo	IAE	Tiempo de establecimiento [seg]	Tiempo de Muestreo [seg]
Simulación caja gris	46.30	600	0.075
Simulación caja negra	48.48	1200	0.075
Proceso real	40.36	800	0.075

6. Conclusiones

Del objetivo número uno se concluye que la parametrización mediante enfoque de caja gris describe con precisión el comportamiento de la planta con sistema LTI. Se obtuvieron valores del 66.13% para el tanque superior y un 87.45% para el tanque inferior. Estos resultados destacan la validez de las consideraciones realizadas con relación al modelo matemático de sistemas de nivel líquido, lo que subraya la adecuación de dicho modelo para la planta diseñada. Es importante resaltar que se tuvo en cuenta el rango de operación de los actuadores y las perturbaciones, lo que permitió un ajuste más eficiente de los modelos matemáticos a las condiciones del mundo real. Además, se logró determinar y ajustar los parámetros previamente desconocidos, alineándolos con los valores obtenidos en las caracterizaciones experimentales realizadas. Este proceso fue fundamental para garantizar la precisión y confiabilidad de la planta en su funcionamiento práctico.

Por otro lado, para el objetivo número dos se tuvieron en cuenta dos situaciones de estudio donde se utilizó métodos de sintonización y control clásico, como el método de Ziegler-Nichols para el tanque 1 (tanque superior) y métodos más complejos como control PID en cascada con lugar geométrico en las raíces para el tanque 2 (tanque inferior). Luego se comprobó el rendimiento de estos controladores observando un comportamiento similar tanto en la teoría como en la práctica.

Respecto al objetivo número tres se diseñó y construyó el banco de prueba como aporte práctico para escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander, siendo esta de fácil acceso y utilización para el análisis de modelado de sistemas de tanque acoplados, garantizando conexiones de acoples rápidos, aislados para reparaciones muchos más fáciles y sencillas. Además, se realizó un análisis estructural mediante la herramienta SolidWorks para

verificar la estabilidad y funcionalidad del diseño mecánico en relación con las condiciones de operación y los componentes involucrados, el cual arrojó como resultado un factor de seguridad de 1.3. Dentro del proceso de construcción, se incorporó el módulo de control, el cual requirió numerosas pruebas de funcionamiento y conexiones para desarrollar el esquema completo de la tarjeta PCB. Una vez que el banco de pruebas estuvo construido, se pudo completar la validación del modelo y, de manera satisfactoria, implementar la simulación planificada del controlador.

Para finalizar, con respecto al último objetivo; una vez construido y validado el comportamiento y modelo de cada apartado del proceso fue posible el diseño del manual didáctico y de operación de la planta, en dicho manual se explicó el funcionamiento del sistema, así como el modo de uso para pruebas que fortalecen los conceptos de clases de ingeniería de control con la aplicación de un ejemplo de control clásico como es el control de nivel en tanques hidráulicos.

Referencias Bibliográficas

Análisis de ceros y polos - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. (s. f.).

<https://la.mathworks.com/help/signal/ug/zero-pole-analysis.html>

Ajustar controladores PID - MATLAB - MathWorks América Latina. (s. f.).

<https://la.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html>

Arbeláez, A. (2018). *Diseño de control de nivel por medio de una medición continua en los tanques de almacenamiento de ACPM en la empresa de Colcafe S.A.*. Recuperado de:

<http://hdl.handle.net/20.500.12622/3975>.

Create Subsystems - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. (s. f.).

<https://la.mathworks.com/help/simulink/ug/creating-subsystems.html>

Creus, C. (1997). *Instrumentation Industrial*. Alfaomega Grupo Editor.

Designing cascade control system with PI Controllers - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. (s. f.). <https://la.mathworks.com/help/control/ug/designing-cascade-control-system-with-pi-controllers.html>

<https://la.mathworks.com/help/control/ug/designing-cascade-control-system-with-pi-controllers.html>

Diseño de filtros Butterworth - MATLAB Butter - MathWorks América Latina. (s. f.).

<https://la.mathworks.com/help/signal/ref/butter.html>

Features, Product. (s/f). *Ultrasonic Ranging Module HC - SR04*. Sparkfun.com. Recuperado el 11

de septiembre de 2023, de

<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

Gosmann, H. L. (2002). *Um sistema Multivariável de tanques acoplados para avaliação de técnicas de controle* (Tesis de maestría). Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil.

Hernández, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. Pearson Educación

Identify linear models using System Identification App - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. (s. f.-b). <https://la.mathworks.com/help/ident/gs/identify-linear-models-using-the-gui.html>

Moromenacho, E., & Rosero, C. (2010). *Diseño e Implementación de Control Predictivo en Tanques Acoplados* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación.

Oyarzún, D. (2006). *Implementación de un sistema de control de nivel para el suministro de petróleo de grupos electrógenos* (Tesis de pregrado). Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.

Peñaranda, C., Reinaldo, W., & Gomez, E. (2014). *Instrumentación y Control de Nivel para un Sistema de Tanques Acoplados en el Laboratorio de Control e Instrumentación de E3T-UIS* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Pérez, S. (2011). *Control de tanques acoplados* (Tesis de pregrado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Comunicación, Pamplona, España.

Pérez, K. (2018). *Diseño y Construcción de un Sistema de Tanques Acoplados para la Enseñanza del Control Automático* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

PID Controller Tuning in Simulink - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. (s. f.).

<https://la.mathworks.com/help/slcontrol/gs/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>

Quanser. (2021, 20 abril). *Coupled Tanks - Quanser.* [https://www.quanser.com/products/coupled-](https://www.quanser.com/products/coupled-tanks/#overview)

[tanks/#overview](https://www.quanser.com/products/coupled-tanks/#overview)

RS-360SH 3-9V Water Spray Electric Motor for pumping. (s/f). MOTOR. Recuperado el 11 de

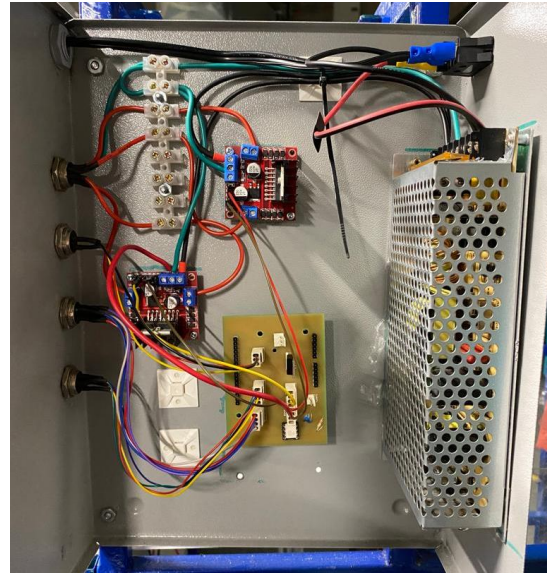
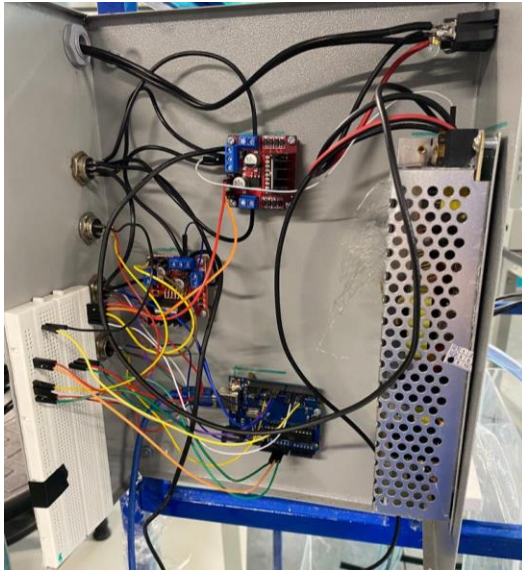
septiembre de 2023, de <https://www.andmotor.com/product-details/rs-360sh-3-9v-water-spray-electric-motor-for-pumping/>

Two tank system: C MEX-File Modeling of Time-Continuous SISO System - MATLAB & Simulink

Example - MathWorks América Latina. (s. f.). <https://la.mathworks.com/help/ident/ug/two-tank-system-c-mex-file-modeling-of-time-continuous-siso-system.html>

Apéndices

Apéndice A. Construcción de la planta.



Apéndice B. Modelo no lineal para dinámica de tanques acoplados.

```
function [dx,y] = funcionT(t, x, u, A1, A2, a1, a2,k,dz1, varargin)

g = 9.81;

if(u(1)>80)
dx = [(1/A1)*(k*(u(1)-80) - 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. Códigos de programación MATLAB para validación de caja gris.

```
%clear
%clc
%% Carga de datos
z = iddata( Sensores, PWM, 0.075, '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 = [0.04; 0.04; 0.00019; 0.00019; 0.000002; 0.001]; % Parametros
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 });
nlgr = setpar(nlgr, 'Fixed', {true true false false false false});% Estimación de los
estados iniciales.
opt = nlgreyestOptions('Display', 'on');
opt.SearchOptions.MaxIterations =15;
nlgr = nlgreyest(z, nlgr, opt);
```

```
compare(z, n1gr);
```

Apéndice D. Código de programación Arduino para datos de caudal.

```
int IN4 = 2;
String lectura = "";
float caudal;
float Q=0;
float O=0;
float O_1=0;
float O_2=0;
float f=0;
float f_1=0;
float f_2=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(IN4, OUTPUT);
}
void loop ()
{
  Serial.println(lectura.toInt());
  analogWrite(IN4, lectura.toInt());
  f=0.00094469*O+0.0019*O_1+0.0009446*O_2+1.9112*f_1-0.9150*f_2;
  caudal=f/5.5;
  Serial.print(lectura);
  Serial.print("");
  Serial.println(caudal);
}
```

Apéndice E. Códigos de programación MATLAB espacio de estados.

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

At10 = 0.0678
At20 = 0.0323
Av10 = 3.3e-5
Av20 = 3.23e-5
k0 = 8.84e-7
g0 = 9.81
h10 = 0.2

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))) ;]
```

```
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)
Ansym = Asym(2,2)
Bnsym = Bsym(2,1)

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 })))
An = double(subs(Ansym,{At1 At2 Av1 Av2 g h1 h2 k u },{At10 At20 Av10 Av20 g0 h10
h20 k0 u0 })))
Bn = double(subs(Bnsym,{At1 At2 Av1 Av2 g h1 h2 k u },{At10 At20 Av10 Av20 g0 h10
h20 k0 u0 })))
c2 = [0,1]
c1 = [1,0]
Cn = 1
c = eye(2)

tanque1 = ss(A,B,c1,0)
tanque2 = ss(A,B,c2,0)
tanques = ss(A,B,c,0)
Tanque2N = ss(An,Bn,Cn,0)

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

step(tftanque1)
step(tftanque2)
```

Apéndice F. Presupuesto

#	Ariticulos	Valore uni	Unidades	Total
1	Conexiones	\$ 1,000	10 und	\$ 10,000
2	Codos	\$ 1,000	3 und	\$ 3,000
3	Tubo pvc 1/2"	\$ 4,000	1 m	\$ 4,000
4	Conexión de manguera 1/4"	\$ 15,000	4 und	\$ 60,000
5	Valvulas reguladora 1/4"	\$ 10,900	2 und	\$ 21,800
6	Manguera 1/4"	\$ 12,000	8m	\$ 96,000
7	Manguera 1/2"	\$ 3,000	6m	\$ 18,000
8	Conexiones de 1/2"	paquete	1 und	\$ 8,000
9	T de pvc	\$ 3,500	3 und	\$ 10,500
10	Pegante de pvc	\$ 5,000	1 und	\$ 5,000
11	Tanques	\$ 400,000	1 und	\$ 400,000
12	Soldadura	-	-	\$ 10,000
13	Pintura	-	-	\$ 58,000
14	Tabla de madera	\$ 15,900	1 und	\$ 15,900
15	Lija	\$ 2,000	2 und	\$ 4,000
16	Tiner	\$ 14,000	1 und	\$ 14,000
17	Varilla roscada	\$ 7,000	1 und	\$ 9,000
18	Flanches	\$ 6,800	4 und	\$ 27,200
19	Silicona	\$ 18,000	2 und	\$ 36,000
20	Pcb	\$ 50,000	1 und	\$ 50,000
21	Magura 3/8	\$ 8,000	1 m	\$ 8,000
22	Manguera 1/4	\$ 4,000	1m	\$ 4,000
23	Electronica bga	\$ 13,200	1 und	\$ 13,200
24	Electronica DC	\$ 32,850	1 und	\$ 32,850
25	Puerto USB	\$ 15,000	1 und	\$ 15,000
26	Postes electronicos	\$ 1,000	12 und	\$ 12,000
27	Tornillos caja	\$ 500	4 und	\$ 2,000
28	Tornillos postes	\$ 200	10 und	\$ 2,000
29	Caja metalica	\$ 22,000	1 und	\$ 22,000
30	Valvulas nuevas	\$ 4,000	2 und	\$ 8,000
31	Cable arduino	\$ 40,000	1 und	\$ 40,000
32	PLA 3d	\$ 73,000	1 und	\$ 77,000
33	Servos	\$ 45,000	1 und	\$ 45,000
34	Fuente de poder	\$ 50,000	1 und	\$ 50,000
35	Gastod	\$ 18,000	1 und	\$ 18,000
36	Postes plasticos	\$ 800	5 und	\$ 4,000
37	Modulos driver	\$ 21,000	2 und	\$ 42,000
38	Transporte	\$ 160,000	1 und	\$ 160,000
SUB TOTAL				\$ 1,415,450
IMPREVISTO (8%)				\$ 113,236
TOTAL				\$ 1,528,686

Apéndice G. Manual didáctico de la planta para el estudiante.



Objetivos:

- **Identificar y caracterizar el modelo no lineal del sistema de tanques acoplados.**
- **Identificación de modelo lineal mediante la herramienta sisotool de MATLAB**
- **Diseñar un controlador PID en cascada, analizar ventajas-desventajas y en qué casos es mejor utilizarlo.**
- **Comparar el resultado de respuesta de control de los modelos obtenidos con el sistema real.**

Marco Teórico

Para una mejor comprensión de la metodología de laboratorio consulte literatura relacionada a temas de:

- ✓ Control de sistemas de nivel líquido.
- ✓ Series de Taylor
- ✓ Identificación de sistemas por caja blanca, caja negra y caja gris
- ✓ Arquitectura de control en cascada

Guía de laboratorio

Control de nivel en dos tanques acoplados

Caracterización de actuadores

La caracterización de las bombas permite analizar la gráfica de comportamiento de caudal entregado respecto de un pwm entregado, de la cual se obtiene el valor de la pendiente de la línea de tendencia k_m . Para esta caracterización por medio del código Arduino se miden los datos entregados de la lectura del caudalímetro respecto de la variación del pwm, denominada variable u . Se debe hallar además de la pendiente, el rango de operación, así como concluir posibles zonas muertas.

$$q_{bp} = k_m * u \quad (\text{ecuación 1})$$

La segunda caracterización se realiza al servo válvula presente en el acople entre tanques, se realiza graficando el comportamiento del área de paso respecto del Angulo de apertura dado. Con el diagrama de bloques de simulink se asigna entonces un grado de apertura. Con el tanque en su máximo nivel, se abre la válvula con el diagrama de mando de simulink y se registra para un minuto de operación el dato de variación de altura inicial menos altura final. El área del tanque asume como una constante de 0.04 m^2 y con la ecuación dos se halla el valor de área de paso, de este modo de grafican los datos y se halla la pendiente de línea de tendencia, denominada a partir de ahora resistencia.

$$t = \sqrt{\frac{2(h_o - h_f)}{g}} \left(\frac{A_T^2}{A_v^2} \right) \quad (\text{ecuación 2})$$

- ✓ Construya la gráfica PWM vs Caudal con base en la variación manual de PWM de 0 a 255. Analice el rango de operación, zona muerta y constante de la pendiente de la curva en m^3/seg
- ✓ Bajo un rango de operación para el servo válvula de 0° a 90° donde 0° es totalmente abierta y 90° totalmente cerrada realice pruebas de apertura cada 10 grados y grafique los resultados. Analice el rango de operación, el comportamiento de área de paso y halle la pendiente de la curva.



Validación de modelo no lineal

La planta se considera un sistema estable con un flujo turbulento por lo que las ecuaciones que modelan el sistema son las siguientes:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C_1} (k_m u - R_1 \sqrt{2gh_1}) \quad (\text{ecuación 3})$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{C_2} (R_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - R_2 \sqrt{2gh_2}) \quad (\text{ecuación 4})$$

k_m : pendiente de línea de tendencia para las bombas

C_1, C_2 : Área transversal de los tanques

R_1, R_2 : Área de paso de caudal de salida

Los parámetros mencionados anteriormente son usados para validar el modelo matemático respecto de las pruebas de estabilización. Se realiza entonces con la herramienta Matlab una validación inicial y se registra el resultado.

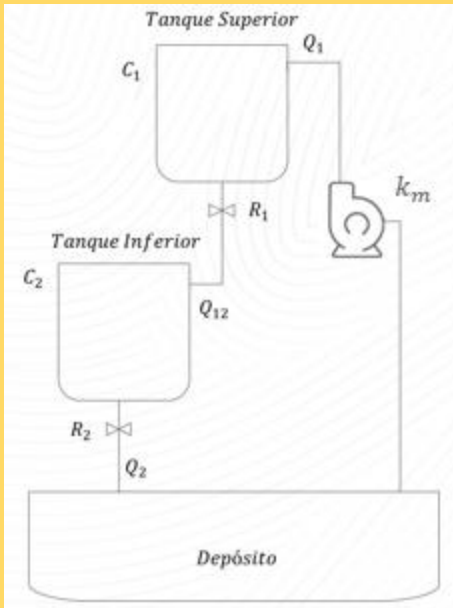
Para mejorar el porcentaje de validación se realizan cálculos iterativos para los parámetros variables; en este caso las resistencias de las válvulas, este cálculo iterativo pretende encontrar nuevos valores para estos parámetros que cumplan con una mejor respuesta de validación.

- ✓ Explique los resultados de validación del modelo matemático.
- ✓ ¿Considera que el modelo debe iterar alrededor de más de los dos parámetros planteados? Justifique su respuesta

Linealización del modelo matemático

Partiendo de los parámetros anteriores se ejecutan los cálculos de linealización para el modelo no lineal planteado por medio de series de Taylor. De este modo se obtienen las funciones de transferencia de la planta que evaluadas en cierto rango muestran un comportamiento semejante al modelo no lineal.

- ✓ Obtenga las funciones de transferencia no lineales para el sistema y analice su estabilidad hallando las raíces de los polos





La arquitectura de control en cascada se adapta a la planta bajo las siguientes consideraciones.

Tabla 1.

Diseño de la arquitectura en cascada para la planta de control de nivel.

Proceso Rápido	Proceso lento
Llenado del tanque superior	Llenado de tanque Inferior
Controlador secundario	Controlador primario

Tenga en cuenta que la sintonización del controlador secundario posee una configuración para control PI con las siguientes ganancias obtenidas de manera experimental para las pruebas de estabilización.

$$k_p = 1000$$

$$k_1 = 5$$

- En el diagrama de bloques presentado a continuación valide las ganancias obtenidas para el controlador y realice la experiencia real de control. Realice un análisis comparativo de la experiencia real respecto de las simulaciones.

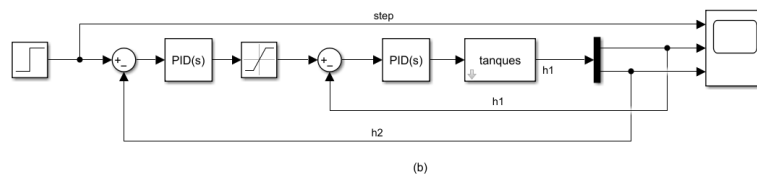
Sintonización de controladores

a. Método caja gris

En este método se implementan las funciones de transferencia de obtenidas de linealización por series de Taylor, como primera parte debe analizar la estabilidad del sistema por ubicación de polos. Diseñe un diagrama de bloques en simulink (puede guiarse de la figura presentada) en la que se represente el método de control en cascada y se sintonice el controlador principal analizando la respuesta escalón unitario por el método Ziegler-Nichols.

Figura 1.

Diagrama de bloques para simulación por método de caja gris.



b. Método caja negra

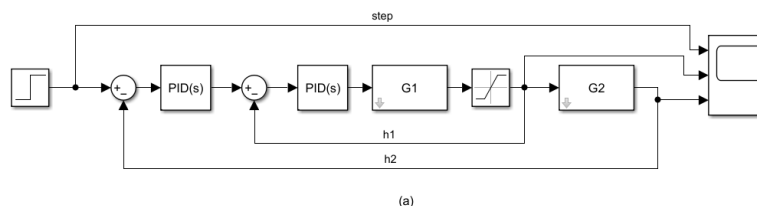
En este método considere las funciones de transferencia lineales G_1 y G_2 halladas en base al procesamiento de los datos de obtenidos de estabilización con ayuda de la herramienta System Identificación de Matlab. Como primera parte debe analizar la estabilidad del sistema por ubicación de polos. Diseñe un diagrama de bloques en simulink (puede guiarse de la figura presentada) en la que se represente el método de control en cascada y se sintonice el controlador principal analizando la respuesta escalón unitario por el método Ziegler-Nichols.

$$G_1(s) = \frac{-0.002219s + 5.097 \times 10^{-5}}{s^2 + 6.363s + 0.03918}$$

$$G_2(s) = \frac{0.1164s + 0.0001519}{s^2 + 0.03708s + 0.0001468}$$

Figura 2.

Diagrama de bloques para simulación por método de caja negra.

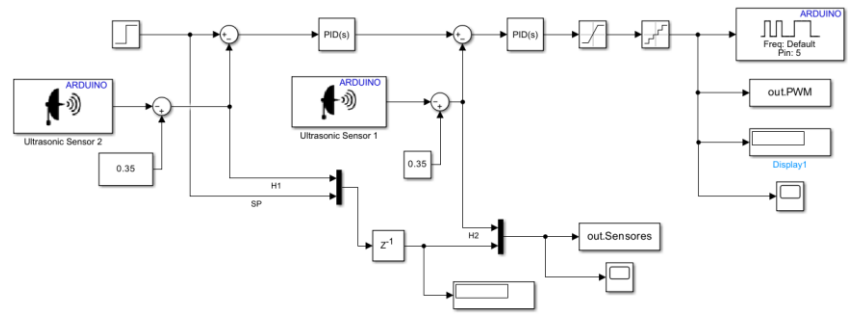




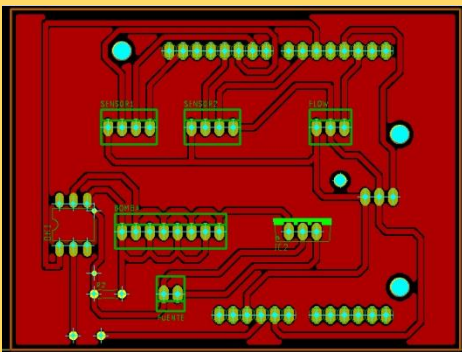
Universidad Industrial de Santander

Figura 3.

Diagrama de bloques para control de plata real en cascada.



- Cual considera es el modelo que mejor se ajusta a la planta en base a la experiencia validada con la planta real. Justifique su respuesta
- Agregue perturbación al sistema aumentando o disminuyendo el grado de apertura del servo válvula. Explique el comportamiento de la plantan frente a dicha perturbación.



Módulo de operación y control de la planta

Dentro de la planta se encuentra adaptado el módulo de control para conexiones a todos los elementos eléctricos y electrónicos presentes:

- Bombas DC
- Servomotor
- Sensores de nivel
- Sensor de caudal

Asimismo, se incluyen elementos para garantizar la correcta operación tales como:

- Fuente de poder 12v
- Optoacoplador
- Regulador de voltaje

