



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 22 / 03 / 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad Neiva

El (Los) suscrito(s):

HERNAN DARIO LOSADA GOMEZ, con C.C. No. 1075275232,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_  
titulado Diseño e implementación de un sistema de control de nivel y flujo de tanques  
acoplados usando control multivariable por un método clásico

\_\_\_\_\_  
presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de  
INGENIERO ELECTRONICO;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



# UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS



## CARTA DE AUTORIZACIÓN

**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-06**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**2 de 2**

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

*[Firma manuscrita]*

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

\_\_\_\_\_

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

\_\_\_\_\_






EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

\_\_\_\_\_

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	<b>UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA</b> <b>GESTIÓN DE BIBLIOTECAS</b>					   	
	<b>DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO</b>						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>1 de 4</b>

**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Diseño e implementación de un sistema de control de nivel y flujo de tanques acoplados usando control multivariable por un método clásico

**AUTOR O AUTORES:**HERNAN DARIO LOSADA GOMEZ

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
LOSADA GOMEZ	HERNAN DARIO

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
MOSQUERA CERQUERA	VLADIMIR

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** INGENIERO ELECTRONICO

**FACULTAD:** INGENIERIA

**PROGRAMA O POSGRADO:** INGENIERIA ELECTRONICA

**CIUDAD:**NEIVA

**AÑO DE PRESENTACIÓN:**2021**NÚMERO DE PÁGINAS:** 46

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías X Grabaciones en discos\_\_\_ Ilustraciones en general X Grabados\_\_\_  
 Láminas\_\_\_ Litografías\_\_\_ Mapas\_\_\_ Música impresa\_\_\_ Planos\_\_\_ Retratos\_\_\_ Sin ilustraciones\_\_\_ Tablas  
 o Cuadros\_\_\_

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: ADOBE O CUALQUIER LECTOR DE DOCUMENTOS .PDF

**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>ACOPLADO</u>	<u>COUPLED</u>	6. _____	_____
2. <u>ARDUINO</u>	<u>ARDUINO</u>	7. _____	_____
3. <u>CONTROL</u>	<u>CONTROL</u>	8. _____	_____
4. <u>DESACOPLADOR</u>	<u>DECOUPLER</u>	9. _____	_____
5. <u>MULTIVARIABLE</u>	<u>MULTIVARIABLE</u>	10. _____	_____

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

El presente trabajo consiste en el diseño, implementación y control de un sistema de dos tanques acoplados, tomando como variables controladas el nivel del Tanque 1 y el caudal del Tanque 2. Los tanques fueron construidos en vidrio para permitir la visualización de la dinámica del sistema. Para el control y adquisición de las variables de proceso se usó una tarjeta Arduino Uno R3, y para la operación y supervisión del sistema se construyó una interfaz gráfica en LABVIEW.



**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)






The present work consists in the design, implementation and control of a coupled tank system, taking as controlled variables the level of the tank 1 and the flow of the tank 2. The tanks were built in glass to allow the visualization of the dynamics of the system. For the control and acquisition of the variables process, an-Arduino Uno R3 card was used, and for the operation and supervision of the system, a graphical interfaz was built in LABVIEW.

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Presidente Jurado:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	<b>UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA</b> <b>GESTIÓN DE BIBLIOTECAS</b>					 <small>ISO 9001</small>	 <small>ISO 14001</small>	 <small>ISO 45001</small>	 <small>ICNET</small>
<b>DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO</b>									
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>4 de 4</b>		

Firma:

Nombre Jurado: FAIBER IGNACIO ROBAYO BETANCOURT

Firma:

Nombre Jurado: AGUSTIN SOTO OTALORA

Firma:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL Y  
FLUJO DE TANQUES ACOPLADOS USANDO CONTROL MULTIVARIABLE POR  
UN MÉTODO CLÁSICO



HERNAN DARIO LOSADA GÓMEZ

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA  
2020

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL Y  
FLUJO DE TANQUES ACOPLADOS USANDO CONTROL MULTIVARIABLE POR  
UN MÉTODO CLÁSICO

HERNAN DARIO LOSADA GÓMEZ

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director: VLADIMIR MOSQUERA CERQUERA  
Magister en Ingeniería electrónica

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA  
2020



**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Neiva, octubre de 2020**

## **DEDICATORIA**

***A mis padres Carmen Gómez Castro y Wilson Losada,  
mis abuelos Jaime Gómez, Carmen Castro, Luis Losada y Ana Rita Ramírez,  
a mis hermanos, amigos y familiares.  
Hernan Dario Losada Gomez***

## **AGRADECIMIENTOS**

*Manifiesto mis mas sinceros agradecimientos, en primer lugar, a Dios por darme la oportunidad de llevar este trabajo a buen término, a familiares y amigos que durante todo este proceso han estado atentos e interesados por el éxito de este ejercicio académico, a la Universidad Surcolombiana por abrirme y facilitarme el espacio para formarme ética y profesionalmente, a los ingenieros y docentes del programa de ingeniería electrónica por la formación académica y en especial a los ingenieros Gentil Alexis Perdomo y Vladimir Mosquera Cerquera por el inmenso apoyo que me han brindado.*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1. OBJETIVOS .....	12
2. MARCO TEÓRICO .....	13
2.1 MODELO DEL SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS .....	13
2.2 MODELO DEL SISTEMA EN ESPACIO DE ESTADOS .....	16
3. DISEÑO .....	18
3.1 DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE LA PLANTA. ....	18
3.1.1 Diseño de los tanques .....	19
3.1.2 Diseño del reservorio .....	20
3.1.3 Diseño de la tubería de interconexión de los tanques .....	21
3.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	23
3.3 CONTROL ON/OFF .....	31
4. IMPLEMENTACION .....	33
4.1 ADQUISICION DE VARIABLES DE PROCESO .....	33
4.2 CONTROL DE LAS VARIABLES DE PROCESO .....	35
5. RESULTADOS .....	38
5.1 RESULTADO HARDWARE DE CONTROL DE LAS ELECTROBOMBAS .....	38
5.2 Resultado estructura física de los Tanque Acoplados .....	39
5.3 Resultado prueba de funcionamiento .....	40
6. CONCLUSIONES .....	43
7. RECOMENDACIONES .....	45
8. BIBLIOGRAFÍA .....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema TITO .....	13
Figura 2. Diagrama del sistema hidráulico .....	14
Figura 3. Esquema de procesos.....	18
Figura 4. Infraestructura de la planta .....	18
<i>Figura 5. Vista superior (a) y lateral (b) de la planta .....</i>	<i>19</i>
Figura 6. Estructura y dimensiones de los tanques.....	20
Figura 7. Reservorio .....	20
Figura 8. Esquema de la tubería del sistema.....	22
Figura 9. Diagrama de bloques de las funciones de transferencia con sus controladores PID .....	26
Figura 10. Respuesta del sistema controlado .....	27
Figura 11. Parámetros PID para $G_{11}(s)$ .....	27
Figura 12. Parámetros PID para $G_{22}(s)$ .....	28
Figura 13. Respuesta $G_{11}(s)$ en lazo abierto y lazo cerrado con control.....	28
Figura 14. Respuesta del controlador y desacoplador del Tanque 1 .....	29
Figura 15. Respuesta $G_{22}(s)$ en lazo abierto y lazo cerrado con control.....	30
Figura 16. Respuesta del controlador y desacoplador del Tanque 2 .....	30
Figura 17 Respuesta $G_{11}(s)$ en lazo cerrado con control ON/OFF .....	31
Figura 18 Respuesta $G_{22}(s)$ en lazo cerrado con control ON/OFF .....	32
Figura 19. Se observa el sensor HC-SR04 con su respectiva conexión a la placa de desarrollo Arduino UNO.....	33
Figura 20. Sensor YF-S402 con su respectiva conexión a la placa de desarrollo Arduino UNO. ....	34
Figura 21. Diagrama de flujo.....	35
Figura 22. Interfaz gráfica .....	36
Figura 23. Diagrama de flujo de la interfaz grafica .....	37
Figura 24. Hardware del sistema.....	38
Figura 25. Montaje final del sistema de tanques acoplados.....	39
Figura 26. Respuesta del sistema en el primer punto de operación.....	40
Figura 27. Respuesta en la interfaz grafica del primer punto de operación.....	40
Figura 28. Respuesta del sistema en el segundo punto de operación.....	41
Figura 29. Respuesta en la interfaz gráfica del segundo punto de operación.....	41
Figura 30. Respuesta del sistema en el tercer punto de operación.....	42
Figura 31. Respuesta en la interfaz gráfica del tercer punto de operación.....	42

## **RESUMEN**

El presente trabajo consiste en el diseño, implementación y control de un sistema de dos tanques acoplados, tomando como variables controladas el nivel del Tanque 1 y el caudal del Tanque 2. Los tanques fueron contruidos en vidrio para permitir la visualización de la dinámica del sistema. Para el control y adquisición de las variables de proceso se usó una tarjeta Arduino Uno R3, y para la operación y supervisión del sistema se construyó una interfaz gráfica en LABVIEW.

## **ABSTRACT**

The present work consists in the design, implementation and control of a coupled tank system, taking as controlled variables the level of the tank 1 and the flow of the tank 2. The tanks were built in glass to allow the visualization of the dynamics of the system. For the control and acquisition of the variables process, an-Arduino Uno R3 card was used, and for the operation and supervision of the system, a graphical interfaz was built in LABVIEW.

## INTRODUCCIÓN

El hombre a través de la historia ha deseado dejar de operar sistemas e independizarlos para que estos ejecuten acciones por sí mismos, esto llevó a la necesidad de crear métodos de control y automatización que con el tiempo se vuelven más sofisticados y precisos. Los sistemas automáticos pueden ejecutar acciones sin la necesidad de la intervención humana, reduciendo costos de operación, aumentando la producción y aprovechamiento de materias primas haciéndolos muy rentables a pesar de su alto costo de implementación.

Actualmente el campo de la automatización de procesos industriales se encuentra en su auge presentando avances en técnicas de análisis y control de sistemas, de allí surge la necesidad de tener modelos cada vez más reales con múltiples variables que muestre cómo estas interactúan entre sí y describan mejor la dinámica de los sistemas.

El avance en las tecnologías de la información generó un enfoque hacia los datos donde los sistemas automáticos pueden realizar la adquisición de información de un proceso para crear registros que jueguen un papel importante al momento de tomar decisiones y generar alarmas que den aviso de condiciones que requieran un análisis para tomar medidas correctivas.

Los sistemas de tanques acoplados son ampliamente usados en la industria del petróleo, farmacéutica, de alimentos, de productos agrícolas, entre otros. Este trabajo está enfocado al diseño, construcción, modelamiento y control de un sistema de tanques acoplados. La concepción de la planta se realizó desde el modelo matemático donde se obtienen medidas físicas para la construcción de un sistema más familiarizado con el entorno industrial y lo diferencia de las plantas existentes en los laboratorios de la Universidad las cuales son muy limitadas contribuyendo a la mejora de los equipos de laboratorio permitiendo la implementación de diferentes tipos de control donde los estudiantes de la Universidad Surcolombiana puedan aplicar conocimientos adquiridos.



## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad en el programa de ingeniería electrónica, en el área de control, se han venido presentando varias falencias respecto a las prácticas de laboratorio debido a la escasez de materiales (a lo que debe sumarse el mal funcionamiento de algunos de estos) con los que se cuentan a la hora de llevar a la práctica toda la teoría vista en clase. Debido a esto se implementó un “sistema de control multivariable para unos tanques acoplados” mediante métodos clásicos.

De esta forma dotar tanto a docentes como a estudiantes de un material académico con el cual sea posible interactuar fácilmente, teniendo en cuenta que dicha estructura permite la implementación de diversos proyectos, mediante la aplicación de otros métodos de control ya sean clásicos o modernos a partir del nuestro.

## **1. OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Diseñar e implementar un sistema de control de nivel y flujo, aplicando control multivariable mediante un método clásico.

### **ESPECÍFICOS**

- Desarrollar una interfaz en LABVIEW que permita controlar y manipular las variables en tiempo real.
- Validar los resultados obtenidos comparando datos reales de la planta y los obtenidos en la simulación.
- Obtener un modelo simulado de la planta que nos permita realizar comparaciones con el modelo real.
- Comprobar los resultados obtenidos teóricamente y en la simulación con la respuesta y comportamiento de la planta.

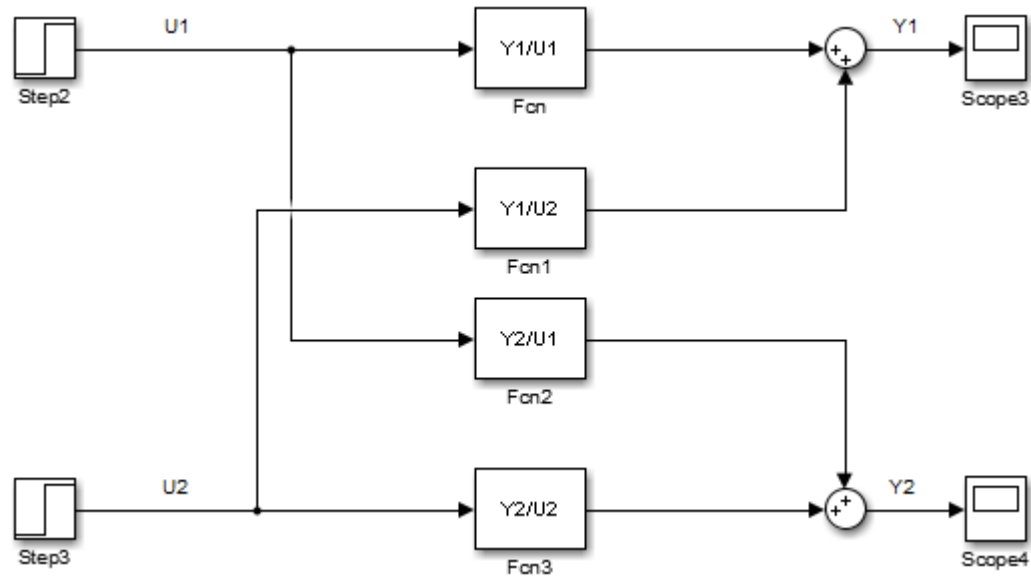
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 MODELO DEL SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS

Los sistemas multivariables o MIMO son sistemas donde intervienen múltiples variables y presentan más de una entrada y salida, estos sistemas son los más comunes pues representan correctamente la interacción de las variables que participan en los procesos.

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques que representa un sistema MIMO de dos entradas y dos salidas.

*Figura 1. Sistema TITO*

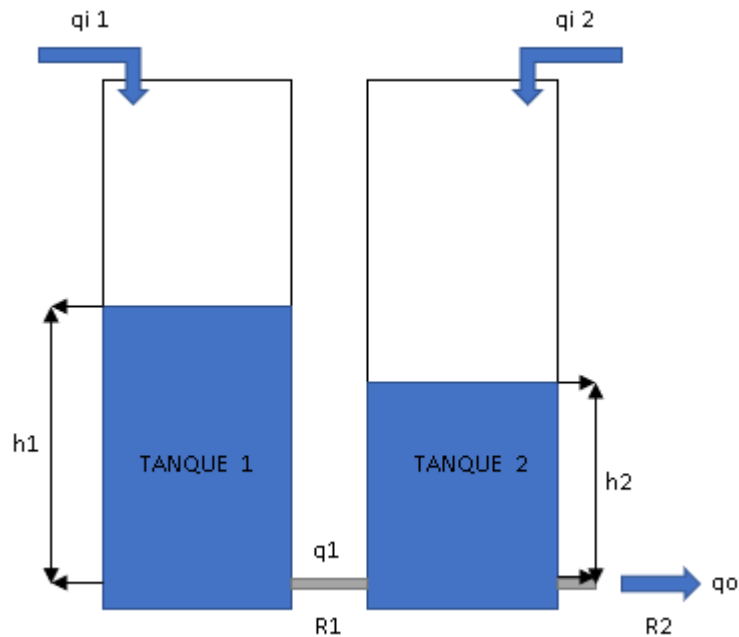


**Fuente.** El autor

El sistema de tanques acoplados consta de dos tanques, cada uno con una entrada de agua independiente asociadas a los caudales  $q_{i1}$  y  $q_{i2}$ , e interconectados por un tubo con resistencia  $R1$  por el cual fluye agua con un caudal  $q_1$ . En términos de variables de proceso,  $q_{i1}$  y  $q_{i2}$  son las entradas del sistema,  $h_1$  y  $q_0$  son las salidas.

En la Figura 2, se muestra el sistema de tanques acoplados a modelar con las respectivas variables de proceso.

Figura 2. Diagrama del sistema hidráulico



**Fuente:** El autor

La cantidad de agua contenida en el Tanque 1 corresponde a la diferencia de los caudales de entrada y salida, lo cual es descrito por la Ecuación 1

$$A1 \frac{dh1(t)}{dt} = q_{i1}(t) - q1(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

donde,

$A1$  es el área de la sección transversal del Tanque 1

$h1$  es el nivel instantáneo del Tanque 1

$q_{i1}$  es el caudal de entrada del Tanque 1

$q1$  es el caudal de salida del Tanque 1.

El caudal  $q1$  presente en el tubo que interconecta los tanques, está descrito por la Ecuación 2

$$q1(t) = \frac{h1(t) - h2(t)}{R1} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde ,

$h1$  y  $h2$  son respectivamente, los niveles de los tanques

$R1$  es la resistencia del tubo de interconexión.

La cantidad de agua contenida en el Tanque 2 corresponde a la diferencia de los caudales de entrada y salida, lo cual es descrito por la Ecuación 3

$$A2 \frac{dh2}{dt} = qi2(t) + q1(t) - qo(t) \quad \text{Ecuación 3}$$

donde,

$A2$  es el área de la sección transversal del Tanque 2

$h2$  es el nivel instantáneo del Tanque 2

$qi2$  es el caudal de entrada del Tanque 2

$qo$  es el caudal de salida del Tanque 2.

El caudal  $qo$  presente en el tubo de salida del Tanque 2, está descrito por la Ecuación 4

$$qo(t) = \frac{h2(t)}{R2} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde,

$R2$  es la resistencia del tubo de salida del Tanque 2

De la Ecuación 4 se obtiene la Ecuación 5.

$$h2(t) = qo(t)R2 \quad \text{Ecuación 5}$$

El cambio en el caudal de salida del Tanque 2 en el instante (t), corresponde al cociente entre el cambio en el nivel del Tanque 2 en el instante (t) y la resistencia del tubo de salida del Tanque 2. Como lo describe la Ecuación 6.

$$\frac{dqo}{dt} = \frac{\frac{dh2}{dt}}{R2} \quad \text{Ecuación 6}$$

De la Ecuación 6 se obtiene la ecuación 7.

$$\frac{dh2}{dt} = R2 \frac{dqo}{dt} \quad \text{Ecuación 7}$$

Remplazando la Ecuación 2 en la Ecuación 1, se obtiene la Ecuación 8.

$$A1 \frac{dh1}{dt} = qi1(t) - \frac{h1(t)}{R1} + \frac{h2(t)}{R1} \quad \text{Ecuación 8}$$

Despejando la Ecuación 8 se obtiene la Ecuación 9

$$\frac{dh1}{dt} = \frac{qi1(t)}{A1} - \frac{h1(t)}{A1R1} + \frac{h2(t)}{A1R1} \quad \text{Ecuación 9}$$

Remplazando la Ecuación 5 en la Ecuación 9 se obtiene la ecuación 10 que describe el cambio de nivel instantáneo del Tanque 1  $\frac{dh1}{dt}$  en función de las variables de proceso  $qi1(t), qo(t), h1(t)$  del sistema de tanques acoplados.

$$\frac{dh1}{dt} = \frac{qi1(t)}{A1} - \frac{h1(t)}{A1R1} + \frac{qo(t)R2}{A1R1} \quad \text{Ecuación 10}$$

Sustituyendo la Ecuación 2 y la Ecuación 7 en la Ecuación 3 se obtiene la Ecuación 11.

$$A2R2 \frac{dqo}{dt} = qi2(t) + \frac{h1(t)}{R1} - \frac{h2(t)}{R1} - qo(t) \quad \text{Ecuación 11}$$

Reemplazando la Ecuación 5 en la Ecuación 11, se obtiene la Ecuación 12.

$$A2R2 \frac{dqo}{dt} = qi2(t) + \frac{h1(t)}{R1} - \frac{qo(t)R2}{R1} - qo(t) \quad \text{Ecuación 12}$$

Despejando la Ecuación 12 se obtiene la Ecuación 13 que describe el cambio instantáneo de caudal de salida en el Tanque 2  $\frac{dqo}{dt}$  en función de las variables de proceso  $qi2(t), qo(t), h1(t)$  del sistema de tanques acoplados.

$$\frac{dqo}{dt} = \frac{qi2(t)}{A2R2} + \frac{h1(t)}{A2R2R1} - \frac{qo(t)}{A2R1} - \frac{qo(t)}{A2R2} \quad \text{Ecuación 13}$$

## 2.2 MODELO DEL SISTEMA EN ESPACIO DE ESTADOS

Las Ecuaciones 14 y 15 se conocen como ecuaciones de estado y de salida linealizada.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{Ecuación 14}$$

$$y = Cx + Du \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde,

A es la matriz de estado

B es la matriz de entrada

C es la matriz de salida

D es la matriz de transmisión directa

u es la entrada

x es el estado instantáneo.

Usando las Ecuaciones 10 y 13, se obtienen las matrices A, B, C y D.

$$A = \left[ -\frac{1}{A1R1} \frac{R2}{A1R1} \frac{1}{A2R1R2} - \frac{1}{A2R1} - \frac{1}{A2R2} \right] \quad B = \left[ \frac{1}{A1} \ 0 \ 0 \ \frac{1}{A2R2} \right]$$

$$\left[ \frac{dh1}{dt} \ \frac{dqo}{dt} \right] = \left[ -\frac{1}{A1R1} \frac{R2}{A1R1} \frac{1}{A2R1R2} - \frac{1}{A2R1} - \frac{1}{A2R2} \right] [h1 \ qo]$$

$$+ \left[ \frac{1}{A1} \ 0 \ 0 \ \frac{1}{A2R2} \right] [qi1 \ qi2]$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 1] [h1 \ qo] \quad D = 0$$

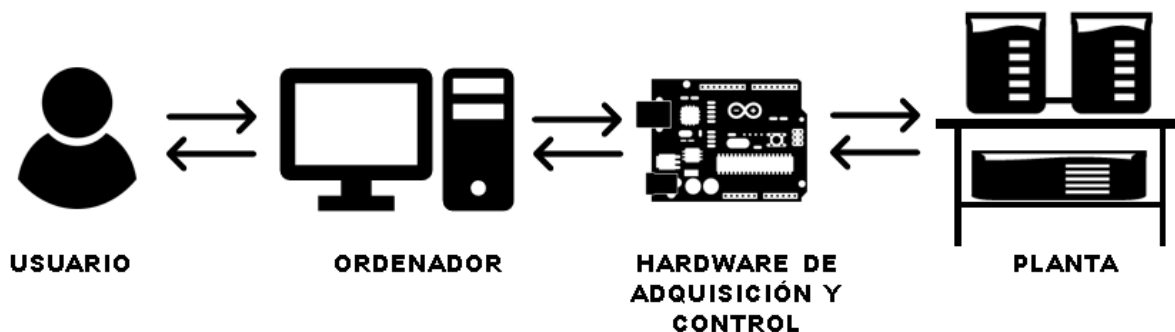
Para el modelo en espacio de estados obtenido se consideró un flujo laminar y se debe tener en cuenta que este solo cumple para la condición de operación en la cual *no es posible obtener un caudal de salida que requiera un nivel en el Tanque 2 superior al nivel en el Tanque 1.*

Cuando se presente un flujo turbulento u otra condición de operación (por ejemplo, cuando se requiera un nivel en el Tanque 2 mayor al del Tanque 1), la dinámica cambia y este modelo ya no satisface el requerimiento.

### 3. DISEÑO

En este capítulo, se presenta el diseño del sistema de tanques acoplados y controlador. La estructura general del sistema se compone por la interfaz de usuario, hardware para adquisición y control e infraestructura de la planta como se muestra en la Figura 3.

*Figura 3. Esquema de procesos*

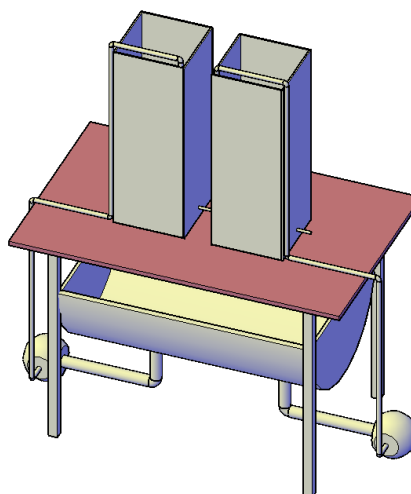


**Fuente:** Propia del autor

En el esquema mostrado en la Figura 3, el usuario supervisa las variables de proceso y establece el punto de operación a través de la interfaz en el ordenador. El hardware de adquisición y control obtiene las variables de nivel y caudal, las envía al ordenador para su visualización en la interfaz de usuario y a la vez realiza las acciones de control sobre la planta.

#### 3.1 DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE LA PLANTA.

*Figura 4. Infraestructura de la planta*



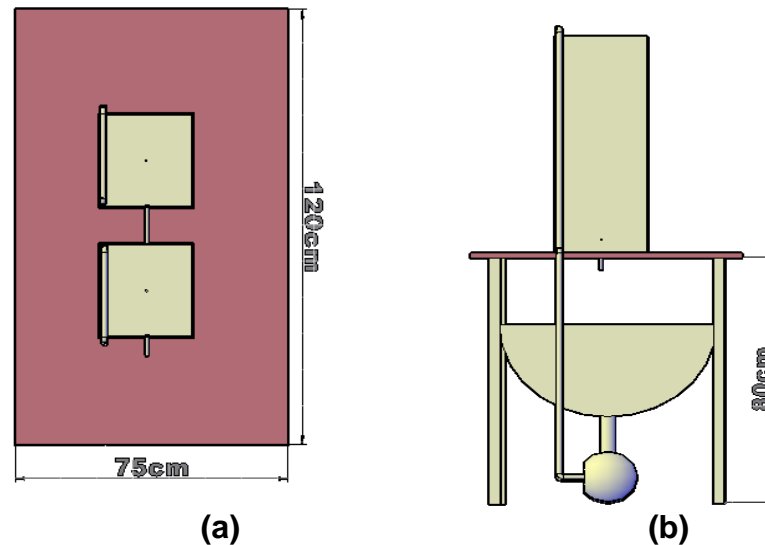
**Fuente:** Propia del Autor.



En el proceso de diseño de la planta fue necesario tener en cuenta el material con el cual se iban a construir los tanques para seleccionar así su la forma y tamaño con el fin de construir un sistema hidráulico que se diferencie de las plantas ya existentes en los laboratorios de las universidades, de tal manera que se pueda apreciar mejor la dinámica de este tipo de sistemas; En la Figura 4 se muestra el sistema completo de tanques acoplados.

La estructura de la planta consta principalmente de tres componentes que son los tanques, el reservorio y las tuberías.

*Figura 5. Vista superior (a) y lateral (b) de la planta*



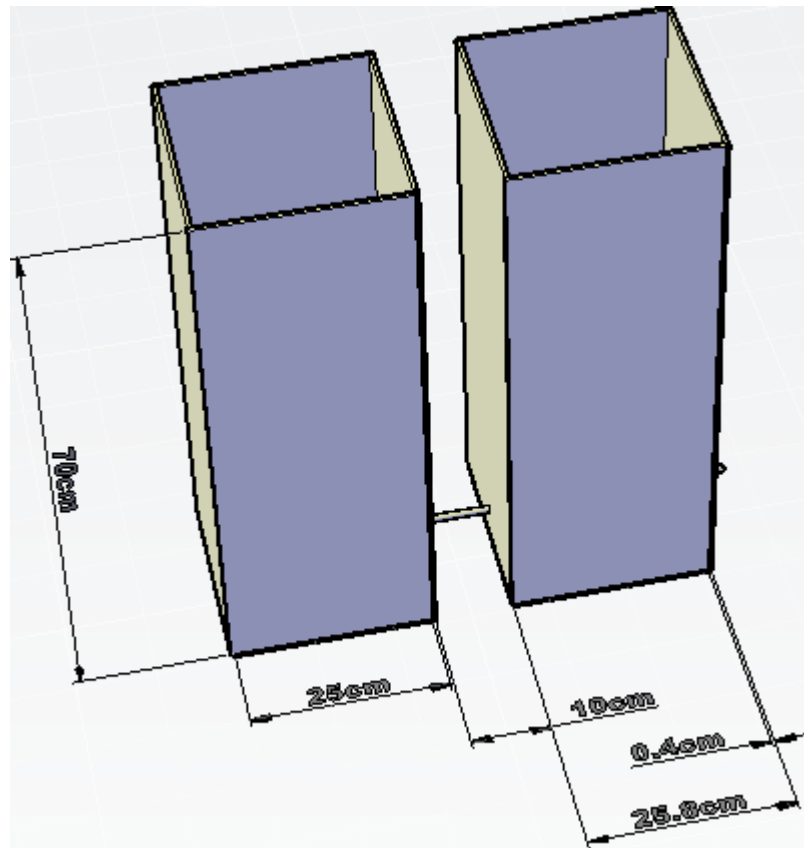
**Fuente:** Propia del autor

### 3.1.1 Diseño de los tanques

Teniendo en cuenta un caudal de entrada de 25 L/min que corresponde al suministrado por las electrobombas usadas en este proyecto, se consideró un volumen para los tanques de 25 L permitiendo que el proceso se realice en un lapso adecuado para apreciar la dinámica del sistema. Como material para la construcción de los tanques se usó vidrio de 4 mm de espesor por su economía y estética, además de que permite una buena visualización del nivel de agua en el tanque. Teniendo en cuenta el material utilizado se optó por construir los tanques en forma de prisma rectangular.

La presión hidrostática juega un papel importante al momento de dimensionar los tanques, debido a que esta es directamente proporcional a la columna de agua. Por tal razón se dimensiona la base de los tanques de 0.25 x 0.25 m para la cual se obtendrá el volumen de líquido requerido a una altura de 0.4 m como lo muestra la Figura 6, también es necesario asegurar una zona muerta de 0.04 m y 0.26 m de tolerancia para evitar desbordamientos.

*Figura 6. Estructura y dimensiones de los tanques*



**Fuente:** Propia del autor

### 3.1.2 Diseño del reservorio

*Figura 7. Reservorio*



**Fuente:** Propia del Autor

El reservorio debe tener un volumen de agua que garantice el llenado de los dos tanques acoplados con una tolerancia de por lo menos +20%, esto con el fin de que las electrobombas no trabajen en vacío. Teniendo en cuenta que la suma del volumen de los Tanques es de 50 L entonces el volumen mínimo del reservorio debe ser de 60 L por lo que se seleccionó un contenedor con capacidad de albergar 80 L de agua como el mostrado en la Figura 7.

### 3.1.3 Diseño de la tubería de interconexión de los tanques

Para la selección de la tubería de interconexión fue necesario tener en cuenta que esta define el grado de interacción entre los tanques y establece el caudal mínimo necesario para alcanzar el nivel máximo deseado que en este caso es de 40 cm. Por lo anterior se seleccionó una tubería en aluminio con un diámetro de 0.6 cm y una longitud de 10 cm.

Para calcular la resistencia de la tubería se utilizó la Ecuación 16 que representa el caudal de salida de un tanque con descarga libre.

$$q(t) = Cd(Vp(t))At\sqrt{2g\Delta h} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde,

- $q$  es el caudal de salida en  $m^3/s$
- $Cd$  es el coeficiente adimensional de descarga
- $Vp$  es la fracción de apertura de la válvula (0 cerrada y 1 totalmente abierta)
- $At$  es el área transversal de la tubería en  $m^2$
- $g$  es la gravedad en  $m/s^2$
- $\Delta h$  es la diferencia de altura en  $m$

Considerando un coeficiente de descarga de 0.82 por el tipo de boquilla usado y una apertura de válvula de 1 debido a que no hay válvula, se reemplaza en la ecuación 4 para encontrar el caudal de salida a un nivel de 40 cm.

$$q(t) = 0.82 * (\pi * 0.003^2) \sqrt{2 * 9.8 * 0.4}$$

$$q(t) = 0.000064919 m^3/s$$

Al momento de calcular la resistencia de la tubería, es necesario tener en cuenta que el número de Reynolds que se obtiene establece un flujo turbulento y considerando que la ecuación para la resistencia en flujo turbulento no es lineal, se procede a linealizarla obteniendo así una resistencia constante en flujo laminar válida solo para un rango de operación.

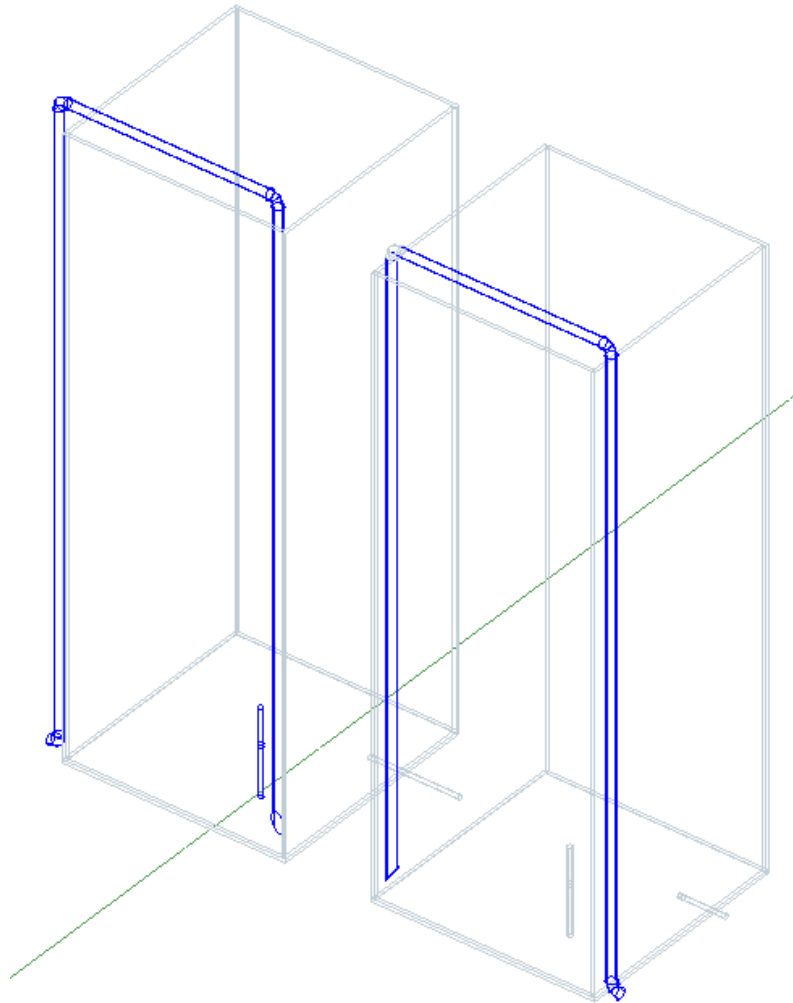
Usando la Ecuación 17, se obtiene el valor de la resistencia para la tubería de interconexión de los tanques.

$$R = \frac{2H}{Q} = \frac{0.4}{0.000064919} = 6161 \quad \text{Ecuación 17}$$

Como se señala en [5], un sistema hidráulico se considera lineal si el flujo es laminar. Aunque el flujo sea turbulento, el sistema se puede linealizar si los cambios en las variables se mantienen pequeño.

El Laboratorio de Control de la Universidad Surcolombiana cuenta con dos bombas AC de  $\frac{1}{2}$  HP las cuales fueron usadas como dispositivos de suministro que generan un caudal máximo de 30 L/min en condiciones óptimas de operación, se usó tubería de PVC de  $\frac{1}{2}$ " para el suministro de agua y se instaló hasta el fondo de los tanques permitiendo eliminar la turbulencia generada por la salida de agua , además generar un caudal de salida del tanque por gravedad al momento de apagar las bombas, esto permite obtener un mejor control cuando el nivel presente en los tanques supera el nivel deseado por el operador.

*Figura 8. Esquema de la tubería del sistema*



**Fuente:** Propia del autor

### 3.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Teniendo en cuenta que la matriz de transferencia  $G(s)$  está dada por la Ecuación 18

$$G(s) = C * (sI - A)^{-1} * B \quad \text{Ecuación 18}$$

se evalúan las matrices A,B,C y D obtenidas de las Ecuaciones 10, 13 y se reemplazan en la Ecuación 18 dando como resultado la matriz de transferencia  $G(s)$  donde cada elemento de la matriz corresponde a las funciones de transferencia  $G_{11}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{21}$  y  $G_{22}$ .

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}$$

donde,

$$G_{11}(s) = \frac{16s + 0.04155}{s^2 + 0.003895 + 1.686 * 10^{-6}}$$

$$G_{12}(s) = \frac{0.02077}{s^2 + 0.003895 + 1.686 * 10^{-6}}$$

$$G_{21}(s) = \frac{1.686 * 10^{-6}}{s^2 + 0.003895 + 1.686 * 10^{-6}}$$

$$G_{22}(s) = \frac{0.001298s + 1.686 * 10^{-6}}{s^2 + 0.003895 + 1.686 * 10^{-6}}$$

Después de tener la matriz de transferencia  $G(s)$ , se calcula la matriz de observabilidad y controlabilidad dadas por las funciones 19 y 20.

$$Co = [A \ AB \ A^2B] \quad \text{Ecuación 19}$$

$$Ob = [C \ AC \ A^2C] \quad \text{Ecuación 20}$$

En [5] se dice que un sistema es controlable en el tiempo  $t_o$  sí se puede transferir desde cualquier estado inicial  $x(t_o)$  a cualquier otro estado, mediante un vector de control sin restricciones, en un intervalo de tiempo finito.

A continuación, se muestra la matriz de controlabilidad

$$\begin{bmatrix} Co_{1,1} & Co_{1,2} & Co_{1,3} & Co_{1,4} & Co_{1,5} & Co_{1,6} \\ Co_{2,1} & Co_{2,2} & Co_{2,3} & Co_{2,4} & Co_{2,5} & Co_{2,6} \end{bmatrix}$$

donde,

$$Co_{1,1} = \frac{1}{A1}$$

$$Co_{1,2} = 0$$

$$Co_{1,3} = -\frac{1}{A1^2 * R1}$$

$$\begin{aligned}
Co_{1,4} &= \frac{1}{A1 * A2 * R1} \\
Co_{1,5} &= \frac{\frac{1}{A1^2 * R1^2} + \frac{1}{A1 * A2 * R1^2}}{A1} \\
Co_{1,6} &= -\frac{\frac{R2}{A1^2 * R1^2} + \frac{R2 * \left(\frac{1}{A2 * R1} + \frac{1}{A2 * R2}\right)}{A1 * R1}}{A2 * R2} \\
Co_{2,1} &= 0 \\
Co_{2,2} &= \frac{1}{A2 * R2} \\
Co_{2,3} &= \frac{1}{A1 * A2 * R1 * R2} \\
Co_{2,4} &= -\frac{\frac{1}{A2 * R1} + \frac{1}{A2 * R2}}{A2 * R2} \\
Co_{2,5} &= -\frac{\frac{1}{A1 * A2 * R1^2 * R2} + \frac{\frac{1}{A2 * R1} + \frac{1}{A2 * R2}}{A2 * R1 * R2}}{A1} \\
Co_{2,6} &= \frac{\left(\frac{1}{A2 * R1} + \frac{1}{A2 * R2}\right)^2 + \frac{1}{A1 * A2 * R1^2}}{A2 * R2}
\end{aligned}$$

Usando Matlab se calcula el rango de la matriz de controlabilidad, obteniendo como resultado que el rango es igual a 2. Debido a que la matriz de controlabilidad tiene dos filas y seis columnas se deduce que la mayor matriz cuadrada que se puede obtener de esta es de 2x2. Teniendo en cuenta lo anterior y que el rango de la matriz es igual a 2 se concluye que el sistema es completamente controlable.

Se dice que un sistema es observable en el tiempo  $t_o$  si, con el sistema en el estado  $x(t_o)$ , es posible determinar este estado a partir de la observación de la salida durante un intervalo de tiempo finito.

A continuación, se muestra la matriz de observabilidad  $[Ob]$ .

$$Ob = \begin{bmatrix} Ob_{11} & Ob_{12} \\ Ob_{21} & Ob_{22} \\ Ob_{31} & Ob_{32} \\ Ob_{41} & Ob_{42} \\ Ob_{51} & Ob_{52} \\ Ob_{61} & Ob_{62} \end{bmatrix}$$

donde,

$$Ob_{11} = 1$$

$$Ob_{12} = 0$$

$$Ob_{21} = 0$$

$$Ob_{22} = 1$$

$$Ob_{31} = \frac{-1}{A1 * R1}$$

$$Ob_{32} = \frac{R2}{A1 * R1}$$

$$Ob_{41} = \frac{1}{A2 * R1 * R2}$$

$$Ob_{42} = \frac{-1}{A2 * R1} - \frac{1}{A2 * R2}$$

$$Ob_{51} = \frac{1}{A1^2 * R1^2} + \frac{1}{A1 * A2 * R1^2}$$

$$Ob_{52} = -\frac{R2}{A1^2 * R1^2} - \frac{R2 * \frac{1}{A2 * R1} + \frac{1}{A2 * R2}}{A1 * R1}$$

$$Ob_{61} = \frac{-1}{A1 * A2 * R1^2 * R2} - \frac{\frac{1}{A2 * R1} + \frac{1}{A2 * R2}}{A1 * R1 * R2}$$

$$Ob_{62} = \left( \frac{1}{A2 * R1} + \frac{1}{A2 * R2} \right)^2 + \frac{1}{A1 * A2 * R1^2}$$

Usando Matlab se calcula el rango de la matriz de observabilidad, obteniendo como resultado que el rango es igual a 2. Debido a que la matriz de observabilidad tiene seis filas y dos columnas se deduce que la mayor matriz cuadrada que se puede obtener de esta es de 2x2. Teniendo en cuenta lo anterior y que el rango de la matriz es igual a 2 se concluye que el sistema es completamente observable.

Teniendo en cuenta el procedimiento para el diseño de sistemas de control multivariable es necesario el uso de desacopladores, estos permiten mitigar las interacciones entre las variables, lo que facilita el diseño del controlador debido a que el sistema resulta en subsistemas independientes de una sola entrada y salida "SISO"; como método de desacople se seleccionó el desacople simplificado.

Es necesario introducir el concepto de matriz de ganancias relativas (**RGA**) donde cada elemento de dicha matriz describe el grado de interacción entre las variables de entrada y salida.

$$RGA = G(0) \times ((G(0))^{-1})^T \quad \text{Ecuación 21}$$

Usando Matlab se evalúa la Ecuación 21 y se obtiene la matriz **RGA** mostrada en la Ecuación 22.

$$RGA = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 22}$$

Los elementos de la matriz RGA obtenida son indicadores de las interacciones entre las entradas y salidas. En este caso particular, la salida uno tiene mayor interacción con la entrada uno y la salida dos tiene mayor interacción con la entrada dos.

Usando las Ecuaciones 6.1 y 6.2 se hallan las funciones de transferencia de los desacopladores, mostradas a continuación.

$$D1(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}$$

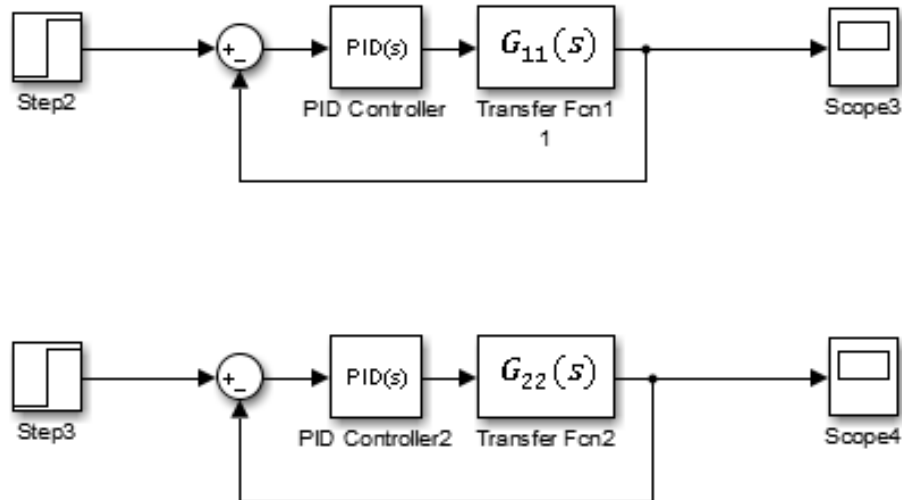
$$D1(s) = \frac{-0.001298s^2 - 5.057 * 10^{-6}s - 2.189 * 10^{-9}}{s^3 + 0.006492s^2 + 1.18 * 10^{-5}s + 4.378 * 10^{-9}}$$

$$D2(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}$$

$$D2(s) = \frac{-0.001298s^2 - 5.057 * 10^{-6}s - 2.189 * 10^{-9}}{s^3 + 0.005194s^2 + 6.743 * 10^{-6}s + 2.189 * 10^{-9}}$$

Usando la herramienta PID Tuner de Matlab se procede a sintonizar los controladores PID para las funciones de transferencia  $G_{11}(s)$  y  $G_{22}(s)$ .

*Figura 9. Diagrama de bloques de las funciones de transferencia con sus controladores PID*

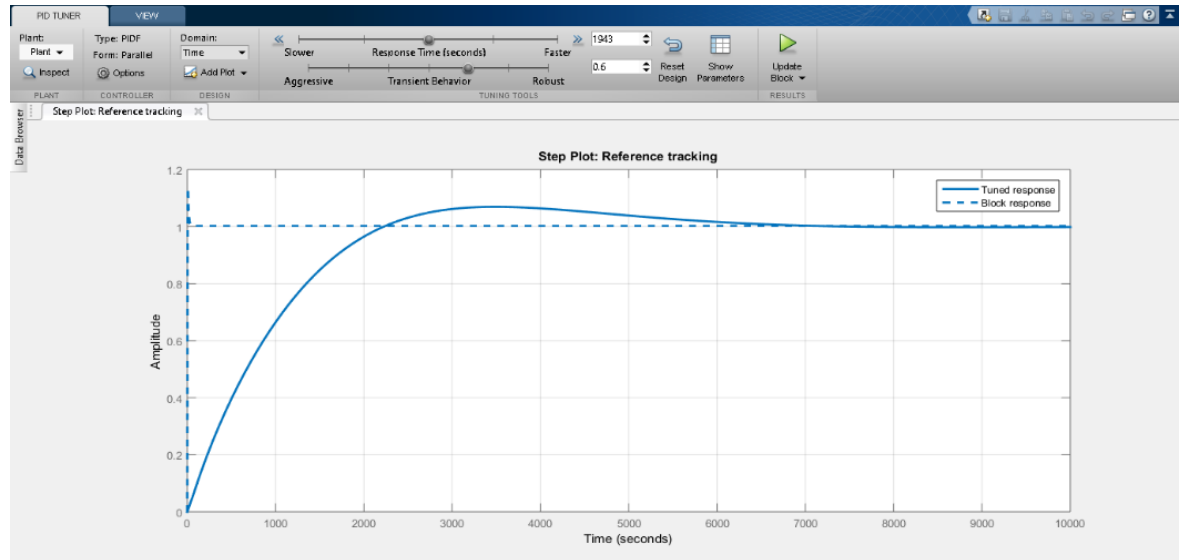


**Fuente.** Propia del autor



La Figura 10 muestra la herramienta PID Tuner usada para sintonizar los controladores.

*Figura 10. Respuesta del sistema controlado*



**Fuente.** Propia del autor

La Figuras 11 y 12 muestran los parámetros PID sintonizados de los controladores para las funciones de transferencia  $G_{11}(s)$  y  $G_{22}(s)$  respectivamente.

*Figura 11. Parámetros PID para  $G_{11}(s)$*

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:

☒ Continuous-time

☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal [Compensator formula](#)

Proportional (P): 0.0004276

Integral (I): 1.348e-06

Derivative (D): -0.0005613

Filter coefficient (N): 0.7619

Tune...

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

**Fuente.** Propia del autor

Figura 12. Parámetros PID para  $G_{22}(s)$

**PID Controller**

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: **PID** Form: **Parallel**

Time domain:

☒ Continuous-time  
☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: **internal** [Compensator formula](#)

Proportional (P): **4.88**

Integral (I): **0.01901**

Derivative (D): **-6.405**

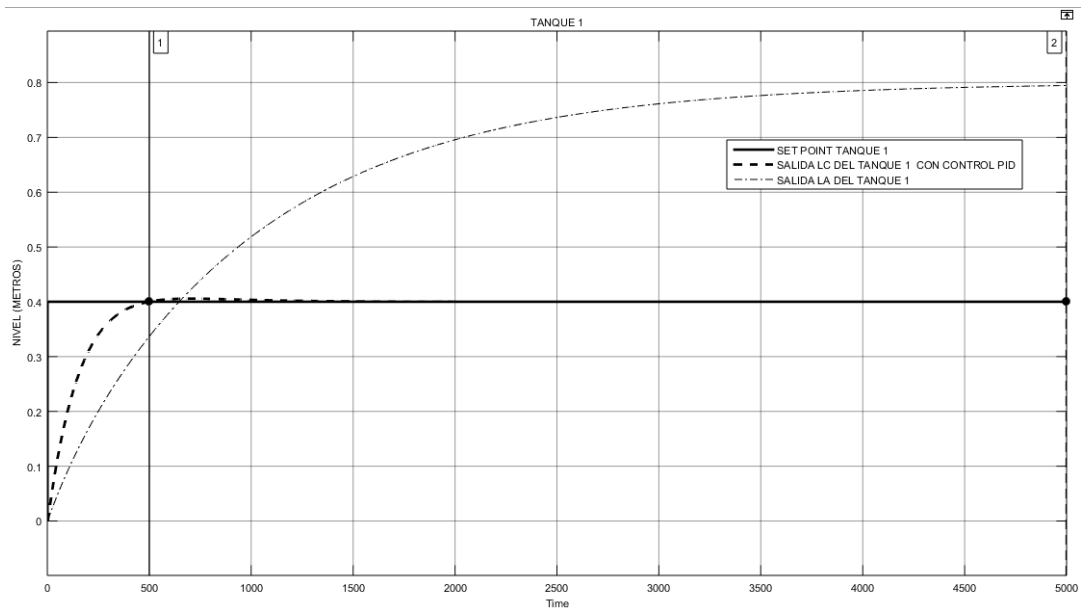
Filter coefficient (N): **0.7619**

**Tune...**

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

**Fuente.** Propia del autor

Figura 13. Respuesta  $G_{11}(s)$  en lazo abierto y lazo cerrado con control



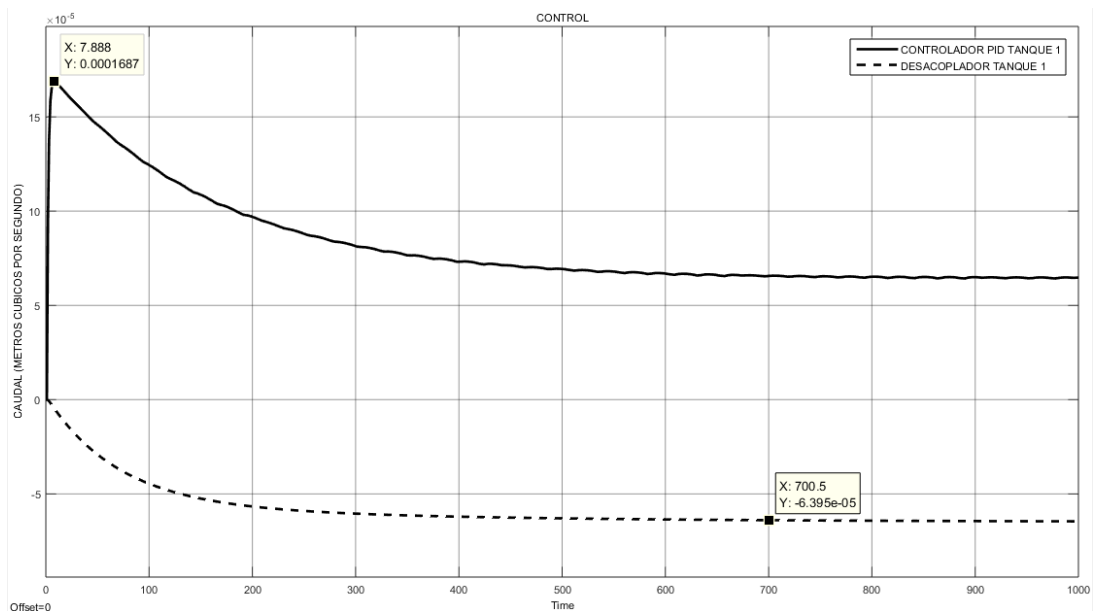
**Fuente.** Propia del autor

La Figura 13 muestra en una línea continua el set point, en una línea punteada y discontinua la respuesta en lazo abierto del nivel del Tanque 1 y en línea discontinua la respuesta con control PID en lazo cerrado.

En la señal que se muestra en la Figura 13 se puede observar que el control PID mejora de manera notable la respuesta de la planta debido a que reduce el tiempo de establecimiento de la planta de más de una hora a poco más de ocho minutos. También se puede observar que el nivel del Tanque 1 en lazo abierto se establece aproximadamente en 80 centímetros, esto es debido a que al no tener control la planta se establece cuando la diferencia de alturas equivale setpoint requerido.

En la Figura 14 se muestra en línea continua la acción de control PID en el Tanque 1 y en línea discontinua la acción del desacoplador del Tanque 1.

*Figura 14. Respuesta del controlador y desacoplador del Tanque 1*

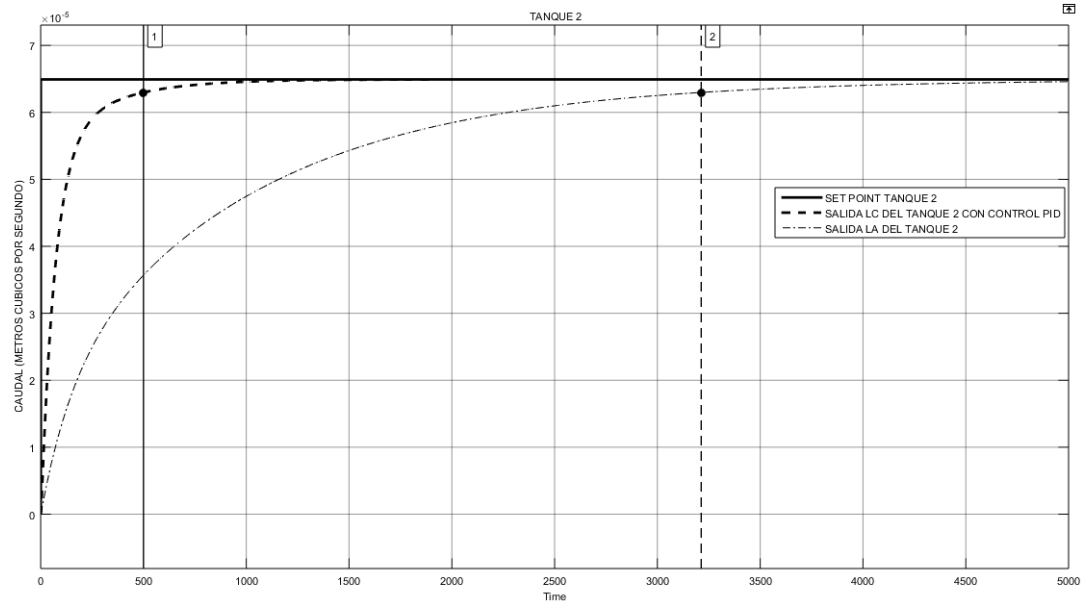


**Fuente.** Propia del autor

En la señal mostrada en la Figura 14 se observa que la señal de control PID para el Tanque 1 le exige a la bomba un pico de caudal de un poco más de 10 L/min para alcanzar el nivel máximo establecido que es de 40 cm. También podemos observar que la señal del desacoplador del Tanque 1 genera un caudal negativo en la entrada del Tanque 1.

La Figura 15 muestra en línea continua el setpoint, en línea punteada y discontinua la respuesta en lazo abierto del caudal de salida del Tanque 2 y en línea discontinua la respuesta con control PID en lazo cerrado.

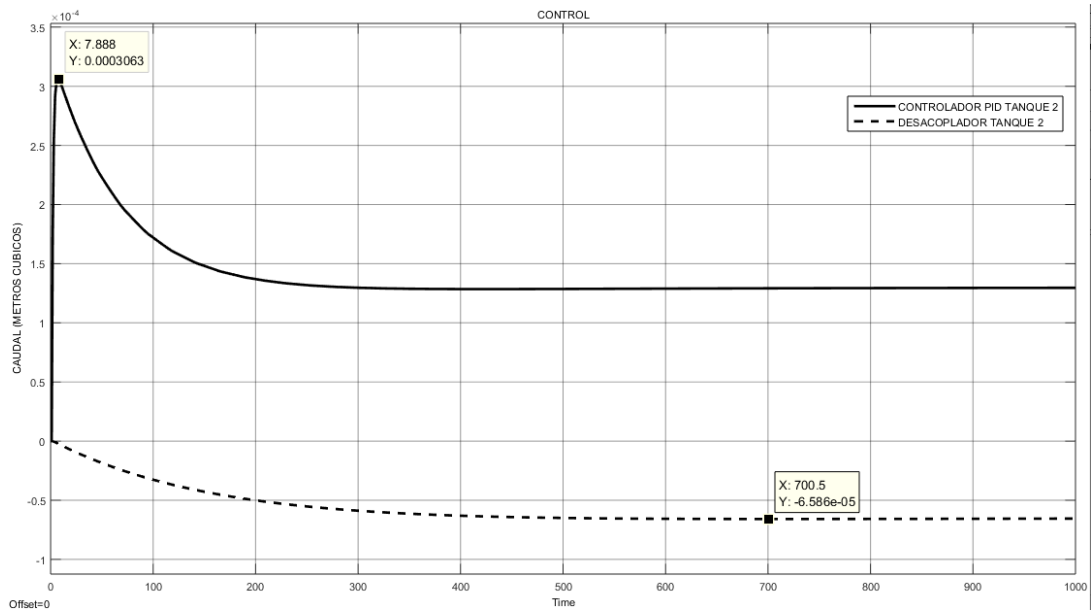
Figura 15. Respuesta  $G_{22}(s)$  en lazo abierto y lazo cerrado con control



Fuente. Propia del autor

En la respuesta que se muestra en la Figura 15 se puede observar que el control PID para el Tanque 2 mejora de manera notable la respuesta del caudal del Tanque 2 debido a que reduce el tiempo de establecimiento de más de una hora a poco más de ocho minutos.

Figura 16. Respuesta del controlador y desacoplador del Tanque 2



Fuente. Propia del autor

En la señal mostrada en la Figura 16 se observa que la señal de control PID para el Tanque 2 le exige a la bomba un pico de caudal de un poco más de 18 L/min para alcanzar el caudal máximo establecido que es 3.9 L/min. También podemos observar que la señal del desacoplador del Tanque 2 genera un caudal negativo en la entrada del Tanque 2.

Como podemos observar en las Figuras 15 y 16 los controladores PID generan unos picos de caudal exorbitantes del orden de decenas de litros por minuto por lo cual se requieren bombas de gran tamaño y aun así el tiempo de establecimiento es aproximadamente de 8 minutos, lo que indica que el sistema sigue siendo lento.

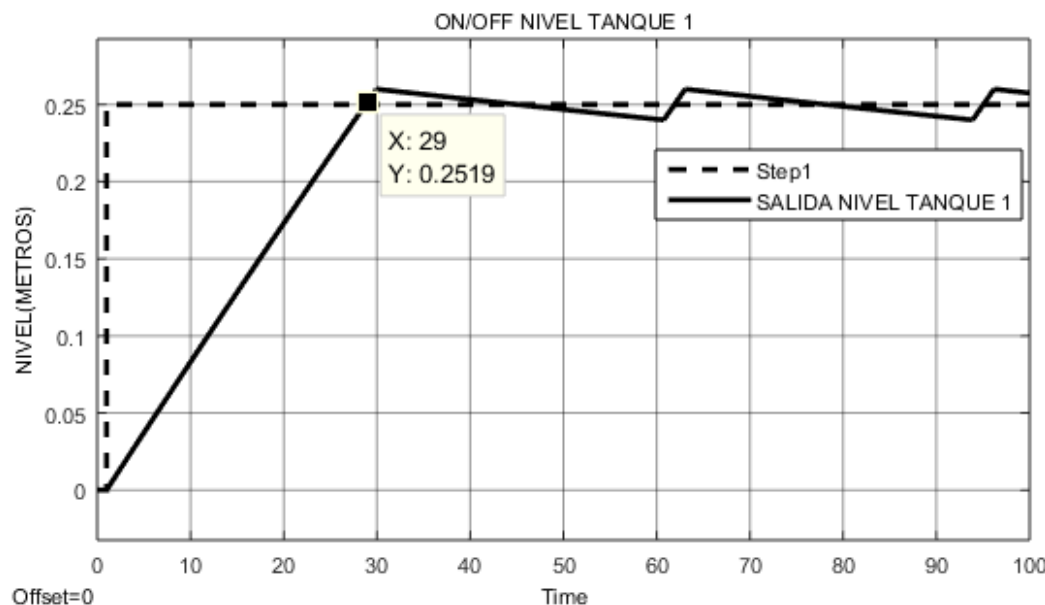
Para la implementación del control PID es necesario usar variadores de frecuencia debido a que las bombas disponibles en la universidad son AC, estos variadores son costosos por lo cual se recurre a implementar un control más económico y que conserve su eficiencia.

### 3.3 CONTROL ON/OFF

Se procede a simular el control ON/OFF con relés que enciendan y apaguen las bombas AC con un caudal fijo de 35 L/min.

La Figura 17 muestra en línea discontinua el setpoint del Tanque 1 y en línea continua la salida de nivel del Tanque 1 con control ON/OFF.

*Figura 17 Respuesta  $G_{11}(s)$  en lazo cerrado con control ON/OFF*

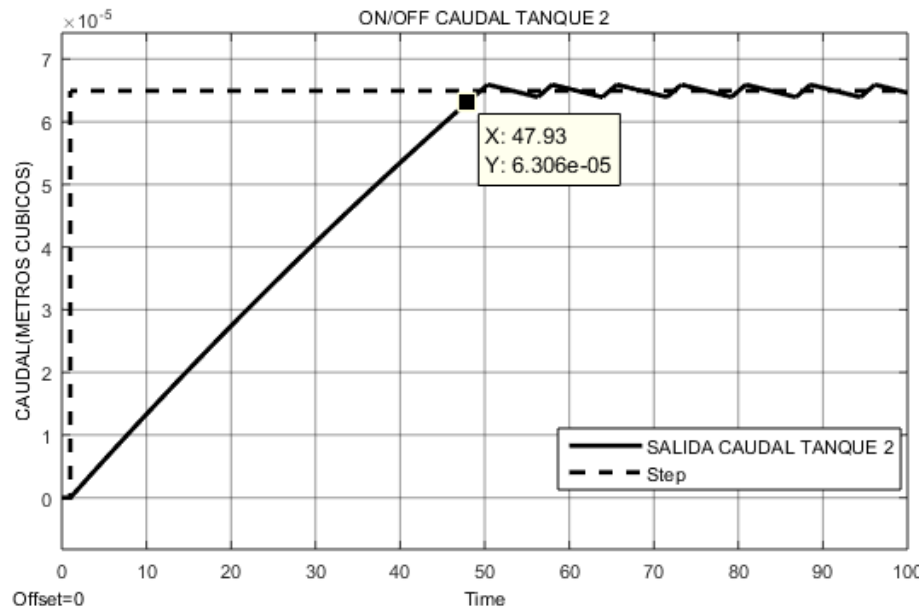


**Fuente.** Propia del Autor

Como se puede observar en la Figura 17, el nivel del Tanque 1 llega al setpoint en menos de 30 segundos.

La Figura 18 muestra en línea discontinua el setpoint del Tanque 2 y en línea continua la salida de caudal del Tanque 2 con control ON/OFF.

*Figura 18 Respuesta  $G_{22}(s)$  en lazo cerrado con control ON/OFF*



**Fuente.** Propia del Autor

En las Figuras 17 y 18 podemos apreciar que el control ON/OFF al igual que el PID cumplen el requerimiento, con la diferencia de que el control ON/OFF es mucho más rápido y que el control PID mantiene un error en estado estacionario constante y que tiende a cero. Sin embargo el rizado en estado estacionario del Control ON/OFF puede ser disminuido en la implementación reduciendo la brecha de encendido y apagado del relé.

## 4. IMPLEMENTACION

La implementación del sistema se compone de los procesos de adquisición de datos, control de variables de proceso e interfaz HMI para visualización e interacción con el usuario.

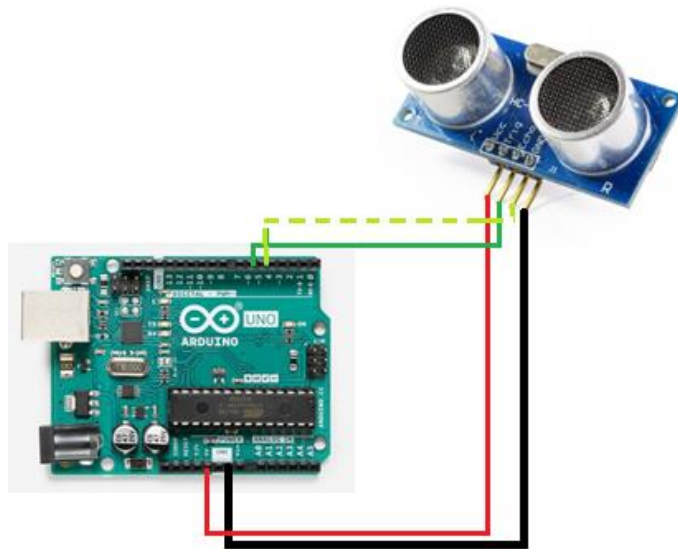
En la etapa de adquisición y control de las variables de proceso se usa la tarjeta ARDUINO UNO y su entorno de desarrollo ARDUINO IDE, para la interfaz HMI se utiliza una computadora que ejecuta el software NI LabVIEW. A continuación se describe con más detalle cada una de las etapas de desarrollo del sistema.

### 4.1 ADQUISICION DE VARIABLES DE PROCESO

Teniendo en cuenta que las variables de proceso son nivel del tanque 1 y caudal de salida del tanque 2, el sistema monitorea el nivel del tanque 2 solo con el fin de mostrar al usuario el estado general del sistema en tiempo real aunque este no se use en la etapa de control.

Para el monitoreo de la variable de **nivel** se elige el sensor HC-SR04 y se configura como se muestra en la Figura 19, es un sensor de distancia de bajo costo que utiliza ultrasonido para determinar la distancia de un objeto en un rango de 5 a 450 cm. Destaca por su pequeño tamaño, bajo consumo energético, buena precisión y excelente precio.

*Figura 19. Se observa el sensor HC-SR04 con su respectiva conexión a la placa de desarrollo Arduino UNO.*



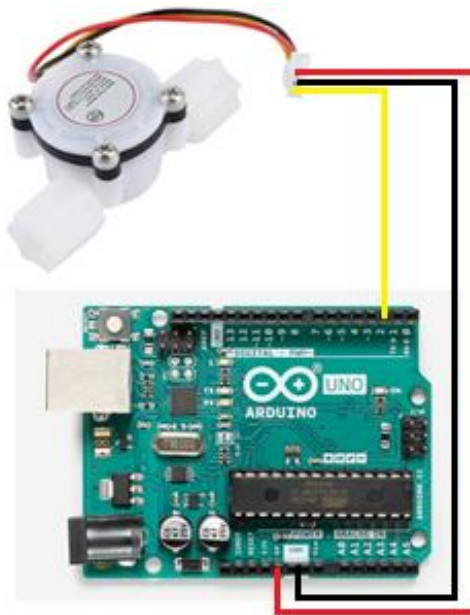
**Fuente** <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>

En lo esencial para su funcionamiento se definen los pines *Echo* como entrada digital y *Trigger* como salida digital, se envía un pulso de 10 microsegundos por el pin *Trigger* el cual habilita el piezoeléctrico y produce una onda ultrasónica e inicia un contador de tiempo, mediante la instrucción *pulseIn(Echo, HIGH)* se detecta un flanco de subida en el pin *Echo* producto de la onda reflejada en el espejo de agua que regresa al receptor piezoeléctrico y detiene el contador de tiempo, así es posible medir el tiempo de vuelo de la onda y determinar la distancia a la cual se encuentra el objeto.

Ahora bien para la variable de proceso **caudal** se usa el sensor YF-S402 que se configura como se muestra en la Figura 20, este cuenta con un rango de monitoreo de 0.3 a 6 L/min y una precisión del 3% y usa la Ecuación 23 suministrada por el fabricante que describe la relación entre caudal y frecuencia del tren de pulsos generado por el sensor.

$$f = (73 * Q) \pm 2\% \text{ donde } Q = [L/min] \quad \textbf{Ecuación 23}$$

Figura 20. Sensor YF-S402 con su respectiva conexión a la placa de desarrollo Arduino UNO.



**Fuente** <https://www.amazon.es/Sensor-YF-S402>

Según la configuración mostrada en la Figura 20 el sensor cuenta con dos líneas para alimentación y otra para datos, la línea de datos se conecta a un pin digital de la tarjeta Arduino que se configura como entrada, se usa una función que produce una interrupción de 1 segundo e inicializa un contador incremental que cuenta todos los pulsos registrados por el sensor durante ese intervalo de tiempo, otra función se encarga de convertir el valor del contador a frecuencia la cual se evalúa en la Ecuación 23 y da como resultado el valor de la variable **caudal**.

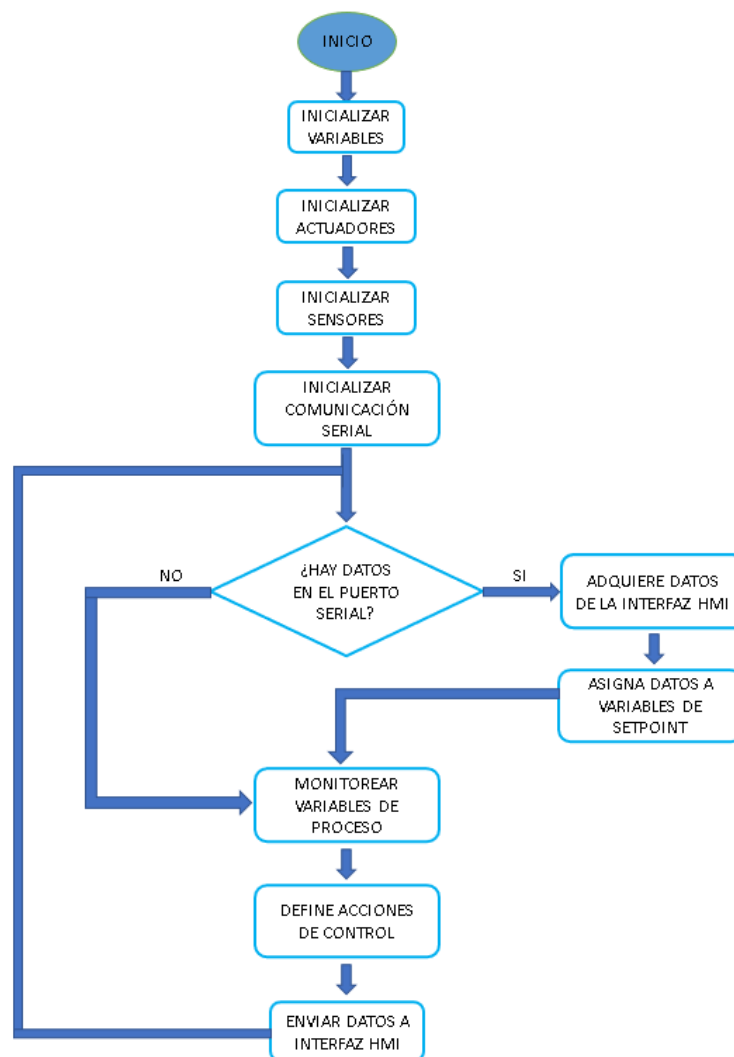


## 4.2 CONTROL DE LAS VARIABLES DE PROCESO

Inicialmente se definen las variables de control de los actuadores (*bomba 1* y *bomba 2*) como salidas digitales de la tarjeta Arduino las cuales habilitan los actuadores (electrobombas AC) por medio de una etapa de potencia. Teniendo en cuenta que se utiliza control *ON/OFF* y una dinámica del sistema lenta es posible realizar las acciones de control mediante una comparación directa entre los *setpoint* y los valores adquiridos de las variables de proceso, en otras palabras significa que el controlador mantendrá activos los actuadores mientras el valor de la variable de proceso permanezca por debajo o sea menor al valor establecido en el *setpoint*.

A continuación se muestra en la Figura 21 el diagrama de procesos del sistema de adquisición y control.

Figura 21. Diagrama de flujo

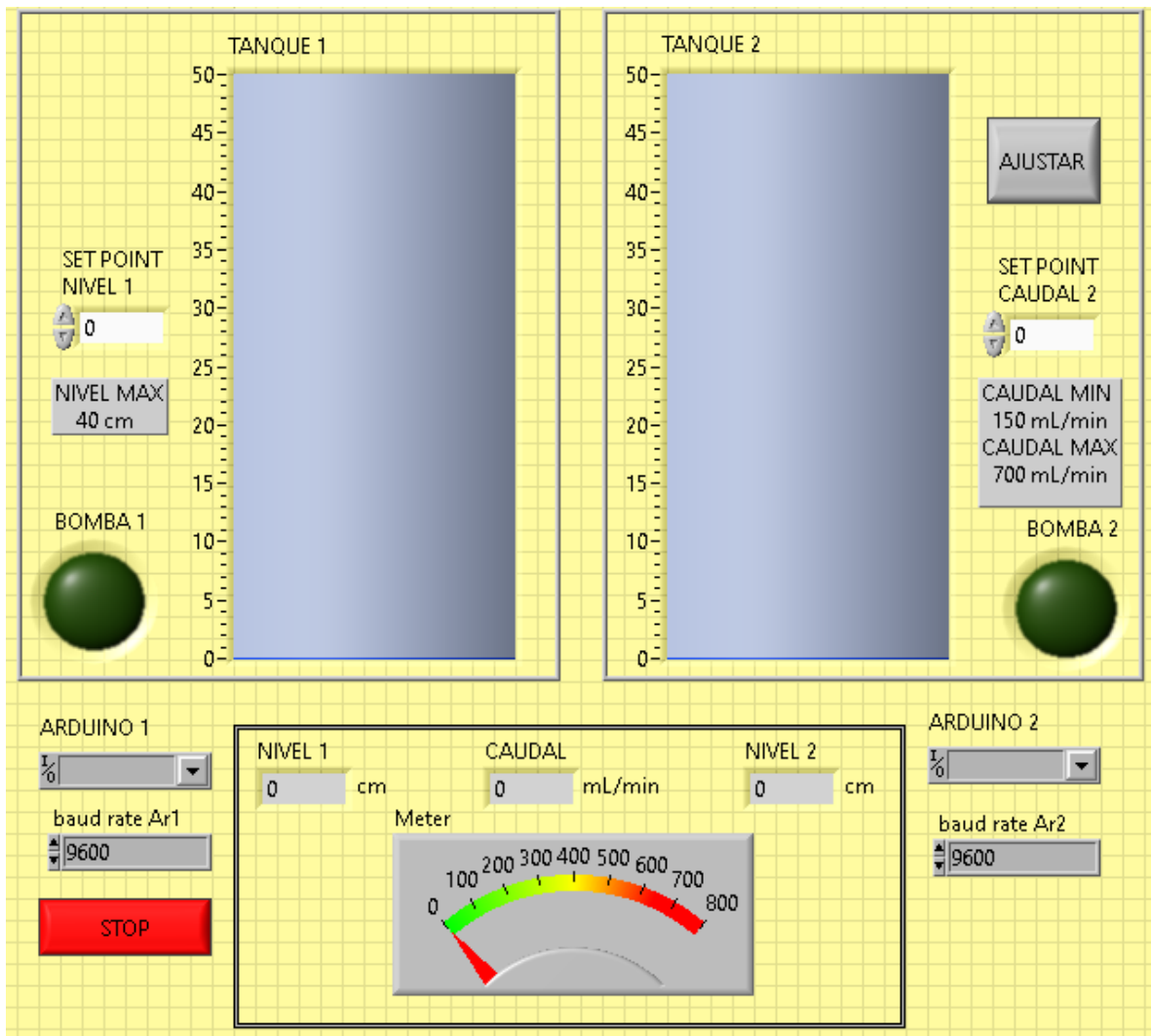


Fuente. Propia del autor

### 4.3 INTERFAZ GRAFICA

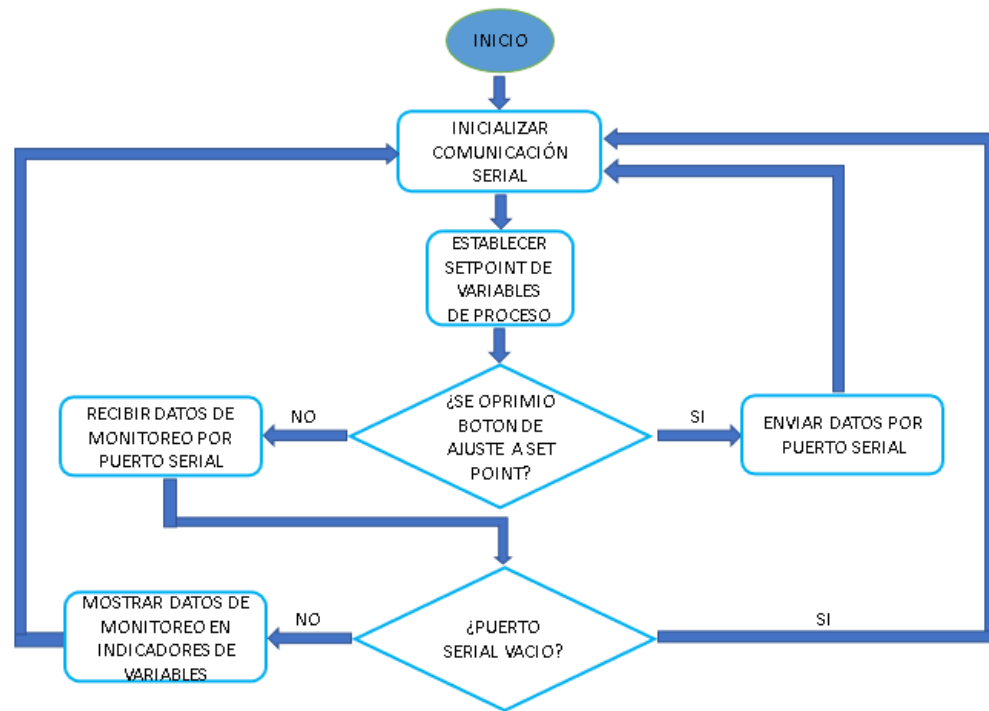
Se desarrollo una interfaz gráfica como la mostrada en la Figura 22 para la operación del sistema donde el usuario puede configurar los *setpoint* y supervisar en tiempo real el estado de las variables de proceso mediante indicadores numéricos y gráficos. La interfaz se ejecuta sobre una computadora que realiza comunicación serial con la tarjeta Arduino para el intercambio de información entre el usuario y el sistema.

Figura 22. Interfaz gráfica



Fuente. Propia del autor

Figura 23. Diagrama de flujo de la interfaz grafica



Fuente. Propia del autor

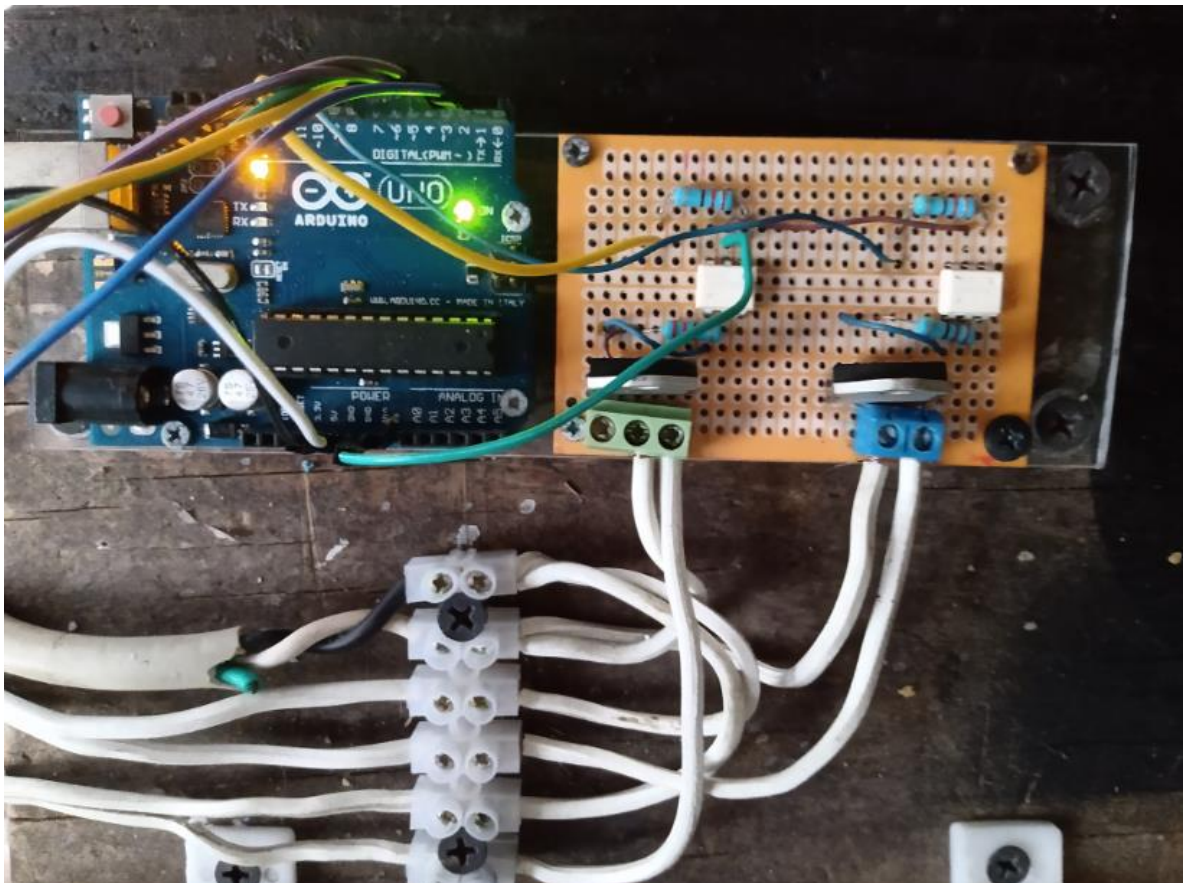
## 5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la construcción de la planta de tanques acoplados y se realizan pruebas de funcionamiento.

### 5.1 RESULTADO HARDWARE DE CONTROL DE LAS ELECTROBOMBAS

El hardware para el control de las electrobombas se implementó a través de un circuito que comprende dos optoacopladores los cuales reciben la señal proveniente de la tarjeta Arduino Uno y estos a su vez activan o desactivan los Triacs encargados de encender o apagar las electrobombas. En la Figura 24 se observa la implementación del hardware para el control de las electrobombas y su conexión a la tarjeta Arduino Uno.

*Figura 24. Hardware del sistema*



**Fuente.** Propia del Autor.

## 5.2 Resultado estructura física de los Tanque Acoplados

*Figura 25. Montaje final del sistema de tanques acoplados*



**Fuente.** Propia del Autor

La estructura física de la planta de Tanques Acoplados se construyó siguiendo las medidas y componentes establecidos en el capítulo 3.1.

### 5.3 Resultado prueba de funcionamiento

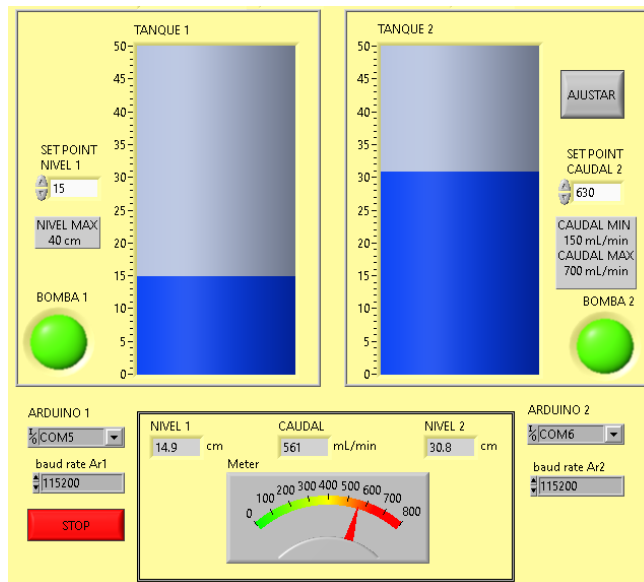
La prueba de funcionamiento se llevó a cabo teniendo en cuenta tres puntos de operación. En el primer punto de operación se ingresa como setpoint un nivel de 15 cm en el Tanque 1 y un caudal de salida de 630 mL/min en el Tanque 2 como se muestra en la Figura 26.

*Figura 26. Respuesta del sistema en el primer punto de operación*



**Fuente.** Propia del Autor

*Figura 27. Respuesta en la interfaz gráfica del primer punto de operación*



**Fuente.** Propia del autor

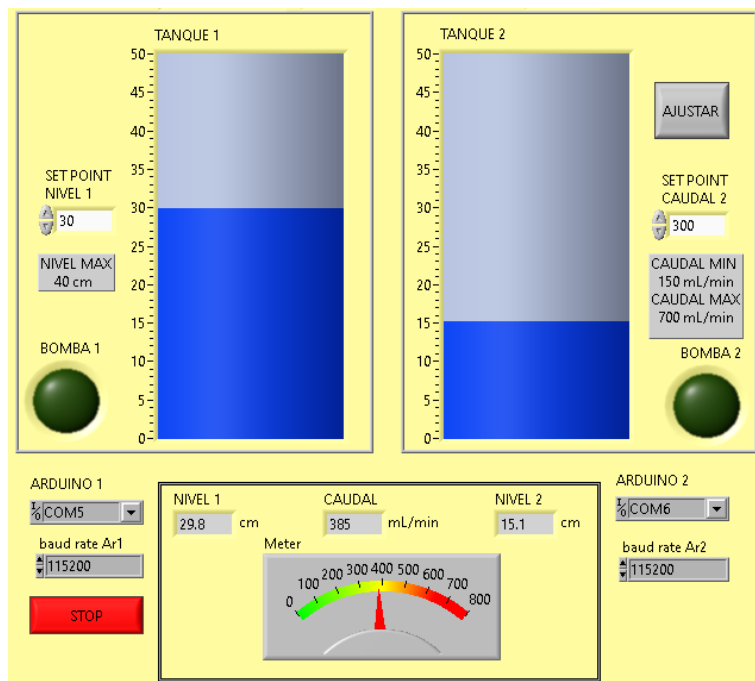
Para el segundo punto de operación se ingresó como setpoint un nivel de 30 cm en el Tanque 1 y un caudal de 385 mL/min a la salida del Tanque 2 como se muestra en la Figura 28.

*Figura 28. Respuesta del sistema en el segundo punto de operación*



**Fuente.** Propia del Autor

*Figura 29. Respuesta en la interfaz gráfica del segundo punto de operación*



**Fuente.** Propia del Autor

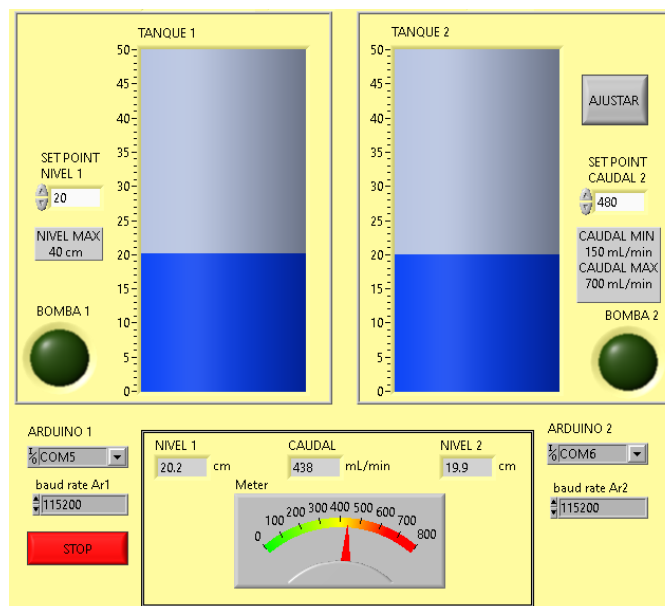
Para el tercer punto de operación se ingresó como setpoint un nivel de 20 cm en el Tanque 1 y un caudal de 480 mL/min a la salida del Tanque 2 como se observa en la Figura 30.

*Figura 30. Respuesta del sistema en el tercer punto de operación*



**Fuente.** Propia del Autor

*Figura 31. Respuesta en la interfaz gráfica del tercer punto de operación*



**Fuente.** Propia del Autor



## 6. CONCLUSIONES

Debe señalarse la importancia de seleccionar adecuadamente las variables manipuladas para ejercer la acción de control sobre las variables de salida del sistema, debido a la complejidad de controlar de manera independiente dos variables que están físicamente correlacionadas. En un inicio el proyecto se concibió con la idea de controlar el nivel y el caudal de una planta de tanques acoplados donde resultaba claro que la interacción de las variables hacía imposible el hecho de controlarlas de manera independiente, por tal razón se construye la nueva planta donde se modifican parámetros físicos que permitan realizar el objetivo planteado lo que provocó una extensión considerable del tiempo de ejecución del proyecto.

Es importante tener en cuenta que durante el proceso de instrumentación de la planta se seleccionó un sensor de caudal de tipo invasivo que modifica las propiedades de resistividad de la tubería restringiendo el caudal de salida, a nivel de modelamiento y simulación esto no es tenido en cuenta puesto que se considera un sensor ideal, en consecuencia el caudal máximo de la simulación difiere un poco del caudal máximo en la práctica.

Teniendo en cuenta el estado del arte y la literatura disponible en la red sobre sistemas de control multivariables donde solo se limitan a simulaciones, se encuentra que la información no da el alcance para la implementación de un sistema como el propuesto en este trabajo donde se evidencia el uso de desacopladores a nivel de simulación e implementación. Cabe resaltar que en la Universidad Surcolombiana los trabajos desarrollados en este tema se fundamentan en considerar que la interacción entre las variables de salida es mínima y por consiguiente un sistemas MIMO se convierte en varios sistemas SISO, facilitando su análisis, modelamiento y control.

Los desacopladores son sistemas que eliminan la interacción entre variables controladas convirtiendo un sistema MIMO en subsistemas independientes SISO, permitiendo implementar un control multivariable con controladores independientes para cada subsistema. En este caso particular los desacopladores generan un caudal negativo a la entrada de los tanques, en otras palabras extraen agua de los mismos. Debido a que el sistema de bombeo de la planta no es reversible se utilizó una configuración de tubería que permite aprovechar la energía potencial del agua y generar el caudal negativo, simulando el comportamiento del desacoplador.

Resulta claro que al momento de construir un sistema es indispensable conocer con anticipación su comportamiento, para esto es importante realizar el modelo y la simulación del mismo antes de llegar a la implementación con el fin minimizar errores y asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

Cabe resaltar que uno de los objetivos de este trabajo fue construir un sistema de tanques acoplados diferente a los comúnmente encontrados en la universidad Surcolombiana. El sistema construido permite al estudiante apreciar y familiarizarse

mejor con la dinámica de los sistemas hidráulicos ya que este presenta un comportamiento más acorde a lo comúnmente encontrado en la industria.

## 7. RECOMENDACIONES

Inicialmente se presentaron muchas dificultades en la implementación de un control para el sistema de tanques acoplados. Esto debido a la escasa información que existe acerca de la implementación de sistemas MIMO y a que no se realizó un análisis exhaustivo a nivel de simulación para determinar el tamaño de los tanques, el tipo de actuadores a usar y el diámetro de la tubería que determina la interacción de los tanques. Del análisis realizado anteriormente se recomienda que para futuros trabajos de este tipo, en donde se implique la construcción y control de una planta se realice con anticipación simulaciones en donde se tenga en cuenta el tipo de actuadores que existen en el mercado y el presupuesto con el que se dispone, de esta forma se diseña un sistema funcional, conforme al presupuesto y acorde a lo que se encuentra en el mercado.

El proceso de desacoplamiento del sistema implementado junto con la configuración de la tubería para aprovechar la energía potencial del agua y de esta forma extraer agua de los tanques funciona muy bien para efectos de aprendizaje en lo que respecta al uso de desacopladores, ¿qué son? y cómo funcionan. Sin embargo, y a pesar de su ingeniosa implementación se recomienda usar electrobombas reversibles con las que se puedan implementar controladores clásicos más avanzados con los que se pueda evidenciar el cambio de polaridad y la dinámica de los desacopladores.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Albertos P. and Sala A. Multivariable Control Systems: An Engineering Approach. 2004. Segunda Edición. Editorial SPRINGER. 358 páginas.
- [2] Garrido Jurado Juan. Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID. 2012. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Escuela técnica superior de ingeniería informática. Departamento de informática y automática.
- [3] Gonzales Miguel E, Vazquez Francisco, Morilla Fernando. Control Multivariable Centralizado con Desacoplo para Aerogeneradores de Velocidad Variable. 2010. ISSN: 1697-7912.
- [4] Morilla F, Vazquez F, Garrido J. Control Centralizado PID 2x2 por Desacoplo.
- [5] Ogata Katsuhiko. Ingeniera de control moderna. 2010. Quinta Edición. Editorial PRENTICE HALL. PEARSON EDUCATION S.A. 908 páginas. ISBN: 978-84-8322-660-5.
- [6] Skogestad Sigurd and Postlethwaite Ian. Multivariable Feedback Control Analysis and Disign. Editorial JOHN WILEY & SONS.
- [7] Wang Qing-Guo, Ye Zhen, Cai Wen-Jian, Hang Chang-Chieh. PID Control for Multivariable Processes. 2008. Editorial SPRINGER. 261 páginas. ISBN: 978-3-540-78481-4.
- [8] Zhu Yucai. Multivariable System Identification for Process Control. 2001. Primera Edición. Editorial PERGAMON. 373 páginas. ISBN: 0-08-043985-3.