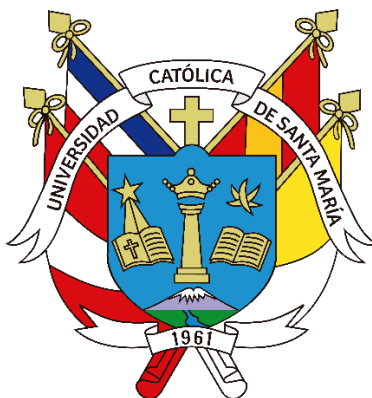


**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL PARA LA  
PRODUCCIÓN DE MATICES**

Tesis presentada por el Bachiller:

**Huamani Barreda, Javier Rodolfo**

para optar el Título profesional de:

**Ingeniero Electrónico con  
especialidad en Automatización y  
Control**

Asesor:

**Ing. Rodriguez Gonzalez, Pedro Alex**

**Arequipa – Perú**

**2024**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA ELECTRONICA**  
**CON ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 18 de Diciembre del 2023

**Dictamen: 011025-C-EPIE-2023**

Visto el borrador del expediente 011025, presentado por:

**2008246061 - HUAMANI BARREDA JAVIER RODOLFO**

Titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL PARA LA PRODUCCIÓN DE MATICES**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**29278874 - DELGADO BARRA LUCY ANGELA**  
**DICTAMINADOR**



**29364669 - QUISPE YAUYO JUAN MEDARDO**  
**DICTAMINADOR**



**29720651 - ZEGARRA GAGO HENRY CHRISTIAN**  
**DICTAMINADOR**



# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL PARA LA PRODUCCIÓN DE MATICES

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

2%

INDICE DE SIMILITUD

2%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

---

## FUENTES PRIMARIAS

---

1

[hdl.handle.net](http://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

1%

2

[tesis.ucsm.edu.pe](http://tesis.ucsm.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

---

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

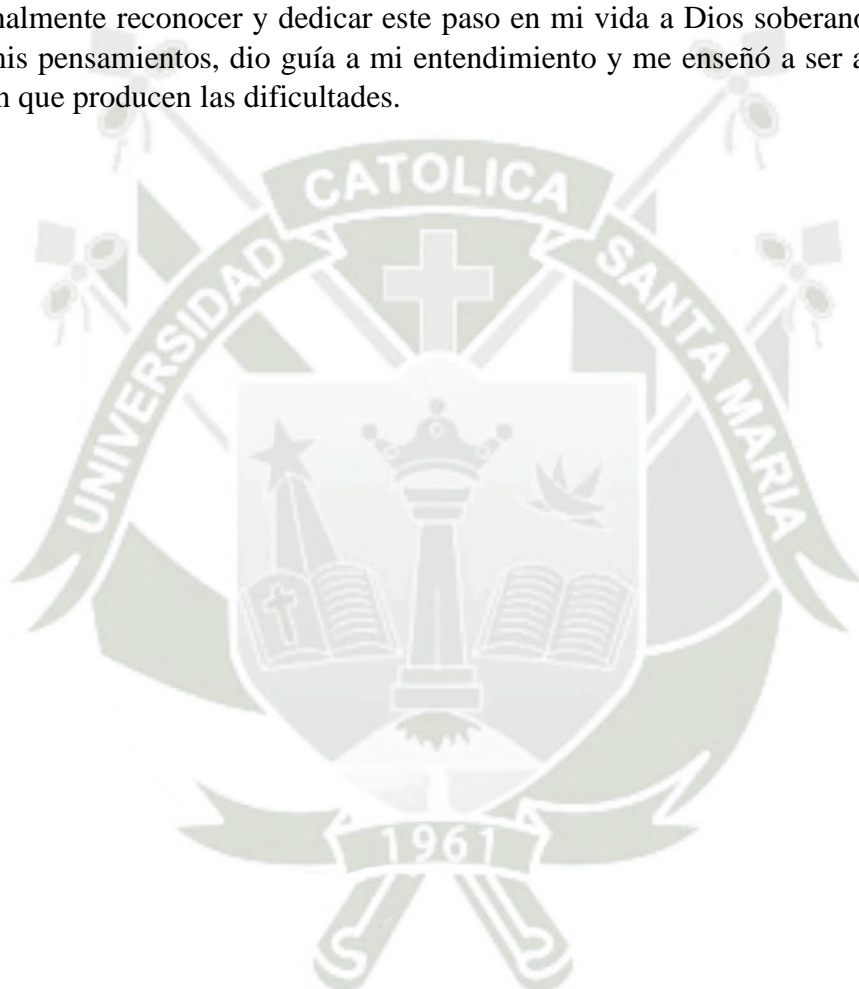
## Dedicatoria

Para hacer mención de la persona que me brindó su apoyo incondicional en todo momento; mi madre Cleofé.

La misma mención a una persona con una gran fortaleza moral, mi padre Javier quien me sirve de inspiración.

Así mismo a mi hermana Dayana quien estuvo conmigo en los mejores momentos de mi progreso profesional.

Y finalmente reconocer y dedicar este paso en mi vida a Dios soberano y creador quien iluminó mis pensamientos, dio guía a mi entendimiento y me enseñó a ser agradecido con la superación que producen las dificultades.



## Agradecimientos

Para mis amistades Álvaro, Cesar, Renato y Paulo quienes me alentaron, motivaron y compartieron conmigo los mejores momentos en este proceso.



**“Siempre hay un camino cuando se usa la inteligencia.”**

Rafael Cutberto Navarro.



## RESUMEN

La presente tesis está enfocada en el proceso de automatización de sistemas industriales. En la actualidad es posible transformar un proceso artesano y empírico en un proceso automático mediante las diversas técnicas de análisis y desarrollo del control automático.

Las ventajas de la automatización en la pequeña, mediana y gran industria, demuestran lo conveniente que resulta automatizar procesos, por ejemplo, una pequeña empresa que matiza pintura de forma artesanal tiene mucha demanda y no logra cumplir con sus pedidos.

En esta tesis se implementa una planta prototipo de producción de matiz de forma automática y se utiliza el algoritmo PI con la finalidad de controlar dos variables en cascada que son el eje del sistema, para esto, se representa el sistema con un modelo matemático mediante ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo, este modelo permite calcular los parámetros que controlan y mantienen el sistema dentro de los resultados deseados con estabilidad. El cálculo de dichos parámetros se realiza a través del método de Asignación de Polos, por ello se trabajará en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Laplace.

Se realizarán pruebas simulando el sistema con el software SIMULINK de Matlab para posteriormente implementar el prototipo real; se utilizará un microcontrolador como unidad de control y un sistema de censado y actuadores para medir y modular el proceso.

Un detalle interesante de esta tesis es que, al variar el matiz, se modifica la proporción entre las cantidades a mezclar y esto cambia las características del sistema; por lo tanto, se desarrollará un algoritmo de sintonización dinámica que proporcione los parámetros PI para cada tipo de matiz.

**Palabras clave:** Parámetros PI, cascada, sintonización dinámica

## ABSTRACT

This thesis is focused on the automation process of industrial systems, currently it is possible to transform an artisan and empirical process into an automatic process through various techniques of analysis and development of automatic control.

The advantages of automation in small, medium and large industry demonstrate how convenient it is to automate processes, for example, a small company that tints paint by hand is in great demand and cannot meet its orders.

In this thesis, the prototype of an automated hue plant is developed, the PI algorithm is used in order to control two cascading variables that are the axis of the system. For this, the system is represented with a mathematical model through differential equations that describe the behavior of the system in the time domain, this model allows calculating the parameters that controls and maintains the system within the desired results with stability. The calculation of these parameters is carried out through the Pole Assignment method, for this reason we will work in the frequency domain applying the Laplace transform.

Tests will be carried out simulating the system with the Matlab SIMULINK software to later implement the real prototype, a microcontroller will be used as a control unit and a sensing system and actuators to measure and modulate the process.

An interesting detail of this thesis is that, by varying the hue the proportion between the quantities to be mixed is modified and this changes the characteristics of the system; therefore, a dynamic tuning algorithm will be developed that provides the PI parameters for each type of hue. **Keywords:** PI parameters, cascading, process, dynamic tuning.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO .....	2
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación e importancia del problema .....	3
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo general .....	4
1.3.2 Objetivo específico .....	4
1.4 Alcances y limitaciones .....	5
1.5 Variables involucradas .....	5
1.5.1 Dependientes .....	5
1.5.2 Independientes .....	6
1.6 Antecedentes relacionados .....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	10
2.1 Principios del control en cascada .....	10
2.2 Diferencia de velocidad de dinámica entre magnitudes físicas .....	10
2.3 Modelo matemático de un proceso .....	12
2.4 Tipos de modelos matemáticos .....	13
2.4.1 Sistema de 1er orden .....	13
2.4.2 Sistema de 2do orden .....	14
2.5 Control P-I por asignación de polos .....	19
2.5.1 Control P-I por asignación de polos para sistemas de 1er orden .....	20
2.5.2 Control P-I por asignación de polos para sistemas de 2do orden .....	24
3. IMPLEMENTACIÓN DE PLANTA PROTOTIPO .....	28
3.1 Instrumentos de medición .....	29
3.1.1 Sensor de flujo .....	29

3.1.2	Sensor de nivel.....	32
3.2	Instrumentos actuadores.....	35
3.3	Controlador del sistema .....	38
3.3.1	Programación de microcontrolador .....	41
3.4	Programa principal (etapa cíclica void loop) .....	51
3.5	Interfaz de supervisión y operación HMI .....	54
4.	DESARROLLO DE LA PLANTA PROTOTIPO .....	60
4.1	Etapas del proceso.....	60
4.1.1	Proporción de mezcla .....	61
4.1.2	Control de flujo.....	62
4.1.3	Suma de flujos .....	62
4.1.4	Control de Nivel .....	63
4.2	Diseño del sistema de control de flujo 2.....	64
4.2.1	Modelo matemático del sistema de flujo 2.....	64
4.3	Suma de flujos.....	70
4.4	Sistema de control de nivel.....	72
4.4.1	Principio de Bernoulli.....	73
4.4.2	Características del sistema.....	75
4.4.3	Planteamiento del modelo matemático.....	77
4.4.4	Simulación vs realidad.....	80
4.5	Control de Nivel.....	83
5.	RESULTADOS .....	92
5.1	Modelo matemático .....	92
5.2	Proporcionalidad entre flujos .....	96
5.3	Sintonización de ganancias dinámicas.....	99
5.4	Producción continua.....	101
5.5	Planta prototipo.....	102

5.6	Sistema HMI .....	105
5.7	Mejora de producción .....	107
	Conclusiones.....	109
	Recomendaciones .....	111
	Referencia.....	112
	Anexos .....	114



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de varias etapas.....	10
Figura 2 Estructura de control en cascada.....	11
Figura 3 Representación de un proceso.....	12
Figura 4 Evolución de variable de proceso.....	13
Figura 5 Variación del factor de amortiguamiento.....	16
Figura 6 Respuesta de 2do orden al escalón unitario.....	16
Figura 7 Estabilidad del sistema.....	19
Figura 8 Sistema de lazo cerrado.....	20
Figura 9 Comportamiento de la variable de proceso.....	22
Figura 10 Sistema de 3er orden.....	25
Figura 11 Respuesta al escalón unitario del sistema de 3er orden.....	26
Figura 12 Flujómetro YF-S401.....	30
Figura 13 Principio de funcionamiento de flujómetro.....	31
Figura 14 Código para lectura de flujo1.....	31
Figura 15 Código de lectura de flujo2.....	32
Figura 16 Sensor de nivel ultrasónico HC-SR04.....	34
Figura 17 Código para leer el Nivel de contenedor.....	34
Figura 18 Ilustración 39 Bomba DP-521.....	37
Figura 19 Circuito de potencia.....	38
Figura 20 Microcontrolador ATmega2560P.....	40
Figura 21 Recepción de señales y distribución de alimentación.....	40
Figura 22 Declaración de señales de entrada y salida.....	42
Figura 23 Configuración de entradas y salidas.....	43
Figura 24 Variables para lectura de flujo.....	44
Figura 25 Código de lectura de Nivel.....	44
Figura 26 Variables para control PI de Flujo2.....	45
Figura 27 Variables para control PI de Nivel.....	46
Figura 28 Código para control PI de flujo2.....	48
Figura 29 Código para control PI de Nivel.....	49
Figura 30 Función completa de control PI para flujo y nivel.....	50
Figura 31 Código para configuración y ajustes generales.....	51
Figura 32 Algoritmo para el cálculo de ganancias dinámicas.....	52

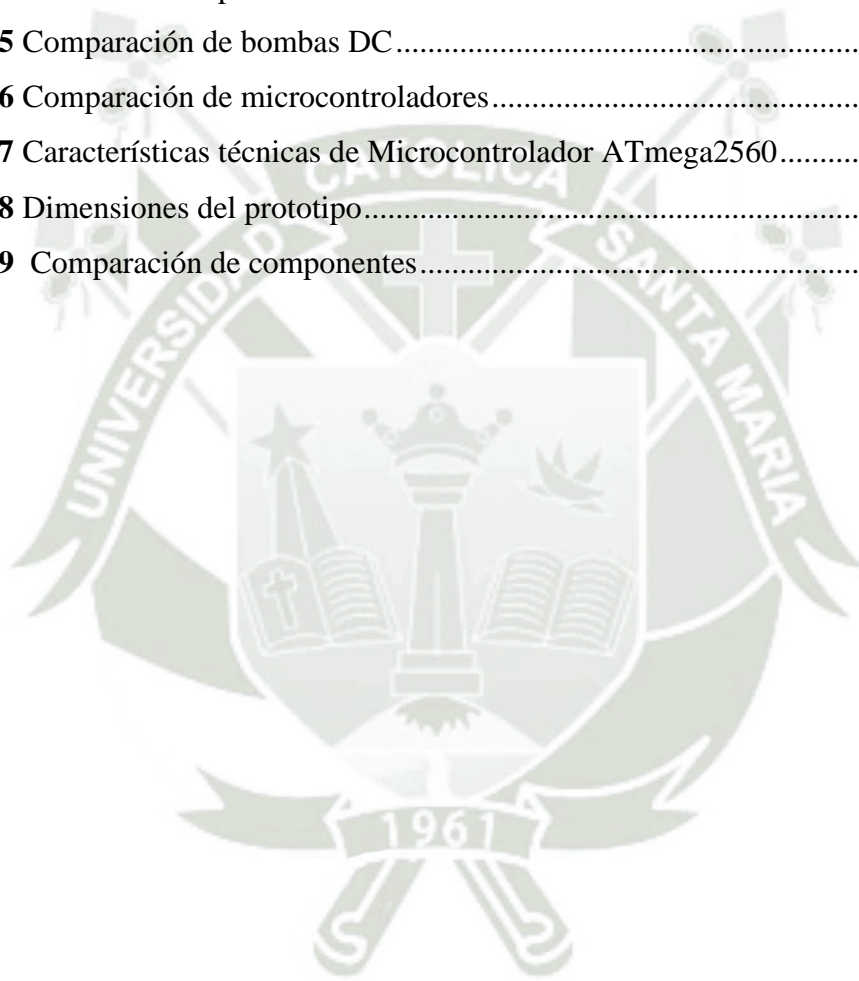
Figura 33 Lectura de Nivel.....	52
Figura 34 Código para lectura de flujo1 .....	53
Figura 35 Código para lectura de fLujo2.....	53
Figura 36 Código para comunicación serial .....	54
Figura 37 HMI equipos desactivados .....	54
Figura 38 HMI Equipos Activados.....	55
Figura 39 HMI simulación de etapa de envasado.....	56
Figura 40 Gráfica tiempo real Flujo1 VS Flujo2.....	56
Figura 41 Gráfica Nivel vs Set Point en tiempo real .....	57
Figura 42 Gráfica Flujo total vs Nivel en tiempo real .....	57
Figura 43 Escritura de datos .....	57
Figura 44 Lectura de datos .....	58
Figura 45 Simulación de envasado y gráficas. ....	58
Figura 46 Sistema de flujos .....	60
Figura 47 Diagrama de señales del sistema (Nivel, Flujo1 y Flujo2) .....	61
Figura 48 Diagrama de bloques de los sub-Procesos del sistema .....	63
Figura 49 Sistema de control de flujo 2.....	66
Figura 50 Respuesta con cero en -1 .....	68
Figura 51 Control de Flujo 2 .....	69
Figura 52 Control realimentado equivalente Flujo 2.....	69
Figura 53 Respuesta control de Flujo 2 .....	70
Figura 54 Sistema de flujos .....	71
Figura 55 Procesos en paralelo (álgebra de bloques) .....	72
Figura 56 Suma de flujos.....	72
Figura 57 Contenedor de Mezcla.....	73
Figura 58 Contenedor de mezcla real para prototipo .....	75
Figura 59 Implementación de Ecuación Diferencial Sistema de nivel.....	80
Figura 60 Respuesta simulada del Nivel (modelo matemático) .....	81
Figura 61 Implementación con función de transferencia .....	81
Figura 62 Nivel con función de transferencia .....	82
Figura 63 Sistema de Flujos y Nivel .....	83
Figura 64 Sistema de Nivel y flujo Realimentado.....	83
Figura 65 Representación del sistema completo .....	86
Figura 66 Representación del sistema completo con función de transferencia.....	87

Figura 67 Flujo total (imagen superior), Flujo 1(imagen media), Flujo 2(imagen inferior)88  
Figura 68 Nivel (imagen superior), Flujo total de entrada (imagen inferior)..... 89  
Figura 69 Respuesta Nivel-Flujo condición inicial 15cm ..... 90  
Figura 70 Panel de selección de color ..... 111



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Comportamiento de sistema de 1er orden y 2do orden .....	18
<b>Tabla 2</b> Comparación de sensores de flujo de efecto Hall.....	29
<b>Tabla 3</b> Comparación de sensores de nivel ultrasónicos .....	33
<b>Tabla 4</b> Características para el sensor de Nivel.....	35
<b>Tabla 5</b> Comparación de bombas DC.....	36
<b>Tabla 6</b> Comparación de microcontroladores.....	39
<b>Tabla 7</b> Características técnicas de Microcontrolador ATmega2560.....	41
<b>Tabla 8</b> Dimensiones del prototipo.....	77
<b>Tabla 9</b> Comparación de componentes.....	103



## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1</b> Modelo de placa para adquisición de datos.....	114
<b>Anexo 2</b> Tabla de equivalencias algebra de bloques.....	115
<b>Anexo 3</b> Datasheet arduino MEGA 2560.....	116
<b>Anexo 4</b> Datasheet sensor HC-SR04 .....	117
<b>Anexo 5</b> Datasheet sensor YF-S401.....	119
<b>Anexo 6</b> Datasheet mosfet IRFZ44N .....	121





## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la creciente demanda de productos hace que los proveedores busquen formas de producción más efectivas y rápidas para poder abastecer a sus clientes. Desde pequeñas empresas a empresas pioneras, se ven en la necesidad de actualizar sus métodos de producción ya que el mismo producto varía y la tecnología avanza a paso agigantado. Para esto la electrónica y la tecnología que van de la mano se hacen presente con múltiples soluciones en un amplio rango de costos, esto según los requerimientos del cliente.

Enfocado al campo industrial, la tecnología de automatización ofrece optimizar procesos de producción desde pequeñas y grandes industrias. La parte central de esta tecnología es la del autómatas controlador; es una computadora industrial y robusta dedicada a la manipulación de señales de entrada, la cual según su aplicación comanda actuadores mediante señales de salida.

Otra parte no menos importante es la de supervisión y operación que es donde los operadores del proceso pueden ver el estado de la planta en tiempo real. Mediante la llegada de señales de sensores e instrumentos de campo podemos plasmar toda la actividad del proceso con exactitud en una pantalla interfaz que nos permite supervisar y realizar ajustes al funcionamiento de la planta.

Poniendo de ejemplo un pequeño proceso de matizados que abastece diversos tonos según los requerimientos de los clientes, al realizar este proceso manualmente es lento y la precisión depende de la experticia del operador, valiéndonos de las herramientas de automatización y supervisión podemos agilizar este proceso y hacerlo automático logrando rapidez y precisión.



## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

### 1.1 Descripción del problema

El proceso manual de matizado se ve mayormente en las pequeñas empresas de venta de pintura. El proceso se da en las siguientes etapas:

- Primero, se almacena en recipientes distintos la cantidad de volumen necesaria que corresponde a cada color, es decir, realizar una medición volumétrica de los colores a mezclar. El matiz resultante se basa en una proporción entre la cantidad de volumen de los colores, por lo tanto, la cantidad de un color será un porcentaje del otro color.

- Una vez almacenadas las cantidades en ambos contenedores, se procede a verter ambos contenidos a un tanque donde ambas serán mezcladas. Este tanque cuenta con un agitador eléctrico o manual que es puesto en marcha durante un periodo para lograr una mezcla uniforme.

- Una vez terminado el proceso de mezcla se abre manualmente un ducto de salida en la parte inferior del tanque para verter la mezcla uniforme en los embaces.

- Si el lote producido en el tanque de mezcla no es suficiente, se repite nuevamente el procedimiento completo hasta completar el lote de matiz solicitado.

A simple vista se puede notar que el proceso no es continuo, por el contrario, es muy pausado ya que debe culminar una etapa para continuar a la siguiente, esto hace lenta la producción al punto de no darse abasto con los pedidos de los clientes, disminuye la calidad de servicio del proveedor y deja a la pequeña empresa sin ventaja alguna ante otros proveedores.

En el caso de que la cantidad que suministra el tanque de mezcla no es suficiente para llenar todos los envases, el proceso debe iniciar de nuevo y así sucesivamente hasta completar la

cantidad de matizado que pidió el cliente, esto hace aún más lento el proceso y se requiere de varios operadores para lograr acelerar la producción.

## 1.2 Justificación e importancia del problema

La evolución de la automatización y el grado de facilidad de acceso a equipos de control de procesos presenta una buena oportunidad para este tipo de situaciones. Los equipos necesarios para hacer autónoma una planta de matizado están al alcance ya que hay diversos proveedores y la creciente oferta hace que los precios sean accesibles.

Con el control de razón entre flujos se lograría garantizar la relación volumétrica entre ambos colores a mezclar y, por lo tanto, garantizar que el matiz resultante sea el deseado. Hasta este punto, lograríamos automatizar el proceso siempre y cuando el matiz que queramos obtener sea uno solo; pero al obtener el modelo matemático del sistema completo, es posible deducir un algoritmo matemático que permita calcular los parámetros PI adecuados para el sistema, considerando que para obtener matices distintos es necesario modificar el factor de razón entre las dosis y que esto modifica la dinámica del sistema, por lo tanto, es necesario calcular nuevamente los parámetros PI.

Al controlar el nivel del contenedor de mezcla y mantenerlo a una altura fija, se lograría un flujo de salida constante por la presión hidrostática, esto le daría continuidad a la etapa de envasado y la producción sería continua.

Considerando lo mencionado, la producción se daría en menos tiempo, el matiz sería preciso y las pérdidas se reducen al disminuir la probabilidad de fallo en el matiz resultante. Se podría abastecer a más clientes y la rentabilidad mejoraría

Al presentar una solución y demostración mediante una pequeña planta prototipo del proceso de matizado, se ofrece un panorama para las pequeñas empresas en el que automatizar sus procesos sea posible y esté a su alcance para mejorar las circunstancias de su negocio.

Por otro lado, aportar al fortalecimiento de las pequeñas y medianas empresas con las ventajas que nos ofrece la automatización de procesos, permite fomentar el desarrollo y esparcimiento de esta tecnología, cubriendo así necesidades y haciéndola cada vez más indispensable.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar un sistema de control PI en cascada para la producción de matizado.

#### **1.3.2 Objetivo específico**

1. Obtener un modelo matemático que describa el comportamiento del proceso de matizado.
2. Lograr mantener una relación proporcional constante entre los colores a mezclar para obtener el tono de matiz deseado. Dicha relación proporcional debe ser robusta ante la dinámica de los fluidos dentro del proceso de la planta.
3. Diseñar un algoritmo matemático que permita sintonizar automáticamente las ganancias Proporcional Integral dinámicas que dependen de la proporción entre las cantidades a mezclar, esto con la finalidad de que la planta sea capaz de generar diversos matices sin dejar de ser funcional.
4. Lograr continuidad en la producción de mezcla haciendo que el flujo de suministro para el envasado sea constante.
5. Implementar una planta prototipo a partir de la selección adecuada del controlador, sensores y actuadores.

6. Optimizar el tiempo y cantidad de producción del proceso de matizado mediante la automatización.

#### **1.4 Alcances y limitaciones**

1. La planta prototipo de matizado tendrá la capacidad de combinar dos colores y variar la proporción entre el volumen del primer color y el volumen del segundo color. Con esto será posible demostrar la funcionalidad del prototipo respecto a los objetivos planteados.

2. La sustancia que será utilizada para la demostración de matizado será agua con tinte colorante ya que la densidad del líquido no afecta en el flujo volumétrico que es lo que define el matiz, la densidad es considerada solo para la elección adecuada de sensores y actuadores que tengan la capacidad de trabajar con el fluido del proceso.

3. El diseño real de la planta contará con arreglos y modificaciones que permitirán contrarrestar los efectos negativos ocasionados por factores que escapan al diseño en simulación.

4. Implementación de un algoritmo matemático, basado en la asignación de polos, que permita obtener las ganancias P-I automáticamente según requiera la proporción de mezcla que se esté aplicando.

#### **1.5 Variables involucradas**

Podemos identificar las variables como dependientes (variable de proceso) e independientes (variable de control).

##### **1.5.1 Dependientes**

- Matiz resultante.

- Relación proporcional entre flujos
- Cantidad de producción en un tiempo determinado (Litros/tiempo).
- Auto sintonización de parámetros PI en el control de Nivel.
- Nivel de tanque (cm): Altura a la cual se encuentra lleno el tanque donde se realiza la mezcla.

### 1.5.2 Independientes

- Planta prototipo de matizado.
- Proporción de mezcla: Razón de volumen necesaria entre los dos elementos primarios para lograr el matiz deseado.
- Flujo volumétrico ( $cm^3/s$ ): Intensidad de flujo de salida de los contenedores 1 y 2.
- Set Point: Punto de consigna a la cual se desea mantener las variables dependientes.

### 1.6 Antecedentes relacionados

En diversos procesos de producción industrial, se presentan diversas dificultades por la intervención de distintos factores físicos que afectan el funcionamiento de la planta. El control PID es una gran solución ya que nos permite eliminar los ruidos existentes y continuar con la producción de forma automática.

El sistema de control PID se consolidó en 1911 gracias a Elmer Sperry que aplicó su sistema a la automatización de la dirección de los barcos para reproducir el comportamiento de un timonel, este tenía que compensar las variaciones persistentes y predecir futuras variaciones en alta mar para la Armada de los Estados Unidos (Moreno, 1999).

A medida que se va haciendo complejo el sistema por la intervención de otras magnitudes físicas el control PID deja de ser suficiente, sobre todo en los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas ya que básicamente el control realimentado PID controla una sola variable en

su salida, recibe una sola magnitud realimentada y a la vez una sola referencia. Aquí es donde entra a tallar la tecnología del sistema de control en cascada.

En sistemas donde la dinámica de las variables a controlar es diferente, es decir unas son más lentas o rápidas que otras, se sugiere dividir en etapas el proceso y establecer puntos de medida para diseñar sistemas de control dedicado a cada etapa (Castaño, 2020).

Como muestra Díaz (2017) en la tesis de diseño de un sistema de control en cascada en una planta de intercambio térmico, se aborda el caso de un sistema de control de temperatura. La variable de control es la apertura de una válvula proporcional para la admisión de un fluido calentador (vapor) a través del algoritmo PID; este fluido sufre cambios de presión dentro de la tubería por diversas razones lo cual afecta al flujo como un ruido externo, esta dinámica interna es mucho más rápida que la dinámica general de la temperatura por lo cual el sistema de control de temperatura no podrá contrarrestarlo por su lentitud y se verá reflejado como ruido en la temperatura de salida. Para solucionarlo dividieron el proceso en dos etapas, una interna (control de flujo) y otra externa (control de temperatura). La salida de control de temperatura ahora cumpliría el papel de Set Point para el sistema de control de flujo, el cual eliminaría las perturbaciones internas y como resultado proporciona un flujo bien regulado para poder controlar la temperatura (Díaz, 2017).

De forma similar en la sección de Control en cascada del sitio web Control Automático Educación, aborda un sistema en el cual se requiere controlar el nivel de un tanque a través del control de flujo de entrada manipulando la apertura de una válvula, a la vez se usa un control PI interno de dicho flujo de entrada anulando las variaciones que se producen por cambios de presión dándose así un sistema en cascada. Se obtiene un sistema robusto y con una dinámica más rápida en su seguimiento al Set Point (Castaño, 2020).

Aunque el enfoque de lo citado anteriormente (lograr anular perturbaciones internas) no es el mismo que se aplica en esta tesis, sirve como fundamento para el diseño propuesto ya que también se requiere dividir en dos etapas el sistema, generando así un lazo de control interno (flujo) y otro externo (Nivel) para conseguir la proporción de componentes exacta y lograr el matiz deseado.

El primer controlador dedicado a la industria se instaló en la refinería de Port Artur, en Texas, su aplicación en control de procesos es un salto tecnológico enorme ya que permite las siguientes aplicaciones (Moreno, 1999):

- Adquisición de datos: Recoge, trata y almacena datos de la planta en tiempo real.
- Supervisión: Esta función no la efectúa directamente el computador, se conecta a dispositivos que sirven como interfaz para la interacción entre el humano y la máquina (HMI) a través de una pantalla representativa. El computador suministra la información.
- Control secuencial: A través de un programa cargado en el autómata.
- Control digital: Ejecuta procesos continuos recibiendo y emitiendo señales digitales.

Se optó por usar un Arduino para el desarrollo de la tesis “Modelamiento y control de velocidad de motor DC mediante algoritmo PID en base a Ziggler y Nichols con éxito, queda un claro ejemplo de la gran ventaja al usar un computador para controlar un proceso. En estos tiempos, con fines educativos existen diversas herramientas de software que nos permiten inclusive simular sistemas (Valdivia, 2021).



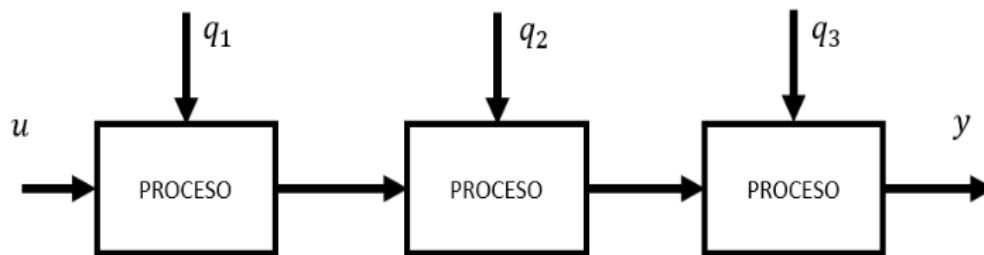
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Principios del control en cascada

El control en cascada es una estrategia usada para el diseño de sistemas realimentados con la finalidad de controlar de una forma más eficiente.

Para un mejor entendimiento, vamos a suponer un proceso industrial cualquiera que pueda ser dividido en varias etapas, la variable controlada va transitando por cada una de estas etapas, pero en cada una de estas etapas es introducida una perturbación que afecta el control de la variable principal como se muestra a continuación.

*Figura 1 Proceso de varias etapas*



*Nota: Castaño (2019)*

Si se pudiera medir la perturbación que se introduce en cada etapa, se la podría realimentar como variable intermedia y eliminar esa perturbación. Por otro lado, dejar que estas perturbaciones se acumulen para luego ser contrarrestadas por el controlador final resultará en una dinámica muy lenta y torpe; sin embargo, eliminando cada perturbación con un sistema de control dedicado a cada etapa se lograría mayor calidad y precisión en el proceso (Castaño, 2019).

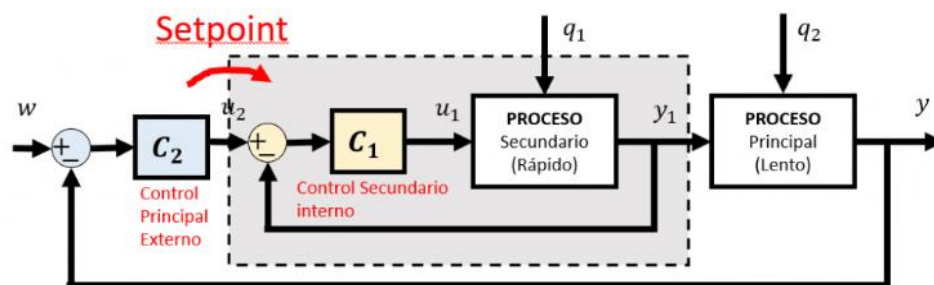
### 2.2 Diferencia de velocidad de dinámica entre magnitudes físicas

En un sistema de control realimentado, se tiene la variable de control y variable controlada (también conocida como variable de proceso). Intuitivamente se puede deducir que se controla

la variable de proceso a través de la variable controlada. Ocurre en muchos procesos que, tanto la variable de control como la variable controlada sufren perturbación, el efecto de esto es mayor dificultad para controlar la variable de proceso y riesgo de inestabilidad sin mencionar la pérdida de eficiencia. Si comparamos lo que tarda en manifestarse la temperatura y la presión, notaremos que la presión se manifiesta mucho más rápido que la temperatura, por lo tanto, la dinámica de la presión es mucho más rápida que la temperatura. Esto es importante ya que el sistema de control P-I puede eliminar cualquier perturbación que afecte a la variable de proceso, siempre y cuando la velocidad de la dinámica de la perturbación se de a una velocidad cercana a la de la dinámica de la variable de proceso.

Si se divide el proceso en dos etapas; una etapa principal donde se controla la variable de proceso según su dinámica y otra en donde se controla la perturbación, tendremos un lazo de control realimentado dentro de otro lazo de control principal.

*Figura 2 Estructura de control en cascada*



*Nota: Castaño (2009)*

Como se muestra en la figura, note que la señal de salida del control principal es el setpoint para el control secundario interno.

### 2.3 Modelo matemático de un proceso

En la ingeniería es muy común describir los procesos según sus características para poder ser analizados. Por ejemplo, un sistema de intercambio de calor puede ser modelado matemáticamente para analizar su estabilidad.

Una forma es representar el proceso mediante ecuaciones diferenciales que describan el comportamiento del sistema. Para esto se deben identificar las magnitudes físicas que intervienen en el proceso y que relación existe entre estas.

El beneficio de expresar el sistema en un modelo matemático en función de la variable que se desea controlar, es que ahora se podrá simular el comportamiento del sistema. Para realizar pruebas se debe excitar el sistema con una entrada y ver la evolución de la variable controlada en el tiempo.

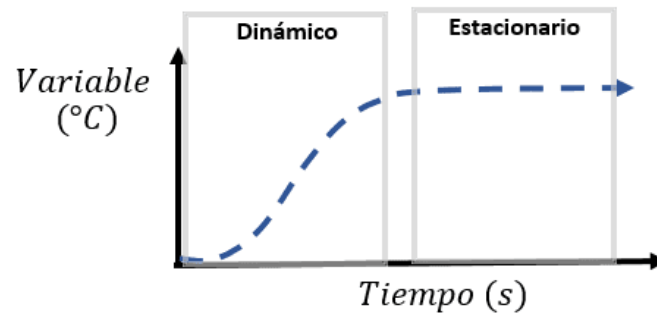
*Figura 3 Representación de un proceso*



*Nota: Castaño (2017)*

En un proceso estable, se puede describir el comportamiento de la variable de control a través del tiempo en dos etapas; etapa dinámica y etapa estacionaria.

Figura 4 Evolución de variable de proceso



Nota: Castaño (2017)

## 2.4 Tipos de modelos matemáticos

Según la relación que guarde la naturaleza de la variable de proceso y las magnitudes físicas que intervienen en el sistema, obtendremos ecuaciones diferenciales que podrían ser de 1er, 2do o 3er orden.

### 2.4.1 Sistema de 1er orden

Estos son representados por ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, es decir que la derivada máxima es de orden 1. Teniendo en cuenta de que la ecuación diferencial sea lineal y de coeficientes constantes con condición inicial cero, la ecuación tendría la siguiente forma:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) \quad (1)$$

La resolución de ecuaciones diferenciales resulta muy compleja, por lo cual con fines de simplificación recurrimos a la herramienta de la transformada de Laplace, que permite pasar del dominio del tiempo  $y(t)$  al dominio de la frecuencia  $y(s)$ , de este modo podemos tratar la ecuación algebraicamente (Castaño, 2017).

Aplicando Laplas en la expresión anterior se obtiene:

$$\frac{Q(s)}{R(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2)$$

Donde:

- $Q(s)$  es la salida que describe el comportamiento de la variable de proceso en el tiempo.
- $R(s)$  es la entrada de excitación para el proceso, en este caso la variable de control.
- $k$  es la ganancia estática del sistema de primer orden.
- $\tau$  es la constante de tiempo del sistema.
- $\theta$  es el retardo de tiempo en el sistema.

Esto nos permite hallar la ubicación del polo y por lo tanto determinar el comportamiento de la variable de proceso según sea el valor de  $\tau$  y  $k$ .

$$\tau s + 1 = 0$$

$$s = -\frac{1}{\tau}$$

Igualmente aplicando la transformada inversa de Laplace podemos obtener una expresión que describa el comportamiento de la variable de control en función del tiempo.

$$h(t) = Ak(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

#### 2.4.2 Sistema de 2do orden

En esta ocasión nos encontramos sistemas representados por ecuaciones diferenciales de segundo orden, considerando que son lineales, de coeficientes constantes y condiciones iniciales igual a cero, tendríamos la siguiente ecuación diferencial representativa.

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) \quad (4)$$

El segundo orden lo da la máxima derivada de la ecuación que en este caso es 2.

Al igual que en los sistemas de primer orden, aplicamos Laplace con fines de simplificación, obteniendo la siguiente expresión en el dominio de la frecuencia compleja S.

$$\frac{Q(s)}{R(s)} = k \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

Donde:

- $Q(s)$  es la salida que describe el comportamiento de la variable de proceso en el tiempo.
- $R(s)$  es la entrada de excitación para el proceso, en este caso la variable de control.
- $k$  es la ganancia estática del sistema de primer orden.
- $\omega_n$  es la frecuencia natural no amortiguada del sistema, esta es la frecuencia a la cual el sistema seguirá vibrando aún después de que la excitación de entrada se retire.
- $\delta$  es el factor de amortiguamiento.

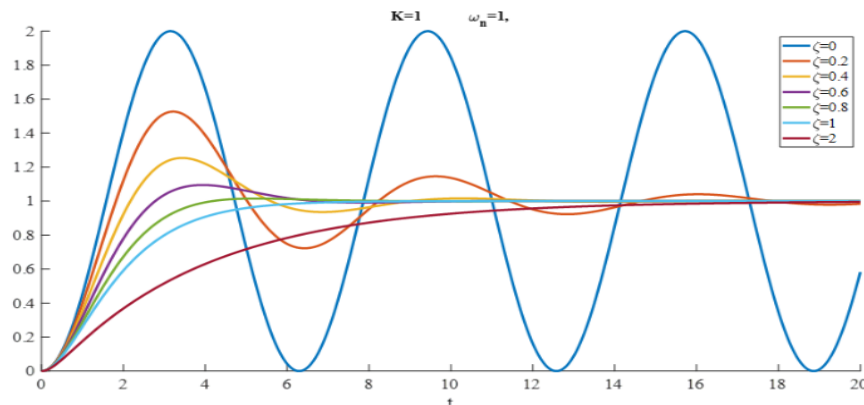
La existencia de un factor de amortiguamiento nos da a entender que existe algún componente capaz de disipar la energía del sistema (Castaño, 2020).

El factor de amortiguamiento normalmente toma valores entre 0 y 1; según su valor podríamos denominarlo como:

- $\delta = 0$  Sistema oscilatorio.
- $0 < \delta < 1$  Sistema Subamortiguado.
- $\delta = 1$  Sistema críticamente amortiguado.
- $\delta > 1$  Sistema sobre amortiguado.

Ante la variación del factor de amortiguamiento tenemos la siguiente dinámica.

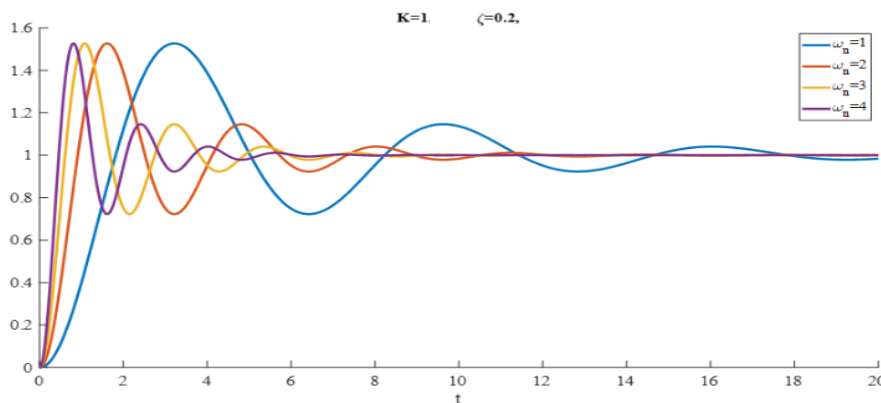
Figura 5 Variación del factor de amortiguamiento



Nota: Castaño (2020)

Según sea el valor que tome la frecuencia natural no amortiguada, la respuesta ante una excitación escalón unitario tendrá la siguiente forma:

Figura 6 Respuesta de 2do orden al escalón unitario



Nota: Castaño (2020)

De igual modo mediante la expresión matemática que relaciona la entrada de excitación con la salida, llamada también Función de Transferencia, podemos obtener la ubicación de los polos; esto nos permite entender las características del comportamiento de la variable del proceso en el tiempo.

Partiendo de la función de transferencia:

$$\frac{Q(s)}{R(s)} = k \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

Si igualamos el denominador a cero obtendríamos los valores de S para los cuales la función de transferencia tiende al infinito, es decir:

$$s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (7)$$

Si aplicamos la ecuación general para encontrar las raíces de un polinomio de segundo grado encontramos que podríamos obtener raíces reales, raíces complejas o complejo conjugadas.

$$s_{1,2} = -\delta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\delta^2 - 1} \quad (8)$$

Según sea el valor que tome la variable compleja S tendremos los siguientes casos:

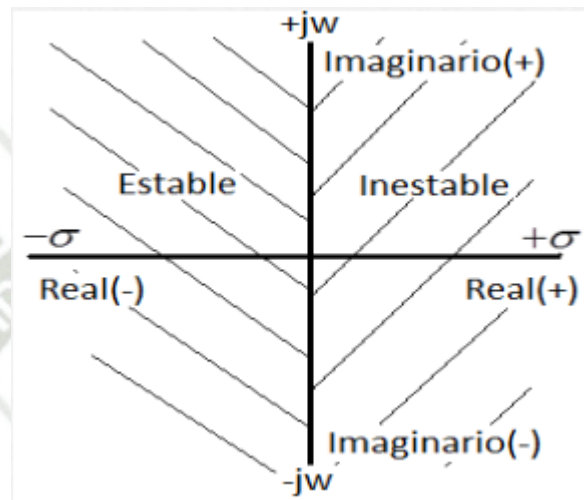
**Tabla 1** Comportamiento de sistema de 1er orden y 2do orden

Polo	Expresión en frecuencia S	en tiempo $L^{-1}$	Expresión en tiempo $L^{-1}$	Respuesta temporal
<p><math>s_1 = -\sigma</math></p>	$\frac{A}{s + \sigma}$		$Ae^{-\alpha t}$	<p>ABSOLUTAMENTE ESTABLE</p>
<p><math>s_1 = -\sigma \pm j\beta</math></p>	$\frac{As + B}{(s + \sigma)^2 + \beta^2}$		$Ce^{-\alpha t} \sin(\beta t + \phi)$	<p>ABSOLUTAMENTE ESTABLE</p>
<p><math>s_1 = 0</math></p>	$\frac{A}{s}$		$A$	<p>RELATIVAMENTE ESTABLE</p>
<p><math>s_1 = \pm j\beta</math></p>	$\frac{C}{s^2 + \beta^2}$		$Ae^{\alpha t}$	<p>RELATIVAMENTE ESTABLE</p>
<p><math>s_1 = \sigma</math></p>	$\frac{A}{s - \sigma}$		$Ae^{\alpha t}$	<p>INESTABLE</p>
<p><math>s_1 = \sigma \pm j\beta</math></p>	$\frac{As + B}{(s - \sigma)^2 + \beta^2}$		$Ce^{\alpha t} \sin(\beta t + \phi)$	<p>INESTABLE</p>

Podemos deducir según la

Tabla *I*, que la zona derecha en el plano complejo *S* es donde no pueden posicionarse los polos de la función de transferencia del sistema; ya que estas áreas ocasionan inestabilidad al sistema.

Figura 7 Estabilidad del sistema



Nota: Ogata (2010)

Por lo tanto, con ubicar los polos de la función de transferencia podemos saber si el sistema es estable o no.

## 2.5 Control P-I por asignación de polos

La técnica de asignación de polos consiste en acoplar al proceso un sistema de control representado por la función de transferencia del algoritmo de control P-I (Castaño, 2015).

En el dominio de la frecuencia *S*, el bloque P-I viene expresado del siguiente modo:

$$C(s) = k_c + \frac{k_i}{s} \quad (9)$$

Donde  $k_c$  es la ganancia de la parte proporcional y  $k_i$  es la ganancia de la parte integral. Si factorizamos la ganancia proporcional obtendremos una constante que multiplica a *S* en la parte

integradora, esta es la constante de tiempo de integración y estaría expresada del siguiente modo.

$$C(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) = k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (10)$$

### 2.5.1 Control P-I por asignación de polos para sistemas de 1er orden

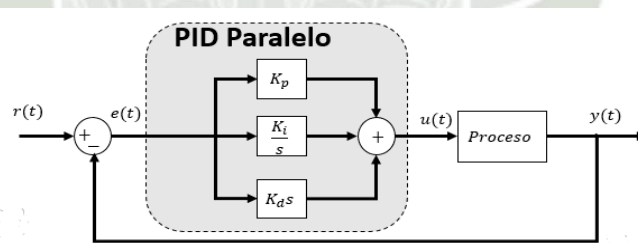
En un sistema de primer orden sin retardo expresado de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (11)$$

Se considera que el tiempo que tarda el sistema en llegar a su estado estacionario es de  $4\tau$ .

El sistema en lazo cerrado sería:

*Figura 8 Sistema de lazo cerrado*



*Nota: Castaño (2015)*

La constante derivativa  $k_d$  no se considera para el control P-I por lo tanto es 0.

Con fines de simplificación, al ser la función de transferencia una división de polinomios, el proceso y el algoritmo P-I se pueden expresar del siguiente modo:

$$G(s) = \frac{A}{B}, \quad C(s) = \frac{C}{D} \quad (12)$$

Por lo tanto, podemos obtener la función de transferencia de lazo cerrado con la siguiente expresión:

$$H(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}, \text{reemplazando: } H(s) = \frac{\frac{C}{D} \frac{A}{B}}{1 + \frac{C}{D} \frac{A}{B}} = \frac{CA}{DB + CA} \quad (13)$$

Ahora si reemplazamos con cada polinomio representado por A, B, C y D:

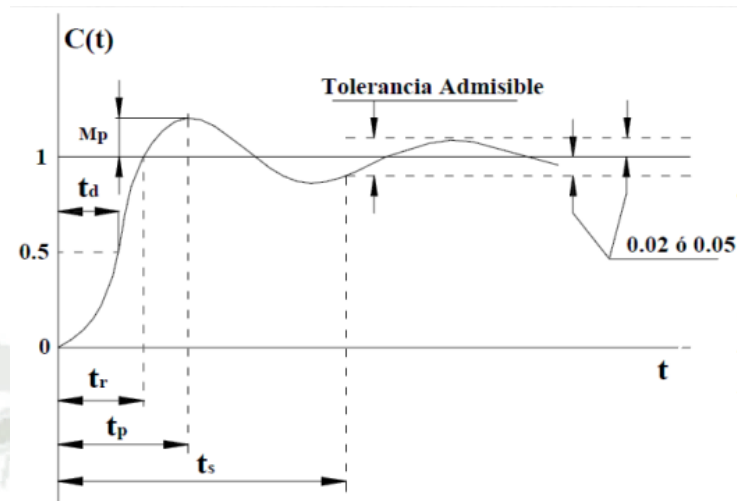
$$H(s) = \frac{k_c k_p (\tau_i s + 1)}{\tau_i s (\tau s + 1) + k_c k_p (\tau_i s + 1)} = \frac{\frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} (\tau_i s + 1)}{s^2 + \frac{1}{\tau} (1 + k_c k_p) s + \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau}} \quad (14)$$

El denominador de H(s) describe la dinámica del sistema mediante la ubicación de sus polos; por ello se llama ecuación característica. Como podemos observar en un inicio el sistema era de 1er orden, pero ahora después de haber añadido el control P-I realimentado el sistema paso a ser de 2do orden.

Ahora que se trata de un sistema de 2do orden, podemos pasar a definir las características que queremos que tenga el comportamiento de la variable de proceso (Castaño, 2017).

Basándonos en la siguiente ilustración:

Figura 9 Comportamiento de la variable de proceso



Nota: Ogata (2010)

Donde:

- $M_p$  es Máximo sobre impulso.
- $t_s$  es el tiempo de establecimiento.
- $t_p$  tiempo para llegar al sobre impulso.

Como diseñadores del sistema, nosotros decidimos el valor de estos parámetros según sea el comportamiento que necesita tener la variable del proceso para una producción eficiente.

### 2.5.1.1 Máximo sobre impulso $M_p$

El máximo sobre impulso se determina en función del factor de amortiguamiento que aparece en la ecuación característica del sistema de segundo orden (expresión2).

$$M_p = e^{\frac{-\pi\delta}{\sqrt{1-\delta^2}}} \quad (15)$$

Si despejamos el factor de amortiguamiento  $\delta$  obtenemos:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) \quad (16)$$

Por lo tanto, si determinamos cual será el máximo sobre impulso permitido en el comportamiento de la variable de proceso en el tiempo, podremos determinar el valor del factor de amortiguamiento.

### 2.5.1.2 Tiempo de establecimiento

Este parámetro es el tiempo que queremos definir para que el proceso llegue al estado estacionario; este acepta una banda de tolerancia del 2% o 5%. Viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{para } 5\% : t_s = \frac{3}{\delta \omega_n} , \quad \text{para } 2\% : t_s = \frac{4}{\delta \omega_n} \quad (17)$$

Donde  $\omega_n$  es la frecuencia natural no amortiguada que aparece en la ecuación característica del sistema de 2do orden ( $s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2$ ).

Por lo tanto, definido ya el máximo sobre impulso  $M_p$  y el tiempo de establecimiento  $t_s$  podemos determinar  $\omega_n$  y  $\delta$ .

### 2.5.1.3 Determinación de los parámetros $K_c$ y $T_i$

Anteriormente se determinó la función de transferencia del lazo cerrado del sistema de 1er orden controlado con un bloque P-I; la expresión fue:

$$H(s) = \frac{\frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} (\tau_i s + 1)}{s^2 + \frac{1}{\tau} (1 + k_c k_p) s + \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau}}, \quad (18)$$

Por otro lado, tenemos la función de transferencia de un sistema de segundo orden vista en la Expresión 1. Si igualamos las ecuaciones características de ambas expresiones obtendremos:

$$s^2 + \frac{1}{\tau} (1 + k_c k_p) s + \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} = s^2 + 2\delta \omega_n s + \omega_n^2 \quad (19)$$

Ahora podemos igualar los coeficientes para así obtener:

$$\frac{1}{\tau} (1 + k_c k_p) = 2\delta \omega_n ; \quad \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} = \omega_n^2 \quad (20)$$

Por lo tanto, con los parámetros  $\tau$ ,  $\omega_n$  y  $\delta$ , ya definidos con anterioridad según el diseño, podemos determinar los valores de  $K_p$  y  $T_i$  para nuestro bloque de control P-I (Castaño, 2017).

$$k_p = \frac{2\delta \omega_n \tau + 1}{k_c} ; \quad \frac{k_c k_p}{\tau \omega_n^2} = \tau_i \quad (21)$$

### 2.5.2 Control P-I por asignación de polos para sistemas de 2do orden

El procedimiento para un sistema de segundo orden es bastante similar al anterior.

Partiendo de la función de transferencia de segundo orden:

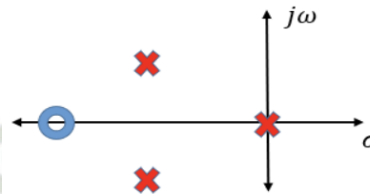
$$\frac{Q(s)}{R(s)} = k \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{A}{B} \quad \text{y} \quad G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{C}{D} \quad (22)$$

La función de transferencia en lazo cerrado vendría dada por:

$$H(s) = \frac{DA}{EB+DA} = \frac{Q(s)}{R(s)} = k \frac{(k_c s + k_i)}{s^3 + a s^2 + (b + k k_c) s + k k_i} \quad (23)$$

Observando la ecuación notamos que habrá 3 polos y un cero.

Figura 10 Sistema de 3er orden



Nota: Castaño (2017)

Si el polo real se encuentra a la izquierda de los polos complejo-conjugados, el comportamiento será el de un sistema sobreamortiguado. Si tenemos el polo real ubicado a la derecha de los complejo-conjugados, la respuesta del sistema al escalón será más lenta (Castaño, 2020).

Ahora es cuando asignamos los polos correspondientes para que el sistema tenga el comportamiento deseado. Un detalle importante es notar que existirá un “cero”, este podría modificar levemente la dinámica deseada.

Considerando el parámetro  $\beta = \frac{p}{\delta \cdot \omega_n}$ , donde  $p$  es el tercer polo en el eje real y los parámetros  $\delta$  y  $\omega_n$  vistos en los sistemas de segundo orden, la ecuación característica deseada del sistema de tercer orden sería:

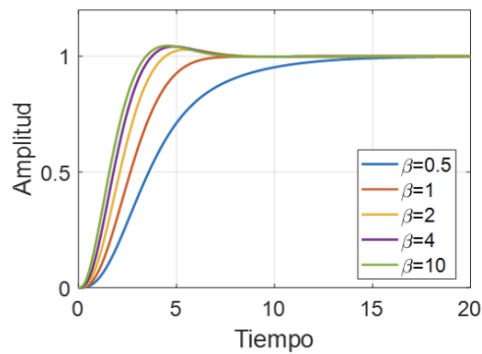
$$(s + p)(s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2) = 0 \quad (24)$$

Por lo tanto, la ecuación característica vendría dada por:

$$s^3 + (\beta + 2)\delta\omega_n s^2 + (2\beta\delta^2 + 1)\omega_n^2 s + \beta\delta\omega_n^3 = 0 \quad (25)$$

El comportamiento del sistema en base a  $\beta$  es como se muestra:

Figura 11 Respuesta al escalón unitario del sistema de 3er orden



Nota: Castaño (2017)

Si igualamos la ecuación característica deseada con la del sistema de 3er orden tendremos:

$$s^3 + (\beta + 2)\delta\omega_n s^2 + (2\beta\delta^2 + 1)\omega_n^2 s + \beta\delta\omega_n^3 = s^3 + as^2 + (b + kk_c)s + kk_i \quad (26)$$

De donde podemos definir 3 ecuaciones:

$$a = (\beta + 2)\delta\omega_n \quad (27)$$

$$(2\beta\delta^2 + 1)\omega_n^2 = b + kk_c \quad (28)$$

$$kk_i = \beta\delta\omega_n^3 \quad (29)$$

Ahora podremos despejar el parámetro  $\beta$  y las ganancias proporcional e integral.

$$\beta = \frac{a}{\delta\omega_n} - 2 \quad ; \quad K_c = \frac{(2\beta\delta^2 + 1)\omega_n^2 - b}{k} \quad ; \quad K_i = \frac{\beta\delta\omega_n^3}{k} \quad (30)$$



### 3. IMPLEMENTACIÓN DE PLANTA PROTOTIPO

En esta sección se procede a explicar el diseño e implementación de la planta prototipo del sistema de matizado, considerando los cálculos y resultado de las simulaciones que obtuvimos en la sección anterior. Esta sección estará organizada en 3 partes que describen las 3 etapas fundamentales del sistema; adquisición de datos para el controlador, programación del controlador y actuadores del sistema. A continuación, se muestran los componentes que integran el sistema de producción de matiz.

- Dos bombas de 12 VDC a 2A para el suministro de flujos.
- Dos flujómetros de efecto Hall.
- Un sensor de nivel de ultrasonido con sistema de disparo.
- Microcontrolador ATmega2560.
- Tarjeta de recepción y distribución de señales.
- Dos transistores Mosfet tipo N.
- Potenciómetro de 1K  $\Omega$ .
- Cable USB tipo B 2.0.
- Sistema HMI implementado en la plataforma LabVIEW.
- Fuente de alimentación 12VDC.
- Dos contenedores para los colores a mezclar.
- Un contenedor de mezcla.
- Válvula manual de descarga de mezcla.

### 3.1 Instrumentos de medición



Al ser un sistema realimentado es necesario adquirir información del estado actual de las variables a controlar, para ello se utilizan instrumentos de medición (sensores) con las características adecuadas para la magnitud de la variable que medirán.

#### 3.1.1 Sensor de flujo

El sistema de matizado en su etapa inicial tiene dos contenedores para almacenar los dos colores que serán mezclados. Para obtener el matiz deseado es necesario controlar la relación que existe entre estos dos flujos por lo cual necesitamos medir sus magnitudes en tiempo real.

Se hizo pruebas con el flujómetro YF-S201 y con el flujómetro YF-S401, las características de ambos son como se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 2** Comparación de sensores de flujo de efecto Hall

	YF-S201	YF-S401
Presentación		
Voltaje de operación	5V – 24V DC	5V – 18V DC
Corriente de trabajo	15 mA	15 mA
Rango de caudal	1 - 30 Litros/min	1 - 6 Litros/min
Pulsaciones por litro	450	5880

El sensor YF-S201 tiene un spam de 0 a 30 litros/min con 450 pulsaciones por litro y el sensor YF-S401 tiene un spam de 0 a 6 litros/min con 5880 pulsaciones por minuto. El rango de flujo en el proceso es de 3.5 litros/min, por lo tanto, el modelo YF-S201 no sería adecuado ya que su amplio rango no es necesario y disminuye su resolución, por otro lado, el modelo el modelo YF-S401 tiene un spam más adecuado y la mayor cantidad de pulsaciones por minuto aumenta su resolución para la magnitud de la planta prototipo.

*Figura 12 Fluviómetro YF-S401*

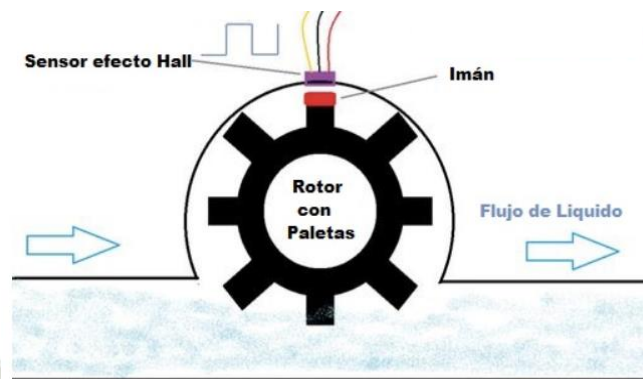


*Nota: Maetrónica (2014)*

El rango de medida de 0.3 a 6 litros/min equivalente a 5 a 100  $cm^3/s$ , es adecuado el proceso ya que según el diseño simulado, la planta trabajará en un rango de 0 a 80  $cm^3/s$  y se mantendrá la mayoría del tiempo en 46  $cm^3/s$  aproximadamente; por otro lado, no sobrepasa las capacidades del microcontrolador que trabaja a 5Vdc y soporta hasta 40mA en sus terminales de entradas y salidas.

El sensor FY-S401 está constituido de un rotor de agua y un sensor de efecto Hall. El rotor de agua está en una cámara totalmente aislada y sus paletas tienen un imán, el sensor de efecto Hall ubicado externamente de la cámara del rotor reacciona a el campo magnético de las paletas cada que se acercan, generando así un pulso eléctrico proporcional a la velocidad del giro del rotor ocasionado por el flujo de líquido para luego enviar el tren de pulsos a su salida.

Figura 13 Principio de funcionamiento de flujómetro



Nota: ArduinoVe (2022)

La salida es una onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional al flujo, por lo tanto, para obtener el flujo basta con multiplicar la frecuencia por un factor de proporción, para obtener un flujo en  $cm^3/s$  el factor será de 0.189. Para obtener la frecuencia del tren de pulsos nos valemos de la instrucción `pulseIn()`, dicha instrucción mide el tiempo de duración de un pulso alto o bajo según se indique en sus parámetros de entrada. Si medimos el tiempo de duración del pulso alto y del pulso bajo y los sumamos obtendremos el periodo completo del pulso, ahora solo será necesario invertir el periodo para obtener la frecuencia.

Considerando que la escala de tiempo en la que mide la instrucción `pulseIn()` es en microsegundos, será necesario hacer la conversión a segundos para obtener la correcta frecuencia al momento de invertir el periodo. Dicho todo esto, el programa en Arduino para obtener la lectura de flujo quedaría como se muestra a continuación:

Figura 14 Código para lectura de flujo1

```
PH1= pulseIn(9,HIGH); //Tiempo de pulso en Alto (microsegundos)
PL1= pulseIn(9,LOW); //Tiempo de pulso en Bajo (microsegundos)
frecuencia1=1000000.00/(PH1+PL1); //Inversión de periodo completo escalado a segundos
F1 = frecuencia1*0.189; //Obtener Flujo al multiplicar frecuencia con factor
```

Nota: Elaboración propia

Donde F1 es el flujo principal y lo mismo se aplica para el flujo secundario F2:

*Figura 15 Código de lectura de flujo2*

```
PH2= pulseIn(8,HIGH);  
PL2= pulseIn(8,LOW);  
frecuencia2=1000000.00/(PH2+PL2);  
F2 = frecuencia2*0.171;
```

*Nota: Elaboración propia*



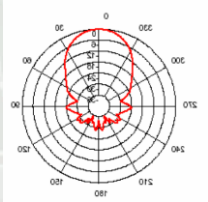
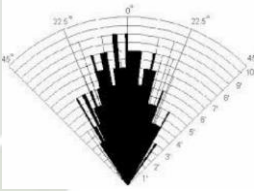
El sensor de flujo FY-S401 lleva 3 conectores:

- Rojo: Conector para alimentación de +5Vdc.
- Negro: Conector para alimentación de 0Vdc.
- Amarillo: Conector para señal de medición, salida.

### 3.1.2 Sensor de nivel

Para lograr una producción continua, es necesario tener un suministro continuo del matizado para el embazado, esto es posible gracias al control de nivel que mediante la presión hidrostática se puede tener un flujo de salida constante. Las dos opciones posibles son los sensores ultrasónicos SRF04 y HC-SR04, a continuación, ambos son comparados según sus características en la siguiente tabla.

**Tabla 3** Comparación de sensores de nivel ultrasónicos

	SRF04	HC-SR04
Presentación		
Voltaje de trabajo	5V DC	5V DC
Corriente de trabajo	30 - 50 mA	15 mA
Rango de medida	3 – 300 cm	2 – 400 cm
Comunicación	TTL	TTL
Ángulo de medición		

El sensor HC-SR04 maneja niveles de corriente más adecuados en relación al microcontrolador, el sensor SRF04 podría sobrepasar el límite de corriente del microcontrolador que es de 40mA, por lo tanto, resulta prudente el uso del sensor HC-SR04 que trabaja con 15mA.

Posee 4 pines, dos de alimentación, uno de disparo (TRIG) y otro de recepción (ECHO), también un emisor y un receptor piezoeléctrico, el emisor emite 8 pulsos de ultrasonido cuando recibe la orden que proviene del pin TRIG con un pulso de entrada; las ondas de sonido viajan y rebotan al chocar con una superficie, el sonido de rebote es detectado por el receptor

piezoeléctrico y luego se emitirá un pulso alto de salida por el pin ECHO que durará el mismo tiempo que tardó la onda de sonido en salir y regresar.

*Figura 16 Sensor de nivel ultrasónico HC-SR04*



*Nota: Naylampmechatronics (2021)*

La medida de la distancia se puede calcular a partir de medir el tiempo del pulso de ECHO en alto, este debe ser dividido en dos ya que es el tiempo de ida y vuelta de la onda, pero solo es necesario saber el tiempo de ida para calcular la distancia del sensor a la superficie que en este caso es el nivel del líquido en el contenedor. Una vez obtenido el tiempo tan solo es necesario dividirlo por un factor proporcional que en este caso es 58.2

El programa para obtener la lectura de nivel sería como se muestra a continuación:

*Figura 17 Código para leer el Nivel de contenedor*

```
digitalWrite(6,HIGH); //Pulso para TRIG
delayMicroseconds(15); //Retardo para mantener en alto TRIG
digitalWrite(6,LOW); //Pulso TRIG en bajo
tiempo_ultrasonido=pulseIn(7,HIGH); //Medida de tiempo de pulso ECHO
Nivel= 24.1- ( tiempo_ultrasonido / 58.2 ); //constante que convierte la distancia en centímetros (2*31.45)
```

*Nota: Elaboración propia*

El nivel se obtiene de restar la distancia desde el sensor hasta el fondo del contenedor (24.1cm) y la distancia de la superficie del líquido hasta el sensor (medida del sensor).

A continuación, se detalla las características del sensor ultrasónico HC-SR04:

**Tabla 4** Características para el sensor de Nivel



CARACTERÍSTICA	MEDIDA
Voltaje de Operación	5V DC
Corriente de reposo	< 2mA
Corriente de trabajo	15mA
Rango de medición	2cm a 450cm
Precisión	+/- 3mm
Ángulo de apertura	15°
Frecuencia de ultrasonido	40KHz
Duración mínima del pulso de disparo TRIG	10 $\mu$ S
Duración del pulso ECO de salida	100-25000 $\mu$ S

### 3.2 Instrumentos actuadores

Según la medida de la variable adquirida mediante los instrumentos de medición, el controlador toma decisiones basadas en el programa lógico implementado para luego emitir ordenes de actuación, estas órdenes de actuación tienen el objetivo de controlar el proceso del sistema y son acatadas por los instrumentos actuadores, en este caso bombas que llevan el líquido de un contenedor a otro. La planta prototipo tiene dos contenedores para los colores a mezclar y necesita transportarlos a un tercer contenedor de mezcla controlando el flujo de estos, la bomba extrae el líquido de un contenedor y lo lleva a otro produciendo un flujo de líquido, pero a la vez es posible controlar este flujo controlando la alimentación de la bomba.

Para esto se consideró dos modelos de bombas, el primero fue el DC20E y el DP-521, a continuación, se muestran sus características en la siguiente tabla:

**Tabla 5** Comparación de bombas DC

	DC20E	DP-521
Presentación		
Voltaje de trabajo	12V DC	12V DC
Corriente de trabajo	0.4 A	2 A
Capacidad	1.8 – 3 Litros/min	0.6 - 3.5 Litros/ min
Dimensiones	5.5 x 3.5 x 4.5 cm	9.6 x 6.2 x 12.7 cm

La bomba DC20E reacciona de forma brusca ante pequeños cambios de alimentación, esto por la baja potencia que posee, por lo tanto no es posible controlarlo con precisión, otro detalle es que no es capaz de bombear a menos de 5 V. El segundo modelo que se usó es el DP-521, este es capaz de producir un flujo de  $50 \text{ cm}^3/\text{s}$  y trabaja a 2 A, tiene mayor resolución y el voltaje mínimo de alimentación es 1.5V, por lo tanto se le puede controlar con mayor precisión.

Figura 18 Ilustración 39 Bomba DP-521



Nota: uelectronics (2022)

Según el fabricante su flujo máximo es de 3.5 L/min que equivale a 58.3  $cm^3/s$ , pero en realidad después de probarlos obtuvimos sus flujos máximos reales que son:

- 50  $cm^3/s$  para la Bomba1 que proporciona el flujo principal F1.
- 43  $cm^3/s$  para la Bomba2 que proporciona el flujo secundario F2.

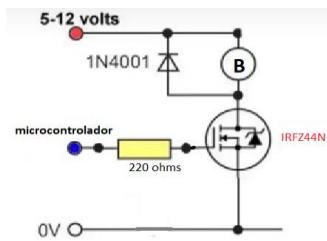
Su alimentación nominal es de 12V DC, pero si la disminuimos obtendremos una reacción lineal en el flujo que produce la bomba, por lo tanto, podemos controlar el flujo de 0 a 50  $cm^3/s$  variando el voltaje de alimentación de la bomba de 0 a 12 VDC linealmente.

Es necesario aclarar que estamos hablando de una señal analógica que será emitida desde el controlador hasta la bomba que es la orden de actuador para el control de la variable flujo, pero es necesario tener dos consideraciones en cuenta:

- El controlador emite una señal de salida hasta 5 VDC lo cual no es suficiente para operar la bomba en todo su rango, por lo cual es necesario implementar un circuito de potencia que permita alimentar de 0 a 12 VDC controlado por la salida del controlador Arduino.

- La señal analógica que emite el controlador es mediante una señal digital con modulación por ancho de pulso PWM, por lo tanto, el circuito de potencia deberá ser de alta velocidad de conmutación para lo cual se usará el Mosfet IRFZ44N.

Dicho circuito de potencia es como se muestra a continuación:

*Figura 19 Circuito de potencia*

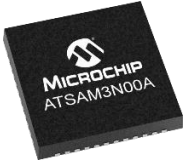

*Nota: Castaño (2019)*

Se agrega un diodo en antiparalelo a la bomba como protección para disipar la fuerza electromotriz, para generar la señal de salida en el Arduino nos valemos del comando `analogWrite()` el cual permite escribir una señal análoga de salida entre los valores numéricos de 0 a 255 que equivalen de 0 a 5 VDC con el método PWM ya mencionado anteriormente. Esta señal disparará el mosfet para que este conmute los 12 VDC a la frecuencia del PWM. El valor de esta señal análoga dependerá del resultado del algoritmo PI implementado en Arduino el cual emitirá dicha señal con un valor según sea la situación actual del sistema y su variación en tiempo real.

### 3.3 Controlador del sistema

La parte inteligente que controla el sistema es descrita en esta sección, en este caso se probó con el microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 y con el microcontrolador ATmega2560, a continuación se muestran sus características.

**Tabla 6** Comparación de microcontroladores

	SAM3X8E	ATmega2560
Presentación		
Voltaje de trabajo	3.3V DC	5V – 7.5V DC
Corriente máxima en I/O	130 mA	40 mA
Cantidad de bits	32 bits	8 bits
Entradas y salidas digitales	54 (12 PWM)	54 (15 PWM)
Entradas analógicas	12	16
Memoria flash	512 KB	256 kB

El microcontrolador Atmel es de 32 bits con mayor velocidad de procesamiento pero trabaja a 3.2 V, esto lo hace incompatible con los sensores de medición que trabajan a 5V, se utilizó reguladores para convertir las señales PWM de 3.2V a 5V pero se perdía demasiada información, haciendo que el sistema no trabaje de forma adecuada. Por otro lado, el microcontrolador ATmega328P es de 8 bits y trabajan a 5V, tiene 54 entradas y salidas digitales y es capaz de controlar el sistema de forma estable.

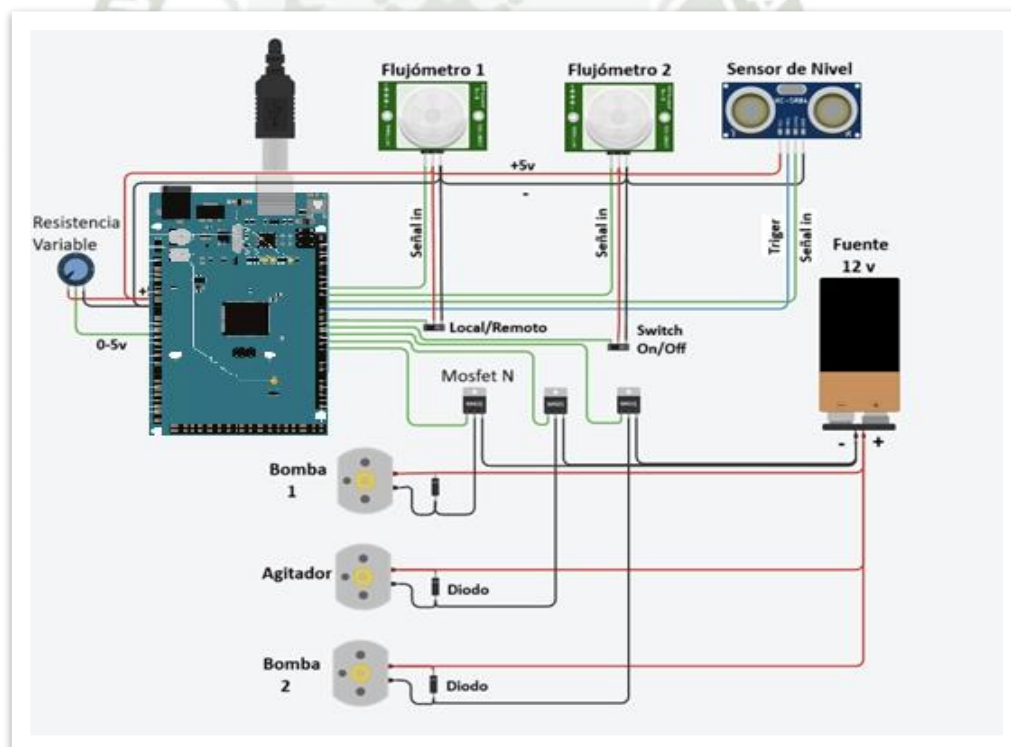
*Figura 20 Microcontrolador ATmega2560P*



*Nota: ubuy (2023)*

Se recibe señales digitales de entrada que miden el nivel y los flujos, también se emitirán señales analógicas PWM para controlar el flujo y nivel mediante los actuadores, por ello se implementó un circuito de recepción de señales y distribución de alimentación como se muestra a continuación:

*Figura 21 Recepción de señales y distribución de alimentación*



*Nota: Elaboración propia*

Las características del Microcontrolador ATmega2560 se mencionan a continuación:

**Tabla 7** Características técnicas de Microcontrolador ATmega2560

Característica	Descripción
Voltaje Operativo	5v
Voltaje de Entrada	7 – 12 v
Pines de Entradas/Salidas digital	54 (14 son salidas PWM)
Pines de Entradas Análogas	16
Memoria Flash	32 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del Reloj	16 MHZ.

Como se puede ver en la tabla, las características son compatibles con los dispositivos de medición y actuación. La señal de entrada que proporcionan los instrumentos de medición (flujo y nivel) son pulsos digitales como se menciona en la sección Sensor de flujo por lo que no será necesario usar las entradas análogas, sino más bien calcular la frecuencia de las entradas digitales y mediante esta calcular la medida de la variable.

Por otro lado, arduino MEGA tiene 2 pines como fuente de alimentación 5 VDC que son aprovechados para alimentar los sensores de medición que se alimentan con 5V. El puerto de comunicación serial permitirá la comunicación con la interfaz gráfica de supervisión y operación para el sistema de la cual se entrará en detalle más adelante.

### 3.3.1 Programación de microcontrolador

El entorno de desarrollo de programación se llama Arduino IDE y básicamente tiene 3 etapas principales. La primera etapa es externa a los bucles principales, es decir que todo lo que se declare será global y se usa principalmente para declarar variables, definir funciones de usuario y llamado de librerías a usar. La segunda etapa es indicar los ajustes de configuración necesarios para la aplicación que queremos implementar, estas se especifican mediante comandos de instrucciones dentro de la función principal “void setup()”, esta función solo se

ejecuta una vez al inicio de la ejecución del programa. Finalmente viene la tercera etapa donde se implementan las tareas y el llamado de funciones globales mediante comandos e instrucciones que se ejecutan cíclicamente, es decir que todas las instrucciones implementadas dentro de este bucle se ejecutarán cíclicamente mientras esté energizado el Arduino y están bajo la función “void loop()”, Esta función se ejecuta después de haber terminado la ejecución de “void setup”.

### 3.3.1.1 Definición de entradas y salidas (etapa global)

Para el desarrollo del sistema de control con algoritmo PI será necesario incluir la librería TimerOne.h que permitirá llamar periódicamente la función PI según sea necesario. Detalles de dicha librería están anexados en las referencias del documento.

Es necesario declarar al inicio del programa los pines que serán entradas y salidas y qué señal recibirán, como se muestra a continuación.

*Figura 22 Declaración de señales de entrada y salida*

```
/*
*****
*****      CONTROL PI EN CASCADA      *****
*****      JAVIER HUAMANÍ BARREDA    *****
*****      Sistema de matizado        *****
*****
*/

#include <TimerOne.h>

// Definicion I/O

#define flujo1  11      //Entrada Flujo Primario
#define flujo2  10      //Entrada Flujo Secundario
#define nivel   9       //Entrada de nivel
#define trig    8       //Salida disparo Ultrasonido
#define LocRem  7       //Entrada Local/Remoto
#define OnOff   6       //Entrada Interruptor On/Off
#define bomba2  5       //Salida Bomba 2
#define bonbMez 4       //Salida Agitador
#define bomba1  3       //Salida Bomba 1
#define selenoid 2      //Salida selenoide
```

*Nota: Elaboración propia*

Podemos ver que el control de las bombas 1 y 2 será a través de los pines 3 y 5 que tienen habilitado el modo PWM, los pines 6 y 7 reciben señales digitales que indican apagar o prender el sistema y si trabajará en modo local o remoto comandado desde la interfaz HMI respectivamente, los pines 8 y 9 disparan y reciben la señal de nivel respectivamente y finalmente los pines 11 y 10 reciben la señal de los flujos primario y secundario respectivamente.

Para definir en el programa cuáles serán entradas y salidas, se hacen los ajustes mediante el comando `pinMode()` dentro de la función de ajustes de programa “`void setup()`” de la siguiente forma:

*Figura 23 Configuración de entradas y salidas*

```
void setup() {  
  
    //configuración de entradas y salida  
  
    pinMode(11,INPUT);  
    pinMode(10,INPUT);  
    pinMode(9,INPUT);  
    pinMode(8,OUTPUT);  
    pinMode(7,OUTPUT);  
    pinMode(6,INPUT);  
    pinMode(5,INPUT);  
    pinMode(4,OUTPUT);  
    pinMode(3,OUTPUT);  
    pinMode(2,OUTPUT);  
}
```

*Nota: Elaboración propia*

### **3.3.1.2 Declaración de variables (etapa global)**

Para la lectura de flujo primario y secundario se crearán las siguientes variables:

*Figura 24 Variables para lectura de flujo*

```
//Variables Globales
//variables para lectura de flujo
float F1; //flujo 1 estable en cm3/seg
float PH1=0; //longitud de pulso 1 alto
float PL1=0; //longitud de pulso 1 bajo
float frecuencia1; //frecuencia de tren de pulsos 1
float F2; //flujo 2 estable en cm3/seg
float PH2=0; //longitud de pulso 2 alto
float PL2=0; //longitud de pulso 2 bajo
float frecuencia2; //frecuencia de tren de pulsos 2
```

*Nota: Elaboración propia*

La variable de tipo float F1 almacena el valor del flujo primario en tiempo real, dicho valor será el resultado de un factor que multiplica la frecuencia de la señal de entrada del sensor de flujo como se explicó en la sección Sensor de flujo, cabe mencionar que la frecuencia se deduce del periodo del tren de pulsos de entrada, por lo que será necesario declarar dos variables que permitan almacenar el tiempo de pulso en alta y el tiempo del pulso en baja y así sumarlos para obtener el periodo de la onda cuadrada. Por lo tanto, declaramos la variable PH1 para almacenar el tiempo en alta del tren de pulsos, PL1 para almacenar el tiempo en baja del tren de pulsos y la variable frecuencia1 para almacenar la frecuencia del tren de pulsos del flujo primario. Lo mismo aplica para almacenar el flujo secundario.

Para la lectura de nivel se declaran las siguientes variables:

*Figura 25 Código de lectura de Nivel*

```
//variables para lectura de Nivel
float tiempo_ultrasonido; //Tiempo que demora ultrasonido
float Nivel=0.0; //Nivel en tiempo real
volatile float Nivell=0.0; //Nivel auxiliar
```

*Nota: Elaboración propia*

Tan solo es necesaria una variable que almacene el tiempo de duración de retorno del ultrasonido y otra variable tipo float que almacene el nivel que se deduce de dicho tiempo calculado como se menciona en la sección Sensor de nivel. Por motivos que se explicarán más

adelante, es necesario contar con una variable auxiliar que copiará el valor del nivel en tiempo real pero solo en ciertas condiciones, esta da funcionalidad al bucle del algoritmo PI.

Ahora procedemos a declarar las variables que se emplearán para el algoritmo PI de control del flujo secundario.

Figura 26 Variables para control PI de Flujo2

```
//variables PI flujo
float Proporción;           //Proporción de mezcla
volatile float rf=0.0;     //Referencia de flujo 2
volatile float uf=0.0, af=0.0; //Acción de Control flujo 2
float kpf=0.002554;       //Ganancia proporcional PI flujo 2
float tif=0.025;         //Tiempo integrador PI flujo 2
volatile float ef=0.0,efsum=0.0; //error presente y s uma de errores
                           //pasados (integración del error)
```

Nota: Elaboración propia

La estructura del algoritmo PI es como se muestra a continuación:

$$uf = ef \cdot kpf + efsum$$

La variable “uf” de tipo float almacena el resultado del cálculo del algoritmo PI que vendría a ser la acción o señal analógica de salida que controla la bomba2 responsable del flujo secundario, la variable “rf” almacena el set point a seguir del control realimentado cuyo valor proviene de la multiplicación del factor de proporción de mezcla y del flujo primario, por lo cual también declaramos la variable proporción que almacena el factor de proporción. La variable de tipo float “ef” almacena el error de flujo 2 que resulta de restar el set point y el valor actual del flujo 2 realimentado. Finalmente, las variables “Kpf” y “Tif” almacenan la ganancia proporcional y tiempo integrativo ya sintonizados anteriormente. La expresión *efsum* almacena la parte integrativa del control PI y será explicada más adelante.

Respecto al control PI de nivel, se declaran las siguientes variables:

*Figura 27 Variables para control PI de Nivel*

```
//variables PI Nivel
volatile float rl=17.5;           //Referencia de Nivel
volatile float ul=0.0, al=0.0;   //Acción de Control Nivel
float kpl=0.0;                   //Ganancia proporcional PI Nivel
float kil=0.0;                   //Tiempo integrador PI Nivel
float m=0.0, n=0.0, beta=0.0;   //parámetros de sintonización
volatile float el=0.0, elsum=0.0; //error presente e integración de error
int Count=0;                    //Tiempo de muestreo Nivel
bool firstT=0;                  //Inicializador de bucle PI Nivel
bool start=0;                   //On/Off del sistema
```

*Nota: Elaboración propia*

La variable del tipo float “rl” almacena el set point que seguirá el sistema de control de nivel realimentado el cual como ya se explicó en la sección Sistema de control de nivel es inicializado en 17.5 cm, la variable “ul” almacena el resultado de la acción de control de nivel que modulará el flujo primario para obtener el nivel deseado. Las variables “Kpl” y “Kil” almacenan las ganancias proporcional e integrativa. Los valores de dichas ganancias son dinámicas y van en función del factor “proporción de mezcla” por lo cual es necesario crear las variables auxiliares “m”, “n” y “beta” para la sintonización, estas serán explicadas más adelante. Las variables “el” y “elsum” almacenan el error actual y el error integrado de nivel respectivamente y finalmente las variables “count”, “FirstT” y “start” son para la funcionalidad del bucle de control PI que serán explicadas más adelante.

### 3.3.1.3 Función PI (etapa global)

LA función PIFL contiene las instrucciones que ejecutarán el control PI y será llamada periódicamente según su tiempo de muestreo.

Dicha función almacena el código de control PI para flujo y nivel, es decir que cada que sea llamada ejecutará el control PI de flujo y PI de nivel a la vez, este artificio se hizo con la finalidad de no sobrepasar los recursos y capacidad del microcontrolador ya que es de gama baja. Un detalle importante es que el control PI de nivel y el control PI de flujo necesitan tiempos de muestreo distintos, el tiempo de muestreo es calculado de la siguiente forma:

$$\frac{t_{ss}}{20} \leq T_s \leq \frac{t_{ss}}{10} \quad (31)$$

Donde  $t_{ss}$  es el tiempo de establecimiento y  $T_s$  es el tiempo de muestreo, para el control PI de Flujo2 el tiempo de establecimiento  $t_{ss}$  es de 1 segundo como se mostró en la sección Modelo matemático del sistema de flujo, por lo que su tiempo de muestreo puede tomarse entre 0.05 y 0.1 segundos y después de realizar pruebas se escoge el valor de 0.05 segundos.

Para lograr ejecutar ambos sistemas de control, es decir control de flujo y de nivel en una sola función se elaboró una estrategia de conteo, la función PIFL es llamada cada 0.05 segundos como lo requiere el tiempo de muestreo de control PI de flujo2, pero una estructura condicional dentro de la función solo permite ejecutar el control PI de Nivel cuando se cumple la condición de que un contador llegue a 2, este contador cuenta cada vez que la función es llamada y si consideramos que la función es llamada cada 0.05 segundos, cuando llegue a 2 habrán transcurrido 0.1 segundos, por lo tanto, solo se ejecutará el código de control de nivel cada 2 llamados de la función, la variable “Count” mencionada en la declaración de variables almacena el valor de conteo y es reiniciada cada vez que llega a 2.

Esta función solo se activa si es que la variable booleana “start” está en 1, la etapa de control PI de flujo2 es como se muestra

Figura 28 Código para control PI de flujo2

```
void PIFL(void)
{
  if(start==1)
  {
    //Control PI para flujo
    ef=(rf-F2);
    uf = ef*kpf + efsun;           //Ley del controlador PI
    //af=uf;                       //Sistema Antiwindup
    if (uf >= 100.0)               //Satura la accion de control 'uf'
    {uf = 100.0;}                 // en un tope maximo y minimo
    if (uf <= 0.0 || rf==0)
    {uf = 0.0;}
    efsun += ((kpf/tif)*ef)/-((af-uf)); // integración del error con sistema antiwindup
    analogWrite(5,map( uf, 0,100, 0,250)); //Convertit salida (0-100%) en 0 a 255 para PWM
  }
}
```

*Nota: Elaboración propia*

La variable "uf" que almacena la acción del control PI como se mostró en su expresión, debe ser limitada entre 0 y 100% ya que matemáticamente el algoritmo excederá el 100% para tratar de alcanzar el set point en el menor tiempo posible, pero en la realidad la bomba no puede exceder su capacidad al estar ya en el 100%, finalmente se convierte la salida que va del rango de 0 a 100% a 0 y 255 que es el rango de salida para el pulso PWM que comandará la velocidad de bombeo de la bomba.

Para la etapa de control PI de nivel tendremos el siguiente código

Figura 29 Código para control PI de Nivel

```
//Control PI para nivel
Count += 1; //Actualización de contador
if (Nivel >= L && Count>=2) //Control para la FRECUENCIA DE MUESTREO
{
    el=(r1-Nivel);
    L=11;
    if (ul>0.0 || el>0.0) //Control de operatividad de PI de nivel
    {
        ul = el*kpl + elsum; //Ley del controlador PI discreto
        al=ul; //Sistema AntiwindUp
        if (ul >= 100.0) //Saturo la accion de control 'ul'
        {ul = 100.0;} //en un tope maximo y minimo
        if (ul <= 0.0 || r1==0)
        {ul = 0.0;}
        elsum += (kil*el) /*- ((al-ul)*2.5)*/ ; //integración del error con sistema antiWindup
        analogWrite(3,map(ul, 0,100, 0,250)); //Convertit salida (0-100%) en 0 a 255 para PWM
    }
    Count=0; //Reinicio de contador
    PIA=1;
}
```

*Nota: Elaboración propia*

Como se puede observar, la variable “Count” va sumando cada interacción antes del bucle de control de nivel hasta llegar a 10, una vez dentro es reiniciada. La variable “firstT” permite ingresar al bucle de control de nivel por primera vez cuando el nivel viene subiendo en un inicio. A diferencia del control de flujo, aquí la variable que almacena la parte integradora “elsum” tiene adicional un algoritmo matemático llamado anti-windup, este permite eliminar la excesiva acumulación de error integral ya que este sigue creciendo a través del tiempo, cuando el nivel por fin alcance el set point no podrá mantenerse debido al exceso acumulado en el integrador, por lo tanto, el anti-windup elimina constantemente el exceso de acción integradora y ayuda a evitar los retardos e inestabilidades.

El código completo para la función de control PI para flujo y nivel queda como se muestra a continuación:

Figura 30 Función completa de control PI para flujo y nivel

```

//*****FUNCIÓN PI*****//
//*****//
void PIFL(void)
{
    if(start==1)
    {
        //Control PI para flujo
        ef=(rf-F2);
        uf = ef*kpf + efsun;           //Ley del controlador PI
        //af=uf;                       //Sistema AntiwindUp
        if (uf >= 100.0)                //Satura la accion de control 'uf'
            {uf = 100.0;};            // en un tope maximo y minimo
        if (uf <= 0.0 || rf==0)
            {uf = 0.0;};
        efsun += ((kpf/tif)*ef)/*-((af-uf)*); // integración del error con sistema antiwindup
        analogWrite(5,map( uf, 0,100, 0,250)); //Convertit salida (0-100%) en 0 a 255 para PWM
        Count += 1;                    //Actualización de contador
        //Control PI para nivel
        if (Nivell >= 15.5 && Count>=10) //Control para la FRECUENCIA DE MUESTREO
        {
            el=(r1-Nivell);
            if (ul>0.0 || el>0.0 || firstT==0) //Control de operatividad de PI de nivel
            {
                if (firstT==0){ul=50;}; //Habilitación de control
                ul = el*kpl + elsum; //Ley del controlador PI discreto
                al=ul; //Sistema AntiwindUp
                if (ul >= 100.0) //Saturó la accion de control 'ul'
                    {ul = 100.0;}; //en un tope maximo y minimo
                if (ul <= 0.0 || r1==0)
                    {ul = 0.0;};
                elsum += (kil*el) - ((al-ul)*2); //integración del error con sistema antiwindup
                analogWrite(3,map(ul, 0,100, 0,250)); //Convertit salida (0-100%) en 0 a 255 para PWM
                firstT=1; //funcionalidad para la primera vez
            }
            Count=0; //Reinicio de contador
        }
    }
}

```

*Nota: Elaboración propia*

### 3.3.1.4 Ajuste de parámetros del programa (etapa de ajustes setup)

Esta etapa del programa se ejecuta una sola vez al arranque del microcontrolador y su objetivo principal es establecer los ajustes y condiciones para los recursos que serán utilizados en el código. Para la comunicación serial con el sistema de supervisión HMI que será explicado más adelante, es necesario establecer la velocidad de intercambio de datos, en esta ocasión 9600 baudios será suficiente y se declara mediante la instrucción `Serial.begin()`.

Establecemos las entradas digitales que serán usadas como entradas y salidas según se mencionó en la sección 3.3.1.1 con el comando `pinMode()`, resulta conveniente aprovechar esta etapa para inicializarlas todas desde cero. Finalmente, otro ajuste necesario será configurar el

temporizador que hará el llamado de la función de control PIFL cada 0.05 segundos para que coincida con la frecuencia de muestreo del control de flujo2. El código es como se muestra a continuación.

*Figura 31 Código para configuración y ajustes generales*

```
void setup() {  
  //configuración de comunicació  
  Serial.begin(9600);  
  //configurción de entradas y salida  
  pinMode(11,INPUT);  
  pinMode(10,INPUT);  
  pinMode(9,INPUT);  
  pinMode(8,OUTPUT);  
  pinMode(7,OUTPUT);  
  pinMode(6,INPUT);  
  pinMode(5,INPUT);  
  pinMode(4,OUTPUT);  
  pinMode(3,OUTPUT);  
  pinMode(2,OUTPUT);  
  digitalWrite(2,LOW);  
  digitalWrite(3,LOW);  
  digitalWrite(4,LOW);  
  digitalWrite(5,LOW);  
  digitalWrite(6,LOW);  
  
  //Configuración del llamado PID según la señal de muestreo  
  Timer1.initialize(50000); //Configura el TIMER en 50 mili Segundos ****  
  Timer1.attachInterrupt(PIFL) ; //Configura la interrupción del Timer 1  
}
```

*Nota: Elaboración propia*

### 3.4 Programa principal (etapa cíclica void loop)

Como lo dice su nombre, esta etapa es un bucle cíclico y es empleada para realizar la lectura continua de los flujos y nivel que es necesario para su control en tiempo real y también otras variables que permiten el control de todo el sistema en general.

La variable “Proporción” toma el valor leído en la entrada analógica “A0” y la variable “start” toma el valor leído en la entrada digital 7 controlando así el matiz y el arranque de modo local.

Ahora se procede a implementar el algoritmo matemático desarrollado en la sección Control de Nivel para calcular la ganancia proporcional e integral dinámica para el control PI de Nivel.

*Figura 32 Algoritmo para el cálculo de ganancias dinámicas*

```
//Algoritmo, Sintonización automática de valores Kpl y Til
if (start==0)
{
  m=(0.025*P+0.25);
  n=(1.0+P);
  beta=((0.0473*m*n)+(3.4466*n*n))/((0.2857*n*n)+(0.0342*m*m)-(0.1633*m*n));
  kpl(((0.5*beta)-1.0)/m);
  kil=0.015*beta/n;
  PIA=0;
}
```

*Nota: Elaboración propia*

Las variables “m” y “n” almacenan una parte importante de la función de transferencia que va en función del factor de proporción para el matiz deseado, una vez calculadas ya se puede obtener el valor de beta, la ganancia proporcional e integral como se mostró en las expresiones de sintonización, estos valores serán almacenados en las variables “beta”, “Kpl” y “kil”.

Con respecto a la lectura del nivel, dentro de un rango cercano al punto de trabajo de nivel del contenedor que es 17.5cm, esto debido a que la sintonización se basó en el modelo matemático el sistema de nivel y dicho modelo tiene comportamiento lineal solo para zonas cercanas a la zona de trabajo como se menciona en la linealización del modelo.

*Figura 33 Lectura de Nivel*

```
// Lectura de nivel
digitalWrite(8,HIGH); //Pulso para TRIG
delayMicroseconds(15); //Retardo para mantener en alto TRIG
digitalWrite(8,LOW); //Pulso TRIG en bajo
tiempo_ultrasonido=pulseIn(9,HIGH); //Medida de tiempo de pulso ECHO
Nivel= 24.1- ( tiempo_ultrasonido / 58.2 ); //constante que convierte la distancia en centímetros (2*31.45)
//if(Nivel > 17.2 && Nivel < 17.7) {Nivel=17.5;}//ZONA MUERTA
if(Nivel >= 15.5) {Nivell=Nivel;}
if(Nivel < 13.0) {Nivell=0.0;}
//filteredDistance = ALPHA * Nivell + (1 - ALPHA) * filteredDistance;
```

*Nota: Elaboración propia*

Con respecto a la lectura de flujo, esta solo se ejecutará si la planta está en funcionamiento, las bombas trabajarán al 100% cuando el nivel se encuentre por debajo de la zona de trabajo, en este caso menor a 15 cm.

Figura 34 Código para lectura de flujo1

```
//Lectura de flujo 1
if (F1==0.0 && ul>20.0) { F1=9.0;}
if (F1>=7.0) //elimina el problema de pulso infinito en 0 flujo
{
  PH1= pulseIn(11,HIGH); //Tiempo de pulso en Alto (microsegundos)
  PL1= pulseIn(11,LOW); //Tiempo de pulso en Bajo (microsegundos)
  frecuencia1=1000000.00/(PH1+PL1); //Inversión de periodo completo escalado a segundos
  F1 = frecuencia1*0.189; //Obtener Flujo al multiplicar frecuencia con factor
  //filteredFlow1 = 0.3 * F1 + (1 - 0.3) * filteredFlow1; //filtro para estabilizar la señal de flujo 1
}
else {F1=0.0;}
```

*Nota: Elaboración propia*

Para la lectura del flujo2 es necesario primero establecer el set point multiplicando el factor de proporción y la lectura actual del flujo1, una vez obtenido el set point se procede a la lectura.

Figura 35 Código para lectura de flujo2

```
//Lectura de flujo 2
if (F2==0.0 & uf>16.0) { F2=8.0;}
if (F2>=6.0)
{
  PH2= pulseIn(10,HIGH);
  PL2= pulseIn(10,LOW);
  frecuencia2=1000000.00/(PH2+PL2);
  F2 = frecuencia2*0.171;
  //filteredFlow2 = 0.3 * F2 + (1 - 0.3) * filteredFlow2;
}
else {F2=0.0;}
}
else {analogWrite(5,0);analogWrite(3,0);F1=0.0; F2=0.0;}
```

*Nota: Elaboración propia*

Finalmente, mediante la instrucción Serial.print() enviamos por el puerto serial los valores de Nivel y flujos al sistema de supervisión HMI implementado en LABVIEW.

Figura 36 Código para comunicación serial

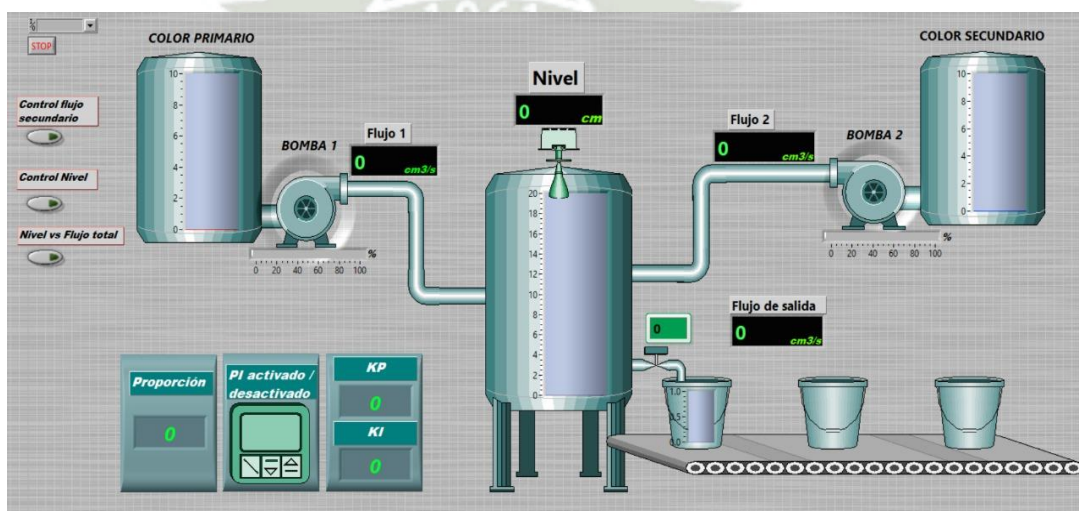
```
Serial.print(100+Nivel,1);|
Serial.print('\t');
Serial.print(100+F1,0);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+F2,0);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+P,2);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+kp1,3);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+kil,3);
Serial.print('\t');
Serial.println(PIA);
```

Nota: Elaboración propia

### 3.5 Interfaz de supervisión y operación HMI

La implementación de sistema de supervisión se realizó en la plataforma de desarrollo LabView de National Instruments, dicha plataforma tiene una amigable interfaz de programación en bloques y funciones dedicadas para la comunicación serial. Dicha plataforma cuenta con dos ventanas, una para el diseño del panel frontal y otra programar la funcionalidad de dicho panel. El diseño es como se muestra a continuación

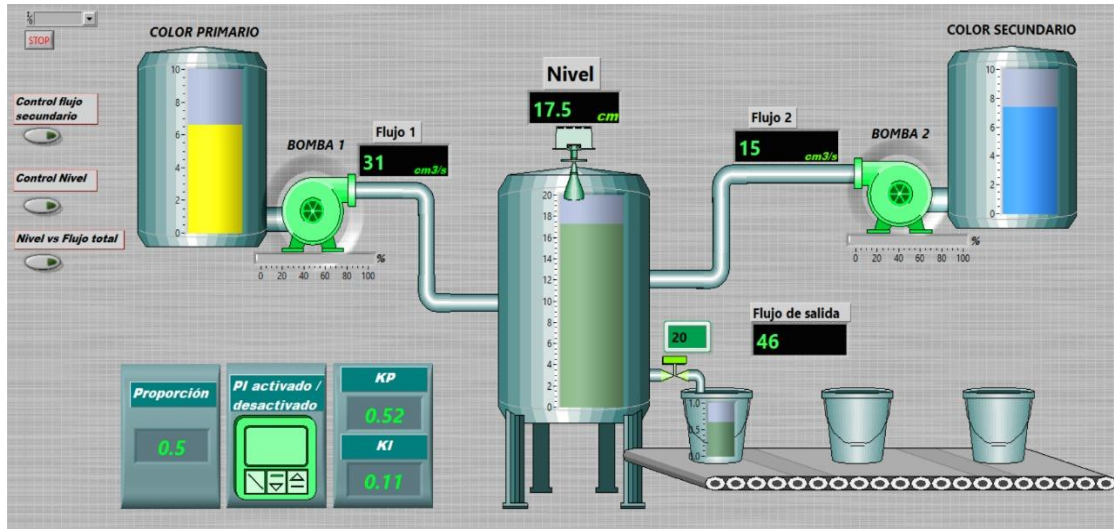
Figura 37 HMI equipos desactivados



Nota: Elaboración propia

La animación permite observar los valores en tiempo real y ver cuando los actuadores están encendidos

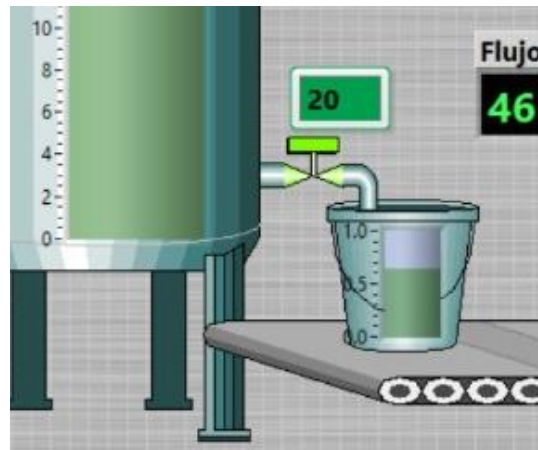
*Figura 38 HMI Equipos Activados*



*Nota: Elaboración propia*

En la parte inferior izquierda del panel tenemos dos indicadores, el primer indicador nos muestra la relación establecida entre los flujos y el segundo indicador nos muestra la activación PI, este último permite visualizar cuando está en funcionamiento el sistema de control PI de nivel ya que, como se mencionó anteriormente, dicho control solo se activará para zonas cercanas al punto de trabajo de 17.5cm. Por otro lado, se implementó una simulación de como funcionaría la etapa de envasado con un temporizador con la finalidad de demostrar cómo sería la interacción con la planta de matizado implementada, dicha simulación consiste en abrir la salida del contenedor durante el tiempo suficiente para el llenado del embace según el flujo de salida como se menciona en la sección 4.1.4, luego cerrar la salida del contenedor un corto tiempo para el cambio de envase y luego repetir el ciclo.

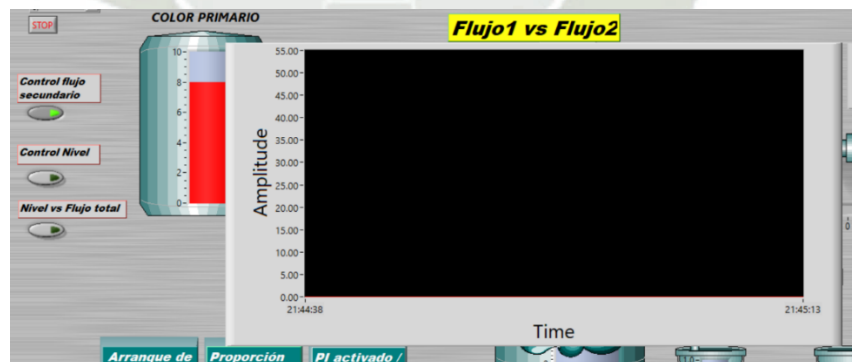
Figura 39 HMI simulación de etapa de envasado



*Nota: Elaboración propia*

En el costado derecho se añadió 3 controles digitales que al ser activados muestran una ventana emergente para graficar en tiempo real las señales relevantes, en este caso Flujo1 vs Flujo2, Nivel vs Set Point y Nivel vs Flujo total de ingreso, estas gráficas permitirán analizar y observar a detalle el comportamiento de las variables controladas para comprobar el correcto funcionamiento de control del sistema.

Figura 40 Gráfica tiempo real Flujo1 VS Flujo2



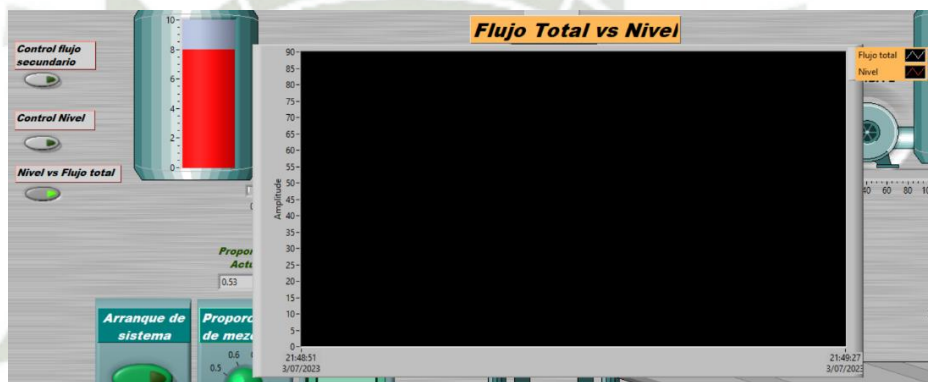
*Nota: Elaboración propia*

Figura 41 Gráfica Nivel vs Set Point en tiempo real



Nota: Elaboración propia

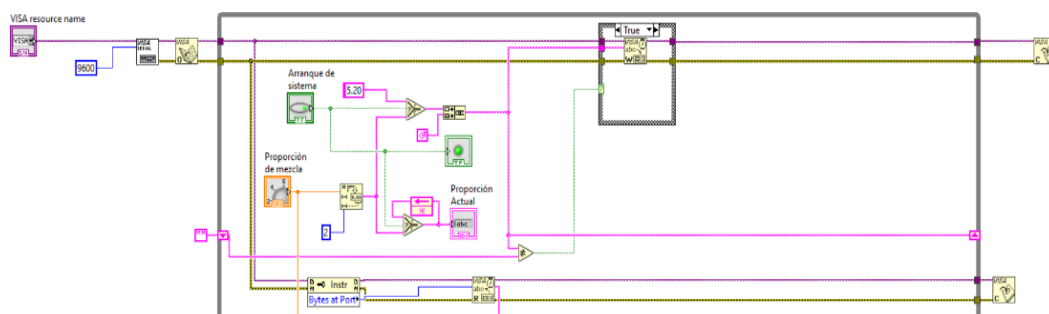
Figura 42 Gráfica Flujo total vs Nivel en tiempo real



Nota: Elaboración propia

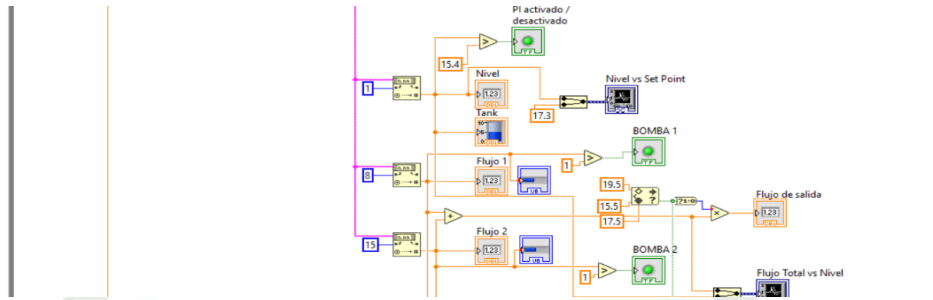
Con respecto a la programación de dicha interfaz, no será analizada a detalle en este documento ya que no es el tema de interés de la tesis y desviaría del tema principal. Sin embargo, será adjuntada como complemento.

Figura 43 Escritura de datos



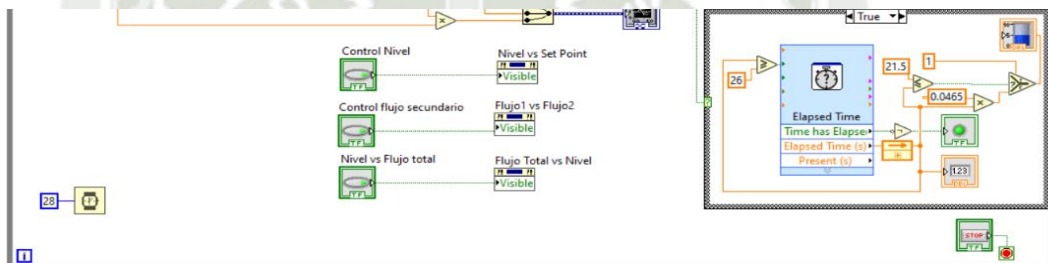
Nota: Elaboración propia

Figura 44 Lectura de datos



Nota: Elaboración propia

Figura 45 Simulación de envasado y gráficas.



Nota: Elaboración propia



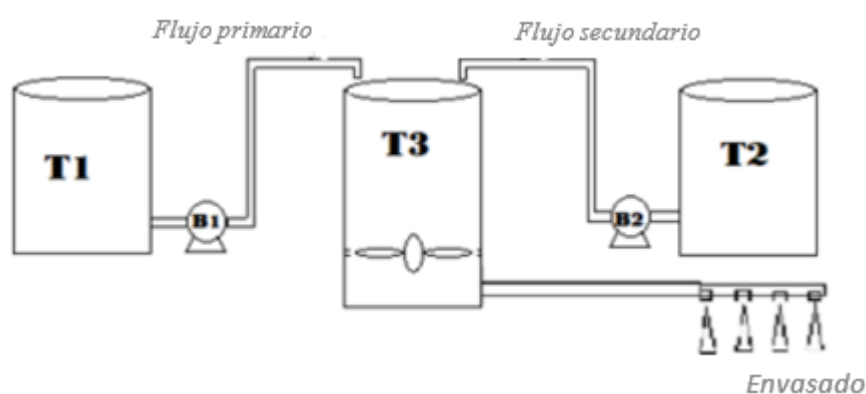
#### 4. DESARROLLO DE LA PLANTA PROTOTIPO

En esta sección iremos describiendo y analizando cada etapa del sistema con la finalidad de plantear el modelo matemático y llegar a una función de transferencia equivalente de todo el sistema.

##### 4.1 Etapas del proceso

De primera intención, para lograr un sistema que sea capaz de graduar la proporción de mezcla entre dos líquidos, es necesario controlar el suministro de uno de ellos en base al otro; por lo tanto, se considera el suministro del primer color líquido como punto de referencia para definir proporcionalmente la cantidad que debe ser suministrada del segundo color líquido según el matiz que se desee conseguir. Para medir el suministro es adecuado usar el flujo volumétrico ya que es una magnitud dinámica y el resultado del tono de la mezcla depende del volumen, dicho esto queda claro que el flujo secundario será un porcentaje del flujo primario y dicho porcentaje determinará el matiz resultante. Esto lo podemos ilustrar de la siguiente manera:

*Figura 46 Sistema de flujos*



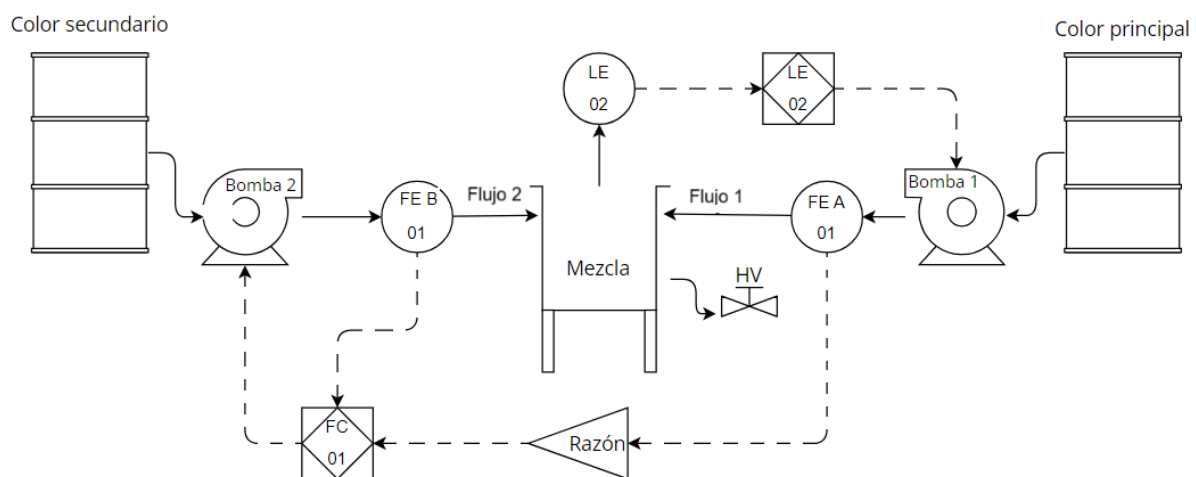
*Nota: Elaboración propia*

Otro detalle importante es la producción continua. Para lograr un suministro constante de la mezcla hacia el envasado es necesario también mantener constante el suministro de los flujos

primario y secundario que serán mezclados; esto debe resultar en un punto de equilibrio entre la entrada y salida del tanque de mezcla que se reflejará en su nivel, es aquí donde podemos aprovechar el fenómeno de la presión hidrostática y ajustar este punto de equilibrio para conseguir un flujo de salida que permita envasar con rapidez y constancia. Mediante el control de nivel del tanque de mezcla T3 podremos mantener el punto de equilibrio deseado.

Considerando el control de flujo secundario y el control de nivel ya mencionados, podemos representar todas las etapas del proceso mediante el siguiente diagrama de señales:

Figura 47 Diagrama de señales del sistema (Nivel, Flujo1 y Flujo2)



*Nota: Elaboración propia*

Las distintas etapas son descritas y desarrolladas a continuación:

#### 4.1.1 Proporción de mezcla

Lo primordial es definir las cantidades de color que serán mezcladas para obtener una cantidad determinada de matizado. Podemos expresar las cantidades a mezclar mediante una

relación entre ambos colores, por ejemplo, para obtener el color violeta necesitamos mezclar una porción de rojo y 2 porciones de azul; por lo tanto, para obtener violeta la relación sería:

$$\text{Rojo} = 2\text{Azul} \quad \text{ó} \quad 0.5\text{Rojo} = \text{Azul}$$

Podemos concluir que existe un factor que define el matiz resultante de la mezcla, este factor es una proporción entre ambos colores. Lo identificaremos como “Factor de Proporción”.

#### 4.1.2 Control de flujo

Ambos colores reposan en su respectivo recipiente, ahora se procede a suministrar ambos colores a través de ductos para ser mezclados en un tercer contenedor; por lo tanto, estamos hablando del flujo volumétrico ya que queremos controlar la cantidad de volumen suministrado según el “Factor de Proporción” definido con anterioridad para obtener el matiz deseado.

En el ejemplo anterior, para obtener el color violeta, el “Factor de Proporción” es de 0.5; es decir que el volumen del color azul suministrado debe ser 0.5 veces el volumen del color rojo. Es necesario controlar el flujo del color azul a través del tiempo para lograr el matiz deseado. En términos generales, si llamamos al flujo de color rojo “F1” y al flujo de color azul “F2”, será necesario controlar F2 usando de referencia al F1. El algoritmo PI implementado en un microcontrolador resulta muy conveniente en esta aplicación ya que es capaz de seguir un set Point.

#### 4.1.3 Suma de flujos

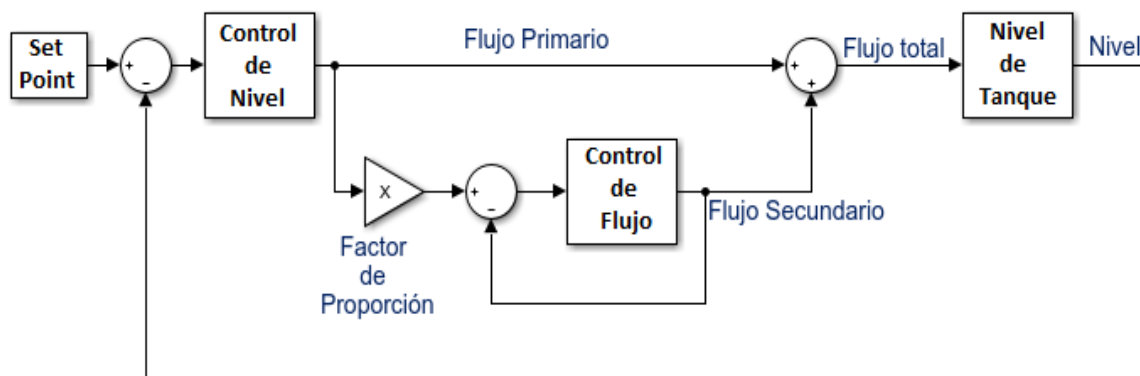
Una vez controlado el flujo secundario en base al primario, ambos se unirán al ser depositados en el contenedor final donde serán mezclados, por lo tanto, ambos flujos se sumarán y formarán un solo flujo de suministro para la mezcla.

#### 4.1.4 Control de Nivel

Para darle continuidad al proceso, es importante generar un suministro constante para el embazado de producto ya matizado, para esto el contenedor donde se realiza la mezcla tiene una salida de flujo en la parte inferior a través de un ducto que suministra el producto final a los embaces. Por lo tanto, resulta conveniente controlar el ingreso de flujo al contenedor de mezcla y así mantener constante el flujo de salida que suministra hacia el envasado para darle continuidad hasta que se termine de producir el lote deseado. Otro detalle importante es que se puede utilizar la presión hidrostática para generar un flujo de salida constante hacia los embaces, para esto será necesario implementar con sistema de control de nivel en el contenedor de mezcla. Si mantenemos constante la altura del material a mezclar depositado en el tanque de mezcla, lograremos un flujo de salida constante en la parte inferior de dicho tanque. Cabe resaltar la necesidad de agregar un agitador para dar uniformidad a la mezcla.

Todas las etapas descritas se representan mediante el siguiente diagrama de bloques:

Figura 48 Diagrama de bloques de los sub-Procesos del sistema



Nota: Elaboración propia

## 4.2 Diseño del sistema de control de flujo 2

En esta etapa hay que resaltar la importancia de mantener F2 bajo control ya que, si este no es modulado correctamente, el matiz resultante no será el deseado, por lo tanto, la planta no cumplirá su propósito. Al añadir un lazo de control realimentado se logra mantener la relación proporcional entre ambos flujos y tener precisión en el suministro continuo de color secundario para la mezcla, por lo tanto, hace robusto al sistema

Como se mencionó con anterioridad, el F2 es directamente proporcional al flujo primario, el factor de proporción de mezcla determina su magnitud.

$$F1 = fp \cdot F2$$

Donde fp es el factor de proporción.

### 4.2.1 Modelo matemático del sistema de flujo 2

Una bomba de suministro genera el flujo, por lo que el flujo producido dependerá netamente de la potencia de la bomba, esta potencia se puede manipular variando el voltaje de alimentación de la bomba; por lo tanto, es posible controlar el flujo variando el voltaje de alimentación de la bomba.

Dos contenedores almacenan 2 colores distintos a mezclar, cada contenedor a su salida tiene una bomba que generará un flujo respectivo, por lo que llamaremos Bomba 1 a la bomba que genera el flujo primario y Bomba 2 a la que genera el flujo secundario como se muestra en la figura 46.

La bomba al ser alimentada a su máxima potencia producirá el máximo flujo, el cual es indicado en las especificaciones del fabricante. Partiendo de esta premisa, podemos considerar

que la salida de la bomba (flujo) depende proporcionalmente de la entrada que la excite y varía en un rango limitado por el máximo flujo y 0. Por lo tanto, podríamos definir este sistema como:

$$\text{Flujo de salida} = \text{Flujo Máximo de bomba} \cdot \text{Entrada} \quad (32)$$

Donde la Entrada tomará valores reales entre 0 y 1; así cuando la entrada sea 0 la salida será el 0% y cuando sea 1 la salida será el 100% de la capacidad máxima de flujo de la bomba.

Según las dimensiones de la planta piloto que serán detalladas más adelante, resulta suficiente una bomba con  $43 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$  de flujo máximo. Por lo tanto, el modelo matemático sería simplemente:

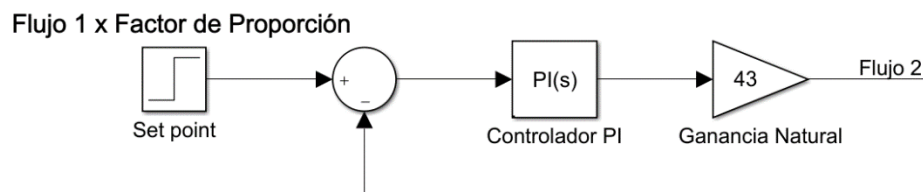
$$\frac{F2(t)}{\text{Entrada}(t)} = 43 \quad (33)$$

y como función de transferencia en el dominio de la frecuencia:

$$\frac{F2(s)}{\text{Entrada}(s)} = 43 \quad (34)$$

Con esta expresión es posible ahora implementar el algoritmo de control realimentado PI, para ello lo representaremos con el siguiente diagrama de bloques:

Figura 49 Sistema de control de flujo 2



Nota: Elaboración propia

La función de transferencia del bloque de control PI viene dada por la expresión 3.

Aplicando álgebra de bloques, se simplifica el sistema representado en la figura 49. Al multiplicar la ganancia con el bloque PI tendremos:

$$C(s) = 43 \cdot k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (35)$$

Entonces el sistema en lazo cerrado  $W(s)$  sería:

$$W(s) = \frac{43 \cdot k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}}{1 + 43 \cdot k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}} = \frac{43 \cdot k_c (\tau_i s + 1)}{\tau_i s + 43 \cdot k_c (\tau_i s + 1)} = \frac{(\tau_i s + 1)}{\frac{\tau_i s}{43 \cdot k_c} + \tau_i s + 1} \quad (36)$$

Factorizando  $\tau_i s$  en el denominador se obtiene:

$$\frac{\tau_i s + 1}{\frac{(1 + 43k_c)}{43k_c} \tau_i s + 1} \quad (37)$$

Se puede notar que estamos frente a una función de transferencia de 1er orden con un cero en el numerador de la siguiente forma:

$$\frac{s + 1}{\tau s + 1} \quad (38)$$

Recordando el procedimiento de diseño por asignación de polos, asignamos un tiempo de establecimiento para el sistema de control del flujo 2. Un detalle importante a considerar para determinar este parámetro, es el tener en cuenta que la modulación del flujo 2 tiene que ser rápida ya que al ser directamente proporcional al flujo 1 tendrá que reaccionar a los cambios de este. El flujo de un líquido es una variable de naturaleza muy rápida, por lo tanto, resulta conveniente asignar un tiempo de establecimiento de 1 segundo; así no afectará significativamente al suministro correcto para el matizado deseado.

Según se mencionó en la sección 2.5.1.2, si el tiempo de establecimiento es:  $\tau_{ss} = 1$  *segundo*; entonces el periodo  $\tau$  para el 2% sería:

$$\tau = \frac{\tau_{ss}}{4} = \frac{1}{4} = 0.25 \text{ segundos} \quad (39)$$

Por lo tanto, la función de transferencia deseada para el sistema de primer orden sería:

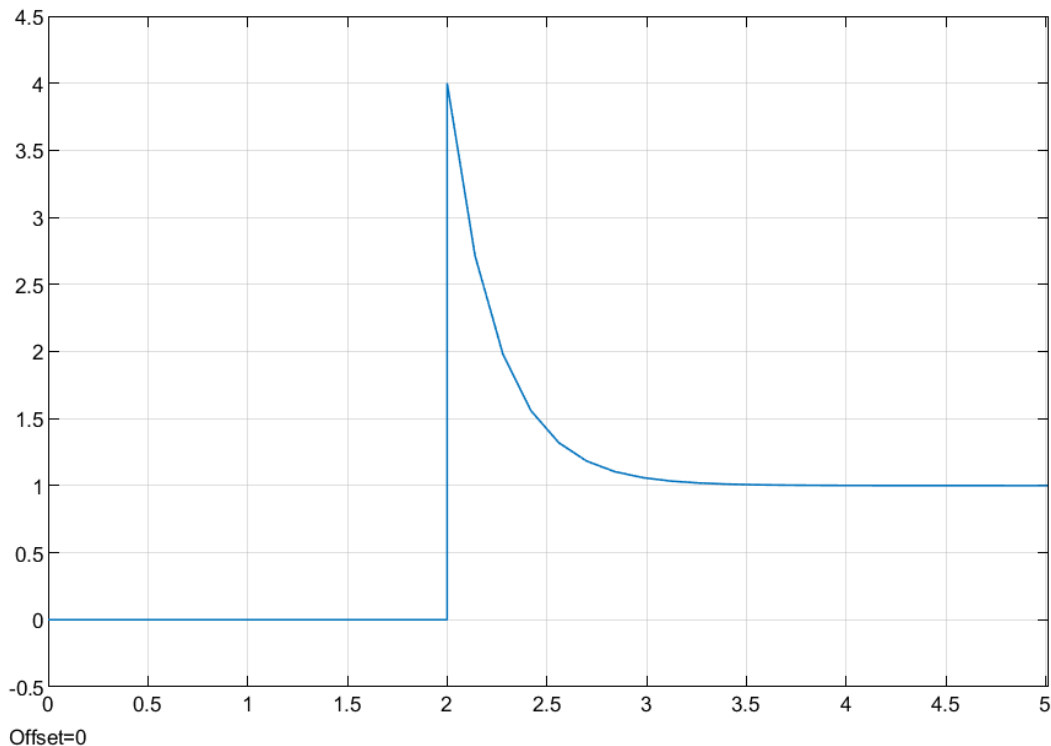
$$\frac{s + 1}{0.25s + 1} \quad (40)$$

Dicha función de transferencia tiene un cero en el numerador equivalente a  $s = -1$ . Los ceros afectan al comportamiento del sistema deseado, sobre todo si es que se encuentran muy próximos a los polos y aún peor si se ubican a la derecha del polo sobre el eje real. En este caso se tiene:

- Polo:  $s = -4$ .
- Cero:  $s = -1$ .

Se puede observar que el cero se encuentra a la derecha del polo, la respuesta que obtendríamos al escalón unitario accionado en el segundo 2 sería:

*Figura 50 Respuesta con cero en -1*



*Nota: Elaboración propia*

La gráfica muestra un tiempo de establecimiento cercano a 1 segundo, pero con un pico 4 veces mayor al valor estacionario podría verse afectada la estabilidad del resto del sistema. Es necesario lograr alejar del origen al cero unas 10 veces más que la magnitud del polo hacia la izquierda, es decir colocarlo en -40 para lograr anular los efectos del polo. La función de transferencia quedaría como se muestra a continuación:

$$\frac{0.025s + 1}{0.25s + 1}; \quad (41)$$

Donde el cero está en  $s = -40$  y el polo está en  $s = -4$

Esta sería la función de transferencia resultante deseada, tal como se menciona en la sección 2.5.1.3, el siguiente paso sería igualar la función de transferencia del sistema de control del Flujo 2 con la función deseada para hallar los parámetros  $K_c$  y  $\tau_i$ :

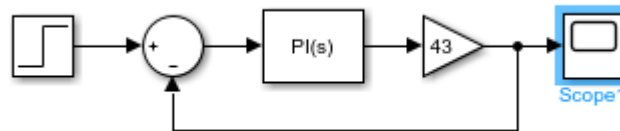
$$\frac{\tau_i + 1}{\frac{(1 + 43 * k_c)}{43k_c} \tau_i s + 1} = \frac{0.025s + 1}{0.25s + 1} \quad (42)$$

Según la expresión fácilmente podemos deducir que  $\tau_i = 0.025$ , por lo tanto, solo quedaría deducir el parámetro  $K_c$ :

$$\frac{(1 + 43 * k_c)}{43k_c} \tau_i = 0.25 \quad \therefore \text{reemplazando } \tau_i \text{ tenemos: } k_c = 0.002554 \quad (43)$$

Implementando en Simulink tenemos:

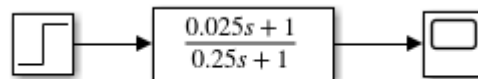
Figura 51 Control de Flujo 2



Nota: Elaboración propia

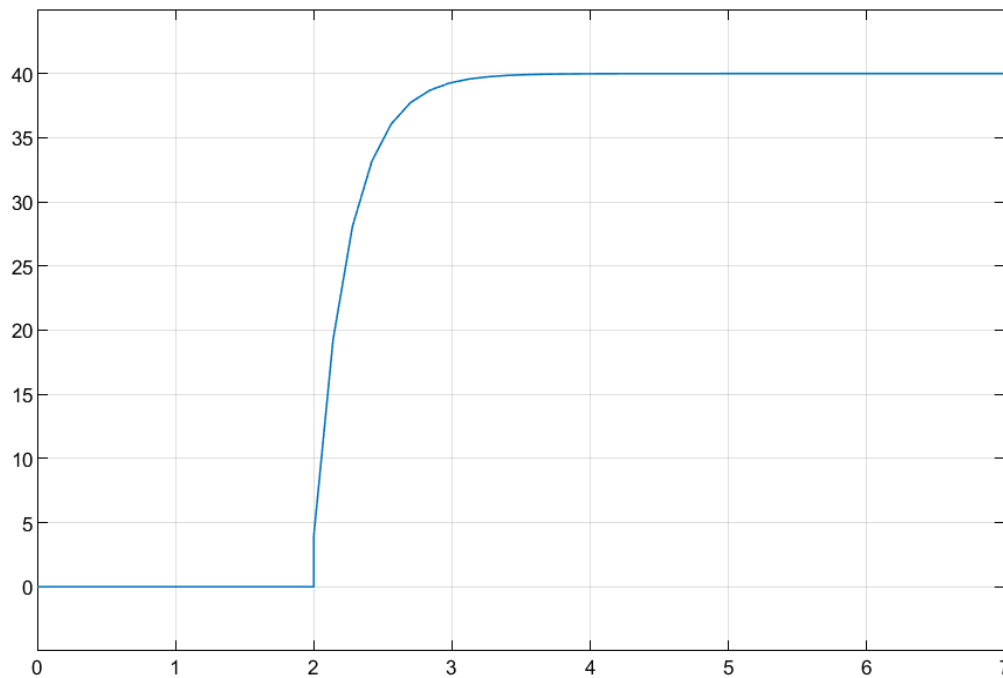
El sistema realimentado equivalente sería:

Figura 52 Control realimentado equivalente Flujo 2



Nota: Elaboración propia

La respuesta para un set Point de  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$  tendremos como salida en el flujo2 el siguiente comportamiento a través del tiempo:

*Figura 53 Respuesta control de Flujo 2*

*Nota: Elaboración propia*

Se puede observar que a partir del segundo 2 empieza el transitorio y termina en el segundo 3; por lo tanto, se logró el tiempo de establecimiento deseado ya que tarda en estabilizarse 1 segundo y los efectos del cero fueron eliminados, el sistema trabaja correctamente.

### 4.3 Suma de flujos

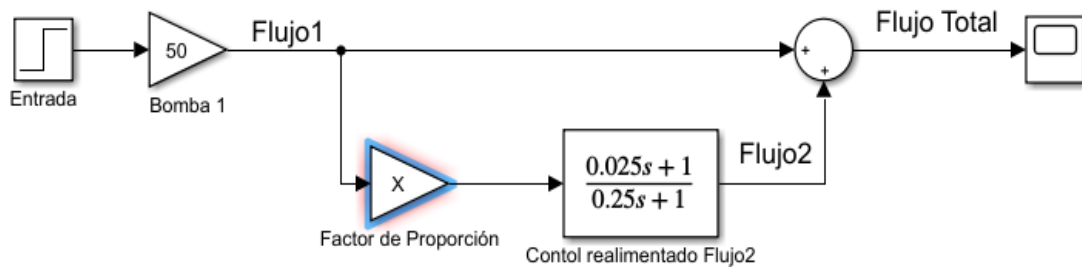
En esta etapa se continúa con la construcción del modelo matemático, esta vez enfocado al comportamiento de la magnitud del flujo total que ingresa al contenedor de mezcla, este está compuesto por el flujo 1 con un color que proviene del contenedor 1, y por el flujo 2 que proviene del contenedor 2 con otro color.

El sistema de control PI del flujo 2 recibe una señal de entrada o “Set Point”. Se mencionó en la sección 4.1.1 que el flujo 2 va en relación al flujo 1 y esta relación es definida por el factor de Proporción. Por lo tanto, el Set Point estará definido de la siguiente manera:

$$SetPoint = FactorProporción * Flujo1 \quad (44)$$

Tomando el modelo matemático ya establecido del sistema de control de flujo2, el sistema hasta este punto se representa de la siguiente forma:

Figura 54 Sistema de flujos



Nota: Elaboración propia

Donde “x” es el factor de proporción; el flujo1 es representado matemáticamente como una ganancia, así como se mostró en la expresión de flujo. La bomba 1 posee un flujo máximo de  $50 \text{ cm}^3/\text{s}$  según las especificaciones del fabricante, por lo tanto, su ganancia será de 50.

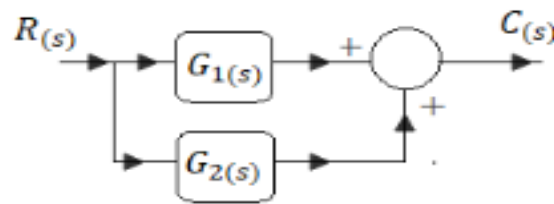
El objetivo es reducir esta expresión a una sola función de transferencia, aplicamos algebra de bloques del siguiente modo.

- El facto de proporción multiplica la expresión de la función de transferencia de control realimentado del flujo 2:

$$X \left( \frac{0.025s + 1}{0.25s + 1} \right) \quad (45)$$

- Tenemos dos funciones de transferencia en paralelo:

Figura 55 Procesos en paralelo (álgebra de bloques)



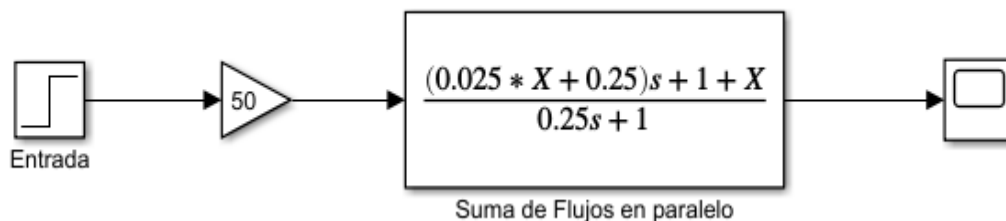
Nota: Ogata (2010)

- En esta ocasión  $G_1$  es igual a 1, como se muestra en la figura 20. Por lo tanto, la expresión quedaría como se muestra:

$$X \frac{0.025s + 1}{0.25s + 1} + 1 = \frac{(0.025X + 0.25)s + 1 + X}{0.25s + 1} \quad (46)$$

- Representado en bloques tendríamos:

Figura 56 Suma de flujos



Nota: Elaboración propia

Tan solo faltaría multiplicar la ganancia del flujo1, el flujo total vendría representado por la siguiente expresión.

$$50 \frac{(0.025X + 0.25)s + 1 + X}{0.25s + 1} \quad (47)$$

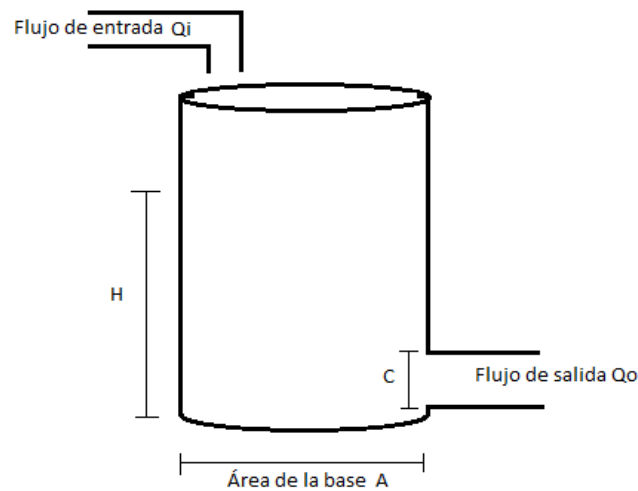
#### 4.4 Sistema de control de nivel

En el contenedor donde serán mezclados los colores suministrados, se quiere controlar el Nivel de llenado como se mencionó en la sección 4.1.4, para esto es necesario elaborar un

modelo matemático del comportamiento del Nivel a través del tiempo, para esto debemos considerar las siguientes magnitudes físicas:

- Flujo de entrada:  $Q_i$
- Flujo de salida:  $Q_o$
- Área de la base del contenedor cilíndrico:  $A$
- Sección del área del flujo de salida:  $C$
- Nivel del contenido:  $H$

*Figura 57 Contenedor de Mezcla*



*Nota: Elaboración propia*

Para encontrar la velocidad de flujo de salida, aplicamos el principio de Bernoulli entre la superficie del tanque y la salida inferior del tanque.

#### **4.4.1 Principio de Bernoulli**

Este principio permite describir el comportamiento de un fluido a lo largo de un trayecto. Básicamente relaciona la velocidad del fluido con la presión a la que está sometido en distintos puntos del trayecto. Podemos expresar el principio de Bernoulli de forma general mediante una ecuación, esta debe considerar la presión, velocidad, densidad y altura de un flujo en varios puntos de su trayecto, esto debido a los cambios de energía potencial debido a la gravedad.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (48)$$

Donde  $P_1$ ,  $v_1$  y  $h_1$  representan la presión, velocidad y altura del fluido en un punto del trayecto, por otro lado  $P_2$ ,  $v_2$  y  $h_2$  representan las mismas magnitudes en un punto distinto.

También consideramos las constantes  $g$  y  $\rho$  que son la gravedad y la densidad del fluido respectivamente.

El punto 1 a considerar será la parte superior del nivel del fluido y el punto 2 será el ducto de salida del flujo en la parte inferior del tanque mostrado en la figura 57.

Centrándonos en la ecuación de Bernoulli, tendremos las siguientes consideraciones en cuenta:

- La presión en el punto 1 y el punto 2 es la presión atmosférica ya que están expuestos al medio ambiente, por lo tanto, en la ecuación de Bernoulli son “0”.
- La velocidad de movimiento del fluido en el punto 1 es muy lenta en comparación a la velocidad en el punto 2 ubicado en el orificio de salida del contenedor en la parte inferior, esto debido a la diferencia del Área de la sección por la que fluyen. Por lo tanto, la velocidad en el punto 1 se considera “0”.
- Respecto a la altura en ambos puntos, se considera el punto más bajo como referencia para empezar a medir la altura, es decir que el punto 2 tiene una altura de “0 cm”.

Aplicando estas consideraciones, la ecuación de Bernoulli quedaría expresada de la siguiente forma:

$$0 + \frac{1}{2} \rho 0_1^2 + \rho g h_1 = 0 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g 0_2 \quad (49)$$

$$\therefore gh_1 = \frac{1}{2}v_2^2 \quad (50)$$

De aquí podemos deducir la velocidad del flujo en el punto 2:

$$v_2 = \sqrt{2gh_1} \quad (51)$$

Considerando que el flujo de un líquido es la velocidad a la que fluye multiplicado por la sección que atraviesa, tenemos que el flujo de salida en el tanque será:

$$Q_o = Sv_2 = S\sqrt{2gh_1} \quad (52)$$

Donde  $Q_o$  es el flujo de salida y  $S$  es el área de la sección por la que va el fluido en ese punto.

#### 4.4.2 Características del sistema

En la planta prototipo, el contenedor cilíndrico de mezcla posee unas dimensiones de 9.6 cm de diámetro y una altura de 25 cm de alto como se muestra a continuación.

*Figura 58 Contenedor de mezcla real para prototipo*



*Nota: Elaboración propia*

Para obtener una ecuación diferencial representativa del comportamiento del nivel en el contenedor de mezcla partiremos del equilibrio de flujos, todo el fluido volumétrico que entra al recipiente menos el fluido que sale es el volumen que contiene en ese instante de tiempo el recipiente. Es decir:

$$\text{Volumen}(t) = Q_i(t) - Q_o(t) \quad (53)$$

Considerando que el volumen en un cilindro es altura por el área de la base, el volumen del líquido contenido en el recipiente se puede expresar mediante la derivada de la altura del nivel con respecto del tiempo ya que es variable al depender del flujo de ingreso y de salida, la expresión quedaría como se muestra a continuación.

$$A \frac{dH}{dt} = Q_i - Q_o \quad (54)$$

Según la expresión, podemos deducir que en el momento en el que la altura del nivel quede estable y constante, es decir que la derivada será "0", el flujo de salida será equivalente a el flujo de entrada, por lo tanto, entrarán en equilibrio.

$$Q_i = Q_o \quad (55)$$

Este es el punto de equilibrio. Para el diseño de la planta prototipo debemos escoger un punto de equilibrio que esté dentro de las capacidades de la planta, por lo tanto, resulta conveniente definir un flujo de entrada y de salida en punto de equilibrio de  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

De forma experimental se obtuvo un flujo de salida de  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$  a una altura de 17.5 cm en el contenedor. Es difícil medir la sección por la que pasa el flujo de salida ya que es una

válvula manual y tiene una estructura interna de difícil acceso y de forma compleja, pero podemos calcularlo mediante la expresión de Bernoulli para el contenedor de nivel.

$$46 \frac{cm^3}{s} = S \sqrt{2 * 980 \frac{cm}{s^2} * 17.5 cm} \quad (56)$$

$$\therefore S = 0.248 cm^2 \quad (57)$$

Así podemos tener completas ya las características y dimensiones del sistema de nivel de la planta prototipo:

**Tabla 8** Dimensiones del prototipo

CARACTERÍSTICA	MEDIDA
Altura del contenedor cilíndrico	25cm
Diámetro del contenedor cilíndrico	9.6 cm
Área del contenedor cilíndrico	$A = \pi \left(\frac{9.6}{2}\right)^2 = 72.38 cm^2$
Altura del punto de equilibrio	17.5 cm
Flujo de entrada y salida de equilibrio	46 cm <sup>3</sup> /s
Sección transversal del flujo de salida	0.248 cm <sup>2</sup>

#### 4.4.3 Planteamiento del modelo matemático

A partir de la expresión para sistema de nivel, reemplazamos los valores según las características de la planta prototipo.

$$72.38 \frac{dH}{dt} = Q_i - Q_2 = Q_i - 0.248 \sqrt{2 * 980 * h_1} \quad (58)$$

$$\therefore 72.38 \frac{dH}{dt} = Q_i - 10.95 \sqrt{h_1} \quad (59)$$

Notamos que nos encontramos ante una expresión no lineal, es decir que el comportamiento del Nivel con respecto al flujo no tiene un comportamiento lineal en los distintos puntos de la altura al que se encuentre, por lo tanto, es necesario usar una estrategia de linealización. En este caso vamos a utilizar las series de Taylor. Notamos que la el volumen contenido varía en función del flujo de entrada y el nivel del líquido en el contenedor.

$$f(Q_i, h_1) = 72.38 \frac{dh_1}{dt} = Q_i - 10.95\sqrt{h_1} \quad (60)$$

Según la definición de las series de Taylor, podemos expandir la función  $f(Q_i, h_1)$  del siguiente modo.

$$f(Q_i, h_1) \approx f(\tilde{Q}_i, \tilde{h}_1) + \frac{\partial f}{\partial Q_i}(Q_i - \tilde{Q}_i) + \frac{\partial f}{\partial h_1}(h_1 - \tilde{h}_1) \quad (61)$$

Donde  $\tilde{Q}_i, \tilde{h}_1$  son el flujo de entrada y nivel del contenedor en sus puntos de equilibrio. Podemos expresar  $(Q_i - \tilde{Q}_i)$  como “ $\Delta Q_i$ ” y  $(h_1 - \tilde{h}_1)$  como “ $\Delta h_1$ ”. Por otro lado, al evaluar las derivadas en los puntos de equilibrio y considerando lo anteriormente dicho tendríamos la siguiente expresión:

$$f(Q_i, h_1) \approx \tilde{Q}_i - 0.248\sqrt{2 * 980 * \tilde{h}_1} + \Delta Q_i - \frac{10.95}{2 * \sqrt{\tilde{h}_1}} \Delta h_1 \quad (62)$$

Partiendo de la función de Taylor sin expandir, se sabe que  $f(Q_i, h_1) = 72.38 \frac{dh_1}{dt}$  y si la evaluamos en el punto de equilibrio tenemos  $f(Q_i, h_1)|_{\tilde{Q}_i, \tilde{h}_1} = \tilde{Q}_i - 0.248\sqrt{2 * 980 * \tilde{h}_1}$ . Esta es la primera expresión de la función de Taylor ya expandida; si despejamos  $f(Q_i, h_1)$  tenemos:

$$f(Q_i, h_1) - f(Q_i, h_1)|_{\bar{Q}_i, \bar{h}_1} \approx \Delta Q_i - \frac{10.95}{2 * \sqrt{\bar{h}_1}} \Delta h_1 \quad (63)$$

Podemos expresar el término  $f(Q_i, h_1) - f(Q_i, h_1)|_{\bar{Q}_i, \bar{h}_1}$  como una variación de  $f(Q_i, h_1)$  ya que estamos restando la función en dos puntos distintos,  $\Delta f(Q_i, h_1)$ . La Expresión expandida en series de Taylor quedaría así:

$$\Delta f(Q_i, h_1) \approx 72.38 \frac{d\Delta h_1}{dt} \approx \Delta Q_i - 1.308 \Delta h_1 \quad (64)$$

Se puede notar que ahora la ecuación diferencia ya es lineal.

Cabe resaltar que esta expresión solo puede aplicarse a zonas de trabajo cercanas a el punto de equilibrio donde fue evaluada.

Una vez linealizada la expresión que describe el comportamiento del flujo de salida en el contenedor en función del nivel y flujo de entrada, podemos ahora pasarla al plano complejo S mediante la transformada de Laplace con fines de simplificación, ya que resulta complejo el tratamiento de ecuaciones diferenciales. Aplicando transformada de Laplace tenemos:

$$72.38s * \Delta h_1(s) = \Delta Q_i(s) - 1.308 \Delta h_1(s) \quad (65)$$

Despejando  $\Delta h_1(s)$  tenemos:

$$\Delta h_1(s) = \frac{\Delta Q_i(s)}{72.38s + 1.308} \quad (66)$$

Por lo tanto, la función de transferencia quedaría definida como:

$$\frac{\Delta h_1(s)}{\Delta Q_i(s)} = \frac{1}{72.38s + 1.308} = \frac{0.764}{55.31s + 1} \quad (67)$$

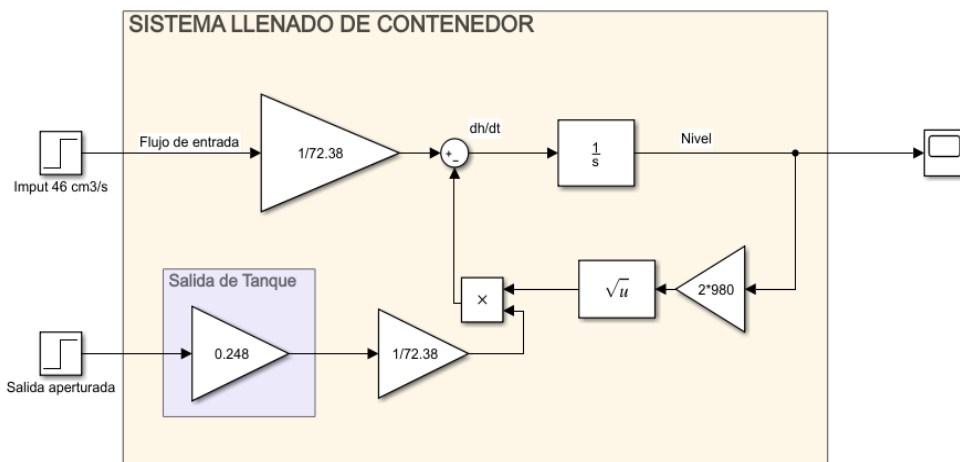
Esta sería la expresión para el modelo matemático que representa el sistema de nivel para el punto de trabajo de 17.5 cm de altura.

Podemos notar que es un sistema de primer orden. Que posee una ganancia natural de 0.764 y una constante de tiempo de 55.31 segundos, por lo tanto, el tiempo de establecimiento ante alguna perturbación cercana al punto de trabajo será en aproximadamente  $55.31 * 4 = 221$  segundos.

#### 4.4.4 Simulación vs realidad

Para comprobar el modelo matemático, realizamos simulación en simulink, primero implementando la ecuación diferencial que plantea el sistema de nivel.

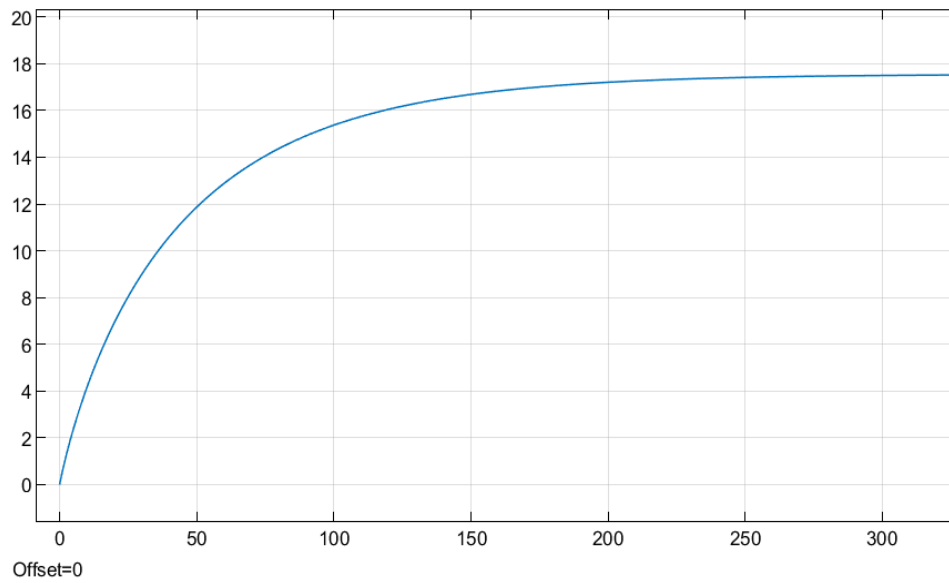
*Figura 59 Implementación de Ecuación Diferencial Sistema de nivel*



*Nota: Elaboración propia*

La respuesta a su salida será:

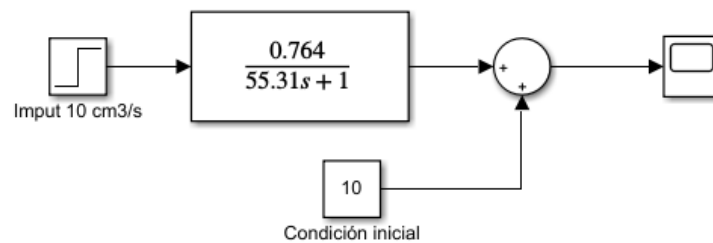
*Figura 60 Respuesta simulada del Nivel (modelo matemático)*



*Nota: Elaboración propia*

Ahora será implementado con la función de transferencia:

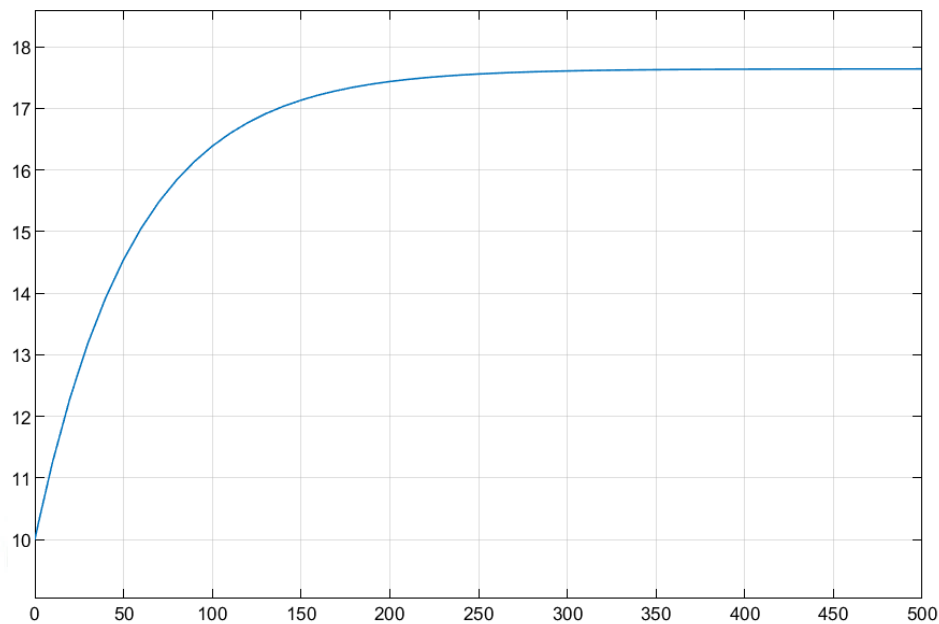
*Figura 61 Implementación con función de transferencia*



*Nota: Elaboración propia*

La salida será:

Figura 62 Nivel con función de transferencia



*Nota: Elaboración propia*

Como se puede observar, en ambas situaciones el tiempo de establecimiento ronda los 230 segundos y ambos entran en equilibrio a los 17.5 cm de altura. Esto nos corrobora que el modelo matemático expresado en el plano de la frecuencia compleja  $S$  es bastante cercano a la ecuación diferencial que representa todo el sistema. Para la implementación con función de transferencia se usó una condición inicial de 10cm de nivel ya que es necesario trabajar cerca al punto de trabajo.

Las pruebas echas en la planta prototipo real arrojaron los siguientes resultados:

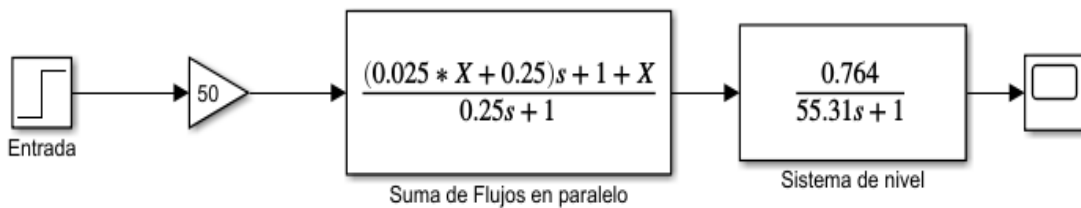
- Flujo inicial:  $38 \text{ cm}^3/\text{s}$
- Altura inicial: 12.8 cm
- Flujo final:  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$
- Altura final: 17.5 cm
- Tiempo de establecimiento: 250 segundos

Podemos concluir que el modelo matemático del sistema de nivel es preciso en lo necesario para su representación.

### 4.5 Control de Nivel

Considerando el sistema representado en diagrama de bloques como se muestra en la figura 22, ahora añadimos la función de transferencia obtenida para el sistema de nivel, por lo tanto, le diagrama de bloques queda como se muestra a continuación:

Figura 63 Sistema de Flujos y Nivel



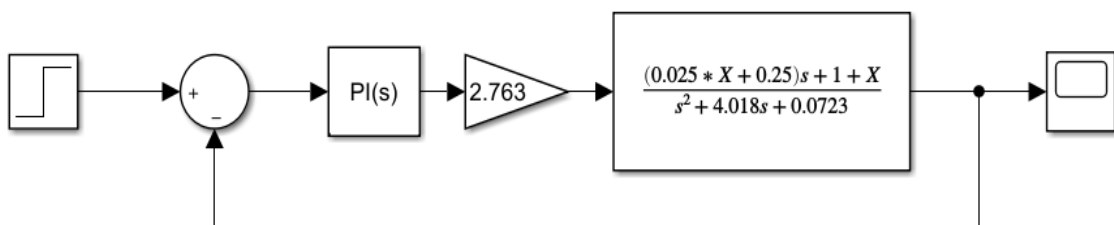
Nota: Elaboración propia

El objetivo es obtener una sola expresión por lo que aplicaremos una convolución para obtener una sola función de transferencia que describa al sistema:

$$2.763 \frac{(0.025X + 0.25)s + 1 + X}{s^2 + 4.018s + 0.0723} \quad (68)$$

Como se puede apreciar, ahora el sistema es de segundo orden con un cero en el numerador. Hasta este punto obtuvimos una función de transferencia que describe al sistema sin el control de Nivel. Si acoplamos ahora el algoritmo PI realimentado para controlar el Nivel tendremos:

Figura 64 Sistema de Nivel y flujo Realimentado



Nota: Elaboración propia

Ahora corresponde la sintonización de los parámetros P-I como se mostró en la sección Control P-I por asignación de polos para sistemas de 2do orden. La función de transferencia en lazo cerrado  $W(s)$  quedaría del siguiente modo:

$$W(s) = \frac{2.763 \frac{(0.025X + 0.25)s + 1 + X}{s^2 + 4.018s + 0.0723} * k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}}{1 + 2.763 \frac{(0.025X + 0.25)s + 1 + X}{s^2 + 4.018s + 0.0723} * k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}} \quad (69)$$

Resolviendo tendremos la siguiente expresión:

$$W(s) = k \frac{((0.025X + 0.25)s + 1 + X)(sk_c + k_i)}{s^3 + (4.0181 + kk_c(0.025X + 0.25))s^2 + ((0.0723 + kk_i(0.025X + 0.25) + kk_c(1 + X))s + kk_i(1 + X))} \quad (70)$$

Donde  $k$  es la ganancia natural del sistema y equivale a 2.763. Podemos observar que ahora tenemos una función de transferencia de 3er orden y 2 ceros en el numerador.

Si recordamos la expresión ideal de la función de transferencia para el sistema de tercer orden, podemos igualar los denominadores y desplegar 3 ecuaciones:

$$4.0181 + kk_c(0.025X + 0.25) = (\beta + 2)\delta\omega_n \quad (71)$$

$$(0.0723 + kk_i(0.025X + 0.25) + kk_c(1 + X)) = (2\beta\delta^2 + 1)\omega_n^2 \quad (72)$$

$$kk_i(1 + X) = \beta\delta\omega_n^3 \quad (73)$$

Los valores  $\beta$ ,  $\delta$  y  $\omega_n$  se obtienen según el diseño como se menciona en la sección 2.5.1.1, en esta ocasión se asignará un máximo sobre impulso del 1% para evitar oscilaciones y un tiempo de establecimiento de 14 segundos. Se escogió este tiempo ya que es el máximo tiempo

que tarda el sistema en alcanzar el punto de equilibrio de 17.5 cm de altura desde los 15cm a una razón de 0.25 entre los flujos de entrada que es la mínima según las limitaciones del sistema; esto considerando que se debe de trabajar en puntos cercanos al punto de equilibrio, en este caso a 2.5cm de distancia.

Aplicando la expresión de factor de amortiguamiento tenemos:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{1}{100}\right)^2}{\sqrt{\pi^2 + \ln\left(\frac{1}{100}\right)^2}} = 0.8261 \quad (74)$$

Ahora calculamos la frecuencia natural  $\omega_n$  para considerar la estabilidad al 98% del set point:

$$\omega_n = \frac{4}{\delta * \tau_{ss}} = 0.3459 \quad (75)$$

Teniendo estos valores podemos pasar a resolver las 3 ecuaciones planteadas anteriormente. Lo primero es encontrar el valor de  $\beta$ , para esto nos centramos en la ecuación 2, para esto es necesario primero despejar la ecuación 1 para el término  $k_c$  y la ecuación 3 para el término  $k_i$ .

Despejando la ecuación 1:

$$k_c = \frac{0.1034\beta - 1.2474}{0.025X + 0.25} \quad (76)$$

Despejando la ecuación 3:

$$k_i = \frac{0.0124\beta}{1 + X} \quad (77)$$

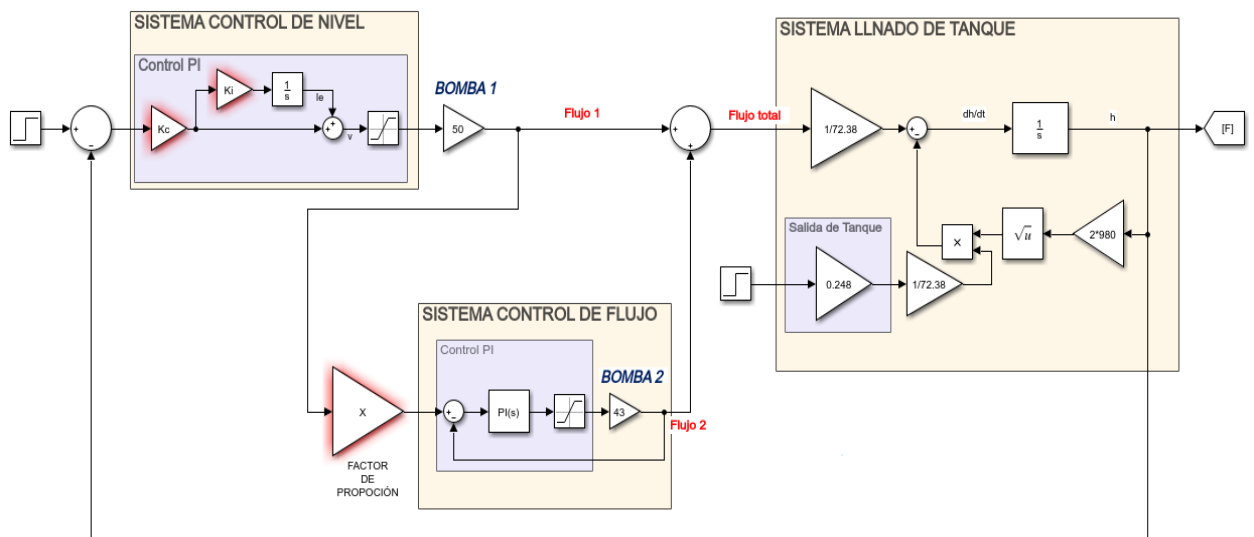
Ahora reemplazamos  $k_c$  y  $k_i$  en la ecuación 2, obtendremos la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{0.0473(0.025X + 0.25)(1 + X) + 3.4466(1 + X)^2}{0.2857(1 + X)^2 + 0.0342(0.025X + 0.25)^2 - 0.1633(0.025X + 0.25)(1 + X)} \quad (78)$$

Una vez encontrado el valor de  $\beta$  podemos hallar los valores de  $k_c$  y  $k_i$ ; como vemos el valor de  $\beta$  depende del Factor de proporción  $X$  mencionado anteriormente. Hasta este punto se ha encontrado ya un algoritmo matemático que permita sintonizar las ganancias dinámicas para el sistema P-I que permita controlar el Nivel de mezcla del contenedor según sea el matiz deseado.

Para finalizar este capítulo se hará una representación en diagrama de bloques del sistema completo con los sistemas expresados mediante sus ecuaciones diferenciales:

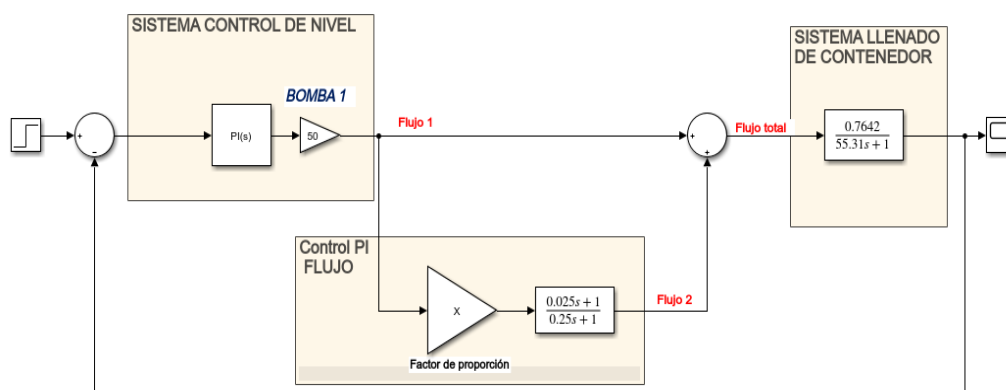
*Figura 65 Representación del sistema completo*



*Nota: Elaboración propia*

Ahora expresado en funciones de transferencia:

Figura 66 Representación del sistema completo con función de transferencia



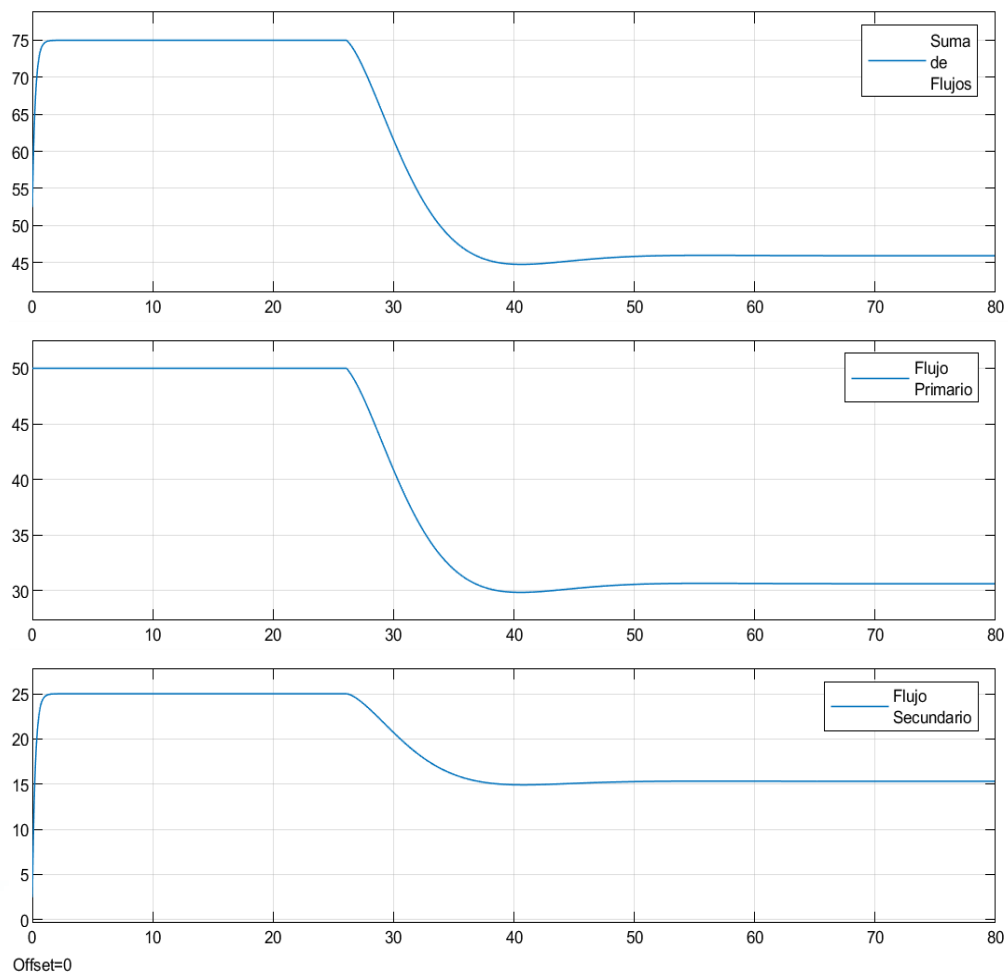
Nota: Elaboración propia

Si asignamos un valor para el factor de proporción, por ejemplo 0.5, el algoritmo matemático de sintonización para los valores de  $\beta$ ,  $k_c$  y  $k_i$  nos arrojan los siguientes valores:

- $\beta = 13.3811$
- $k_c = 0.5192$
- $k_i = 1.1103$

Si observamos el comportamiento de los flujos veremos que el Flujo 2 es 0.5 veces el Flujo 1 todo el tiempo:

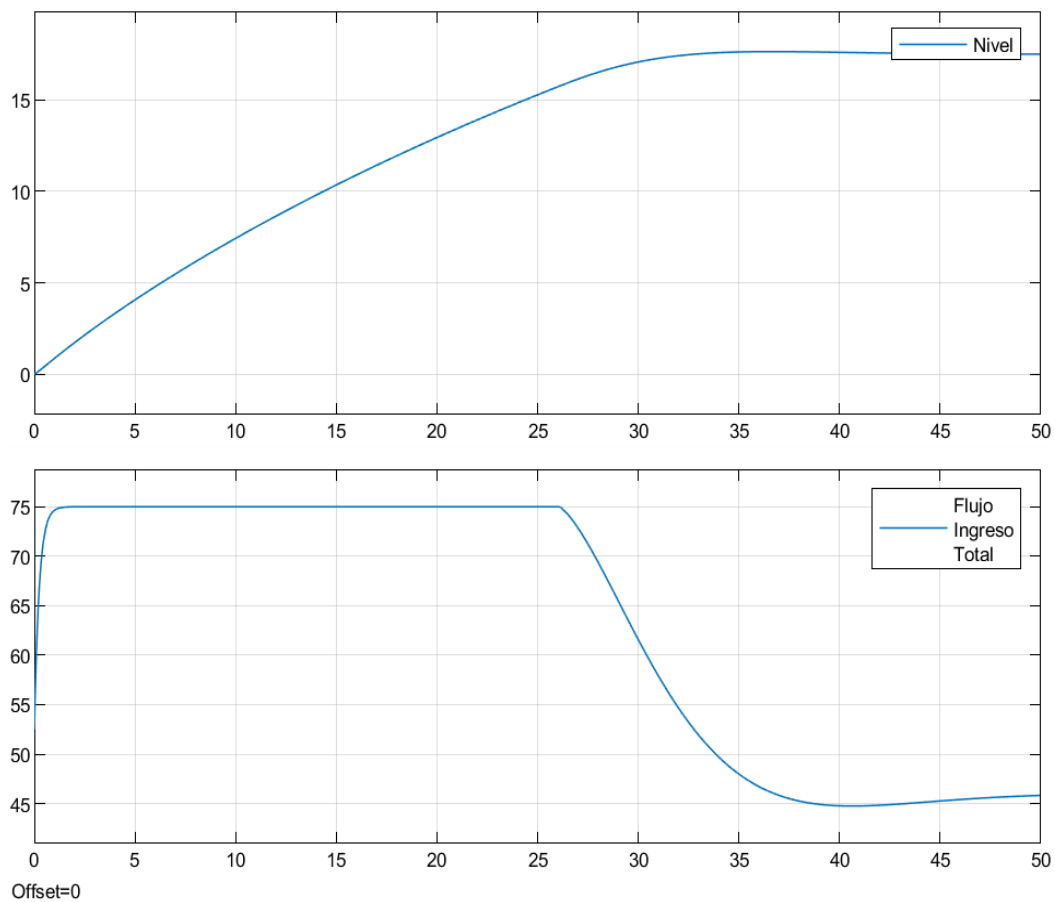
Figura 67 Flujo total (imagen superior), Flujo 1(imagen media), Flujo 2(imagen inferior)



*Nota: Elaboración propia*

En la zona estable se puede notar que la suma de ambos flujos da  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$ , el flujo del punto de equilibrio. Por otro lado, la evolución del nivel en el tiempo es como se muestra:

Figura 68 Nivel (imagen superior), Flujo total de entrada (imagen inferior)

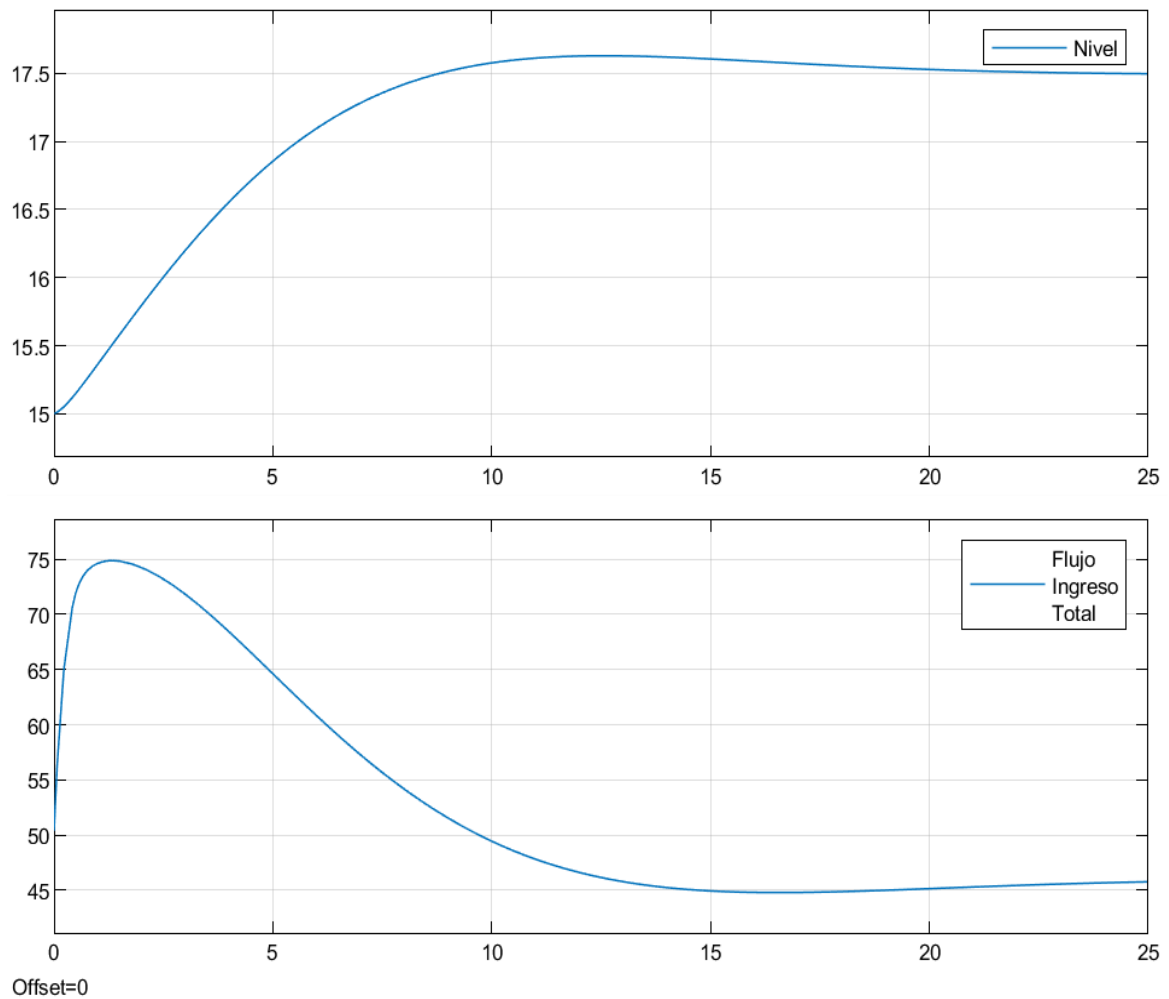


*Nota: Elaboración propia*

El nivel tarda en estabilizarse unos 35 segundos desde 0 y se estabiliza en 17.5 cm que es el set Point. En la parte inferior se aprecia el flujo total de ingreso el cual es  $75 \text{ cm}^3/\text{s}$  mientras llena el recipiente, pero luego se estabiliza en  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Este valor es el resultado de la suma del flujo primario y flujo secundario los cuales mantienen una relación proporcional de 0.5.

Para poder apreciar los 14 segundos de tiempo de establecimiento definidos en el diseño para el sistema de control de nivel, es necesario poner una condición inicial cercana al punto de trabajo que es 17.5 cm de altura, esto debido a que la función de transferencia solo se aplica a puntos cercanos al área de trabajo ya que fue linealizada con anterioridad. Partiendo de 15cm de altura tendremos el siguiente resultado:

Figura 69 Respuesta Nivel-Flujo condición inicial 15cm



*Nota: Elaboración propia*

Se puede apreciar que ambas magnitudes se estabilizan en aproximadamente 15 segundos.

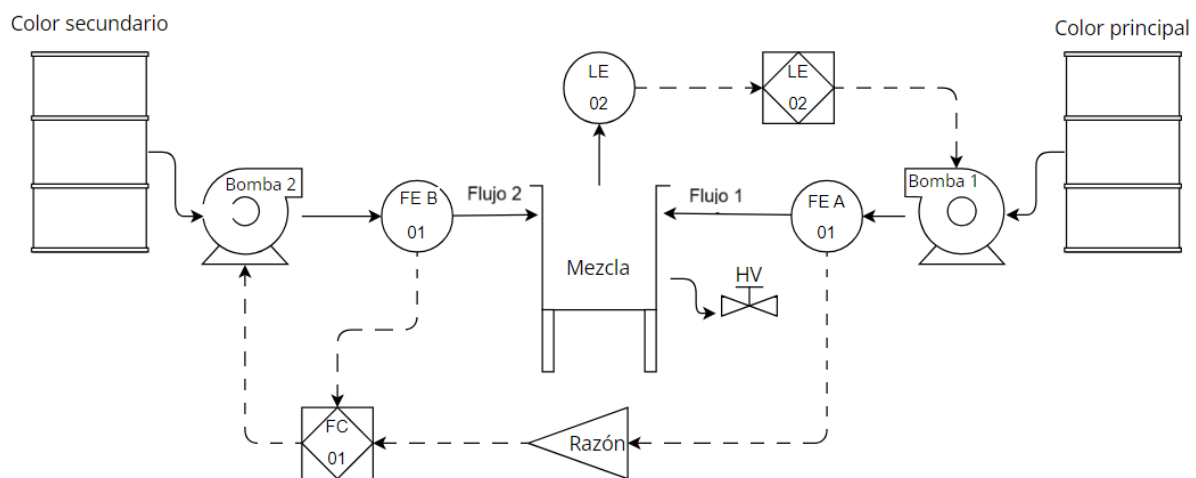


## 5. RESULTADOS

### 5.1 Modelo matemático

Después de hacer un análisis de las magnitudes físicas que intervienen en el proceso, quedó claro que todo el sistema gira en torno a dos sub procesos dentro del sistema como se mostró en la figura 47, estos son el control de flujo secundario y control de nivel.

Figura 47 Diagrama de señales del sistema (Nivel, Flujo1 y Flujo2)



*Nota: Elaboración propia*

El modelo matemático para el sub proceso de generación de flujo con una bomba resulto sencillo, al basarse en una relación proporcional entre la entrada y la salida como se explicó en la sección Modelo matemático del sistema de flujo. La expresión se muestra a continuación:

$$\text{Flujo de salida} = \text{Flujo Máximo de bomba} \cdot \text{Entrada}$$

Donde el flujo máximo considerado es de  $43 \text{ cm}^3/\text{s}$  y la entrada varía entre los valores reales de 0 y 1. Expresado como función de transferencia en el dominio de la frecuencia se obtuvo:

$$\frac{F2(s)}{Entrada(s)} = 43 \quad (79)$$

Se hizo pruebas para experimentar la cercanía del modelo matemático a la realidad, al aplicar la máxima excitación de 12VDC, la bomba llegó a su máximo flujo en aproximadamente 0.07 segundos. Este retardo no es significativo por lo que se puede considerar un sistema lineal y el resultado es satisfactorio.

Se pudo desarrollar un modelo matemático para el sistema de nivel, sin embargo, este es más complejo que el caso del sistema de flujo. Mediante el principio de Bernoulli se pudo plantear un sistema de ecuaciones que representa el comportamiento del nivel en función del flujo de entrada y salida del tanque, así se mostró en la sección Características del sistema.

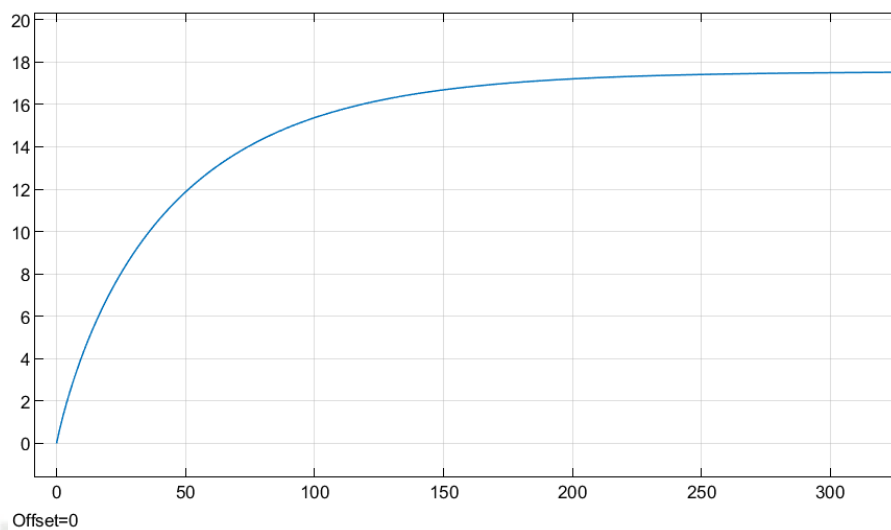
$$A \frac{dH}{dt} = Q_i - Q_2 \quad (80)$$

Como se muestra en la tabla 2, las dimensiones y magnitudes obtenidas experimentalmente se reemplazaron en la expresión del modelo matemático y se obtuvo la ecuación diferencial que representa el sistema de nivel.

$$72.38 \frac{dH}{dt} = Q_i - 10.95 \sqrt{h_1} \quad (81)$$

Para comprobar si esta expresión describe el comportamiento del nivel en el tiempo, se implementó en Simulink mediante la estructura mostrada en la figura 59; y los resultados obtenidos fueron como se mostró en la figura 60.

Figura 60 Respuesta simulada del Nivel (modelo matemático)



*Nota: Elaboración propia*

En la simulación, el nivel se estabiliza en 17.5 cm a los 300 segundos con un flujo de ingreso de  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Experimentalmente, se midió en tiempo que toma en estabilizarse el tanque de mezcla a los 17.5 cm con el mismo flujo de entrada y fue de 335 segundos. Por lo tanto, el resultado es satisfactorio ya que la diferencia entre la realidad y la simulación no es significativa.

Dicha expresión no se le puede aplicar la transformada de Laplace por no ser lineal, por lo cual fue necesario linealizarla aplicando series de Taylor como se muestra en la sección Planteamiento del modelo matemático.

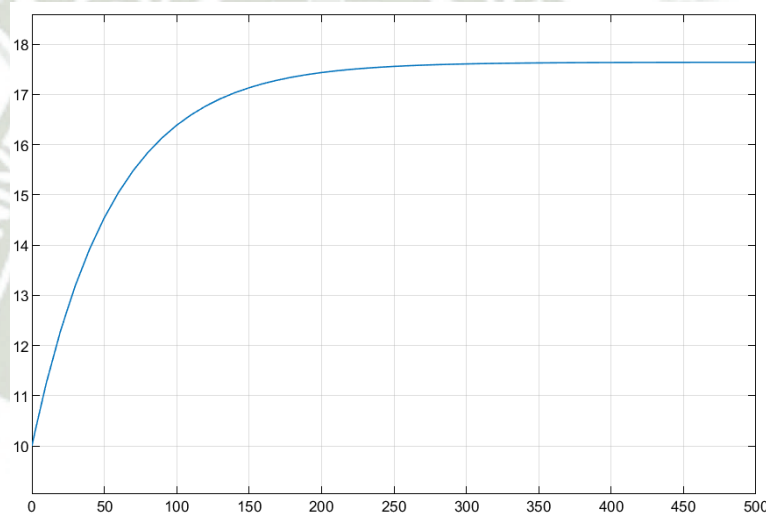
$$72.38 \frac{d\Delta h_1}{dt} \approx \Delta Q_i - 1.308\Delta h_1 \quad (82)$$

Esta expresión vendría a ser el modelo matemático linealizado que se obtuvo para el sistema de nivel, cabe resaltar que esta expresión solo aplica en regiones cercanas al punto de trabajo, en este caso 17.5 cm de altura en el nivel de tanque. Aplicando la transformada de Laplace se pudo obtener su función de transferencia.

$$\frac{\Delta h_1(s)}{\Delta Q_i(s)} = \frac{0.764}{55.31s + 1} \quad (83)$$

Esta expresión también resultó certera a pesar de que solo es aplicable a un área cercana al punto de trabajo. Para comprobarlo se implementó en Simulink como se muestra en la figura 61, se le dio una condición inicial de 10cm para entrar en áreas cercanas al punto de trabajo (17.5 cm) y el escalón de entrada fue un flujo de  $10\text{cm}^3/\text{s}$ , los resultados obtenidos se muestran en la figura 62.

*Figura 62 Nivel con función de transferencia*



*Nota: Elaboración propia*

Como se puede observar, el sistema se estabiliza en aproximadamente 230 segundos.

Las pruebas echas en la planta prototipo real arrojaron los siguientes resultados:

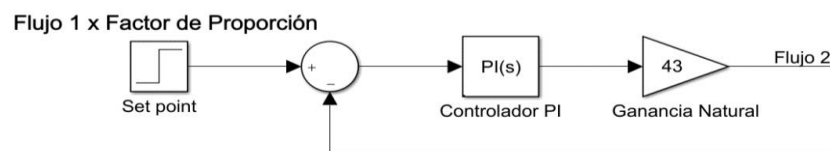
- Flujo inicial:  $37\text{ cm}^3/\text{s}$
- Altura inicial: 12.8 cm
- Flujo final:  $46\text{ cm}^3/\text{s}$
- Altura final: 17.5 cm
- Tiempo de establecimiento: 250 segundos

## 5.2 Proporcionalidad entre flujos

Se pudo implementar un sistema de control para el sistema de flujo secundario, este sistema logró mantener la magnitud del flujo secundario en una proporción fija del flujo primario. A pesar de los cambios bruscos en el flujo primario, el flujo secundario fue capaz de seguirlo proporcionalmente, esto gracias al tiempo de establecimiento con el que fue diseñado el sistema ya que, al ser rápida la dinámica del flujo, el tiempo de establecimiento de 1 segundo hace al sistema capaz de seguir la velocidad de la dinámica y a la vez mantiene la proporción entre ambos flujos.

Para esto se incorporó el modelo matemático del sistema de flujo secundario al sistema de control como se muestra en la figura 49 y se obtuvo una función de transferencia para el sistema de control de flujo 2 completo.

Figura 49 Sistema de control de flujo 2

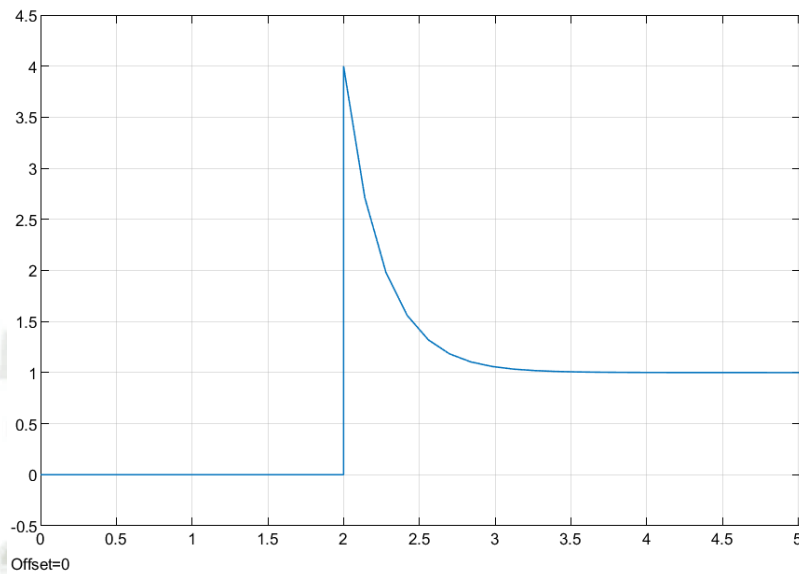


*Nota: Elaboración propia*

$$W(s) = \frac{\tau_i s + 1}{\frac{(1 + 43k_c)}{43k_c} \tau_i s + 1} \quad (84)$$

El cero existente en la función de transferencia afectó al funcionamiento del sistema de control como se muestra en la figura 50.

Figura 50 Respuesta con cero en -1



Nota: Elaboración propia

Esto se solucionó alejando el cero del origen 10 veces más que el polo. Así se obtuvo una función de transferencia ideal que, al ser igualada con la función de transferencia real se pudo calcular los parámetros P-I para el sistema de control de flujo.

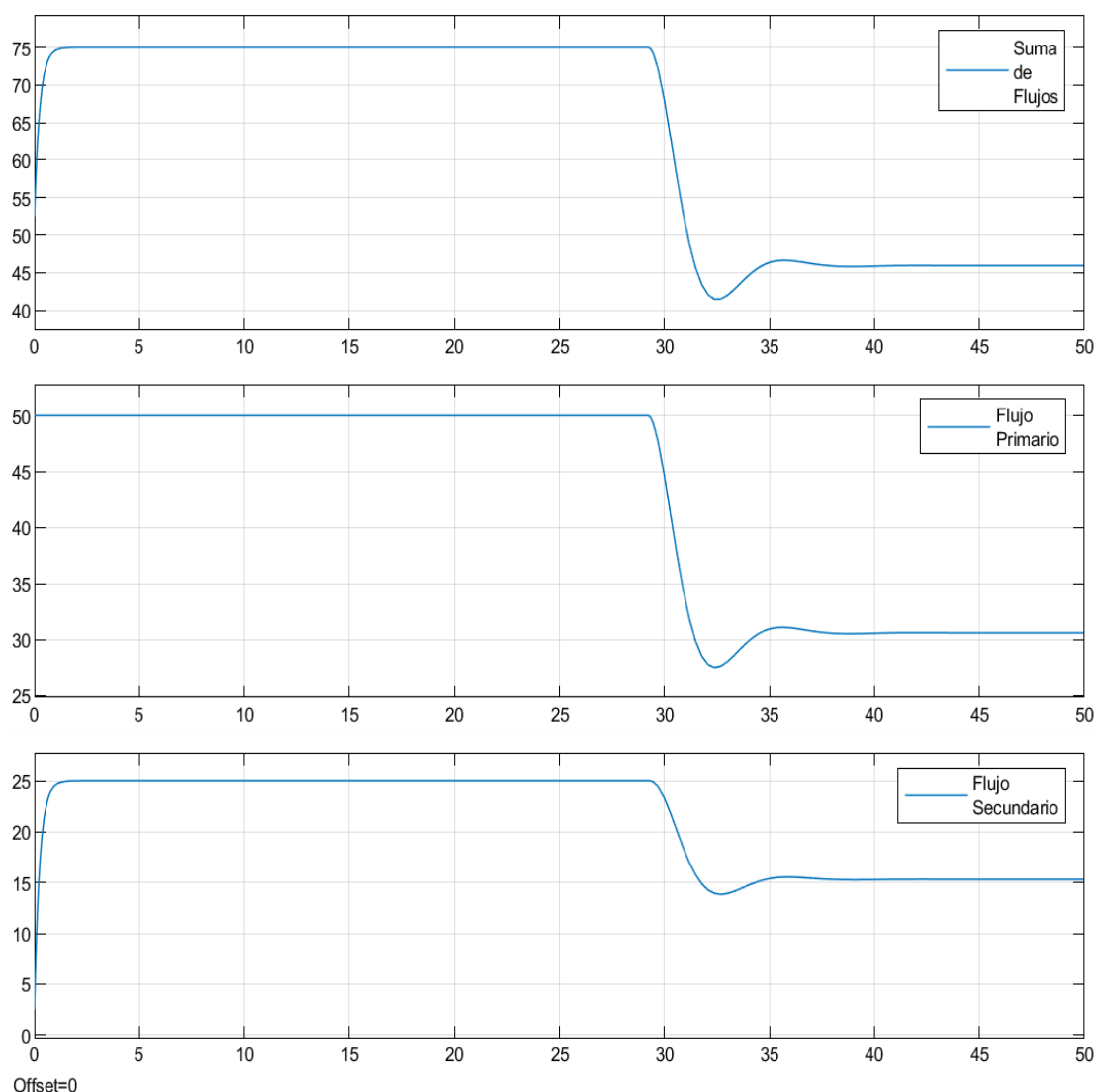
$$\frac{\tau_i + 1}{(1 + 43 * k_c) \tau_i s + 1} = \frac{0.025s + 1}{0.25s + 1} \quad (85)$$

$$\tau_i = 0.025$$

$$k_c = 0.002554$$

Con estos parámetros, los resultados de simulación mostrados en la figura 67 fueron satisfactorios.

Figura 67 Flujo total (imagen superior), Flujo 1(imagen media), Flujo 2(imagen inferior)



*Nota: Elaboración propia*

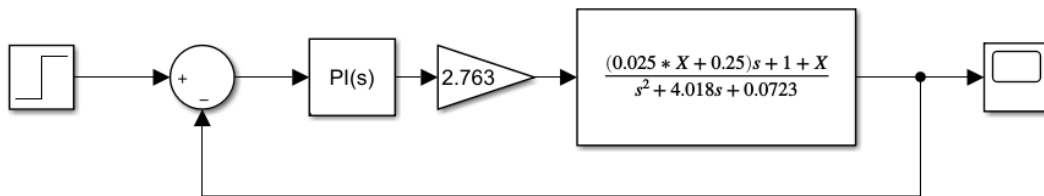
Se puede apreciar que el flujo secundario siguió al flujo primario manteniendo una razón proporcional de 0.5 todo el tiempo y no tardó alrededor de 1 segundo para alcanzarlo.

Un segundo como tiempo de establecimiento es lo suficientemente rápido para seguir los cambios del flujo primario sin afectar el matiz deseado.

### 5.3 Sintonización de ganancias dinámicas

Se logró implementar un algoritmo matemático que proporcione las ganancias proporcional e integral de forma automática para el sistema de control de nivel. Para ello, se obtuvo primero una sola función que describa el sistema completo como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 64, de aquí se dedujo una sola función de transferencia que describe todo el sistema completo.

Figura 64 Sistema de Nivel y flujo Realimentado



Nota: Elaboración propia

$$W(s) = \frac{2.763 \frac{(0.025X + 0.25)s + 1 + X}{s^2 + 4.018s + 0.0723} * k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}}{1 + 2.763 \frac{(0.025X + 0.25)s + 1 + X}{s^2 + 4.018s + 0.0723} * k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}} \quad (86)$$

Como se mencionó en la sección 4.1.4, estos parámetros se mueven en función del factor de proporción que define el matiz resultante y esto se ve en el algoritmo de sintonización de ganancias dinámica que consiste en 3 expresiones, la ecuación 71, ecuación 72 y ecuación 73.

$$4.0181 + k k_c (0.025X + 0.25) = (\beta + 2) \delta \omega_n \quad (87)$$

$$(0.0723 + k k_i (0.025X + 0.25) + k k_c (1 + X)) = (2\beta \delta^2 + 1) \omega_n^2 \quad (88)$$

$$k k_i (1 + X) = \beta \delta \omega_n^3 \quad (89)$$

En el diseño se asignó un máximo sobre impulso de 1%, de aquí se dedujo el factor de amortiguamiento  $\delta = 0.8261$  y la frecuencia natural  $\omega_n = 0.3459$ . Se reemplazó estos valores y se hizo un sistema de ecuaciones con las 3 expresiones para deducir los valores de  $\beta$ ,  $k_c$  y  $k_i$ .

$$\beta = \frac{0.0473(0.025X + 0.25)(1 + X) + 3.4466(1 + X)^2}{0.2857(1 + X)^2 + 0.0342(0.025X + 0.25)^2 - 0.1633(0.025X + 0.25)(1 + X)} \quad (90)$$

$$k_c = \frac{0.1034\beta - 1.2474}{0.025X + 0.25} \quad (91)$$

$$k_i = \frac{0.0124\beta}{1 + X} \quad (92)$$

Donde “X” es el factor de proporción para la mezcla. Se asignó un factor de proporción de 0.5 y se obtuvo los siguientes valores:

- $\beta = 13.3811$
- $k_c = 0.5192$
- $k_i = 1.1103$

El algoritmo fue exitoso en simulación, sin embargo, hay que considerar factores que ocurren en la realidad y no se consideran en el modelo matemático, por ello se hizo un ligero reajuste en las expresiones para el cálculo de las ganancias proporcional e integral. Las expresiones teóricas y simuladas sirvieron como base, luego de unas pruebas experimentales las expresiones reales quedaron como se muestra a continuación:

$$k_c = \frac{0.5\beta - 1}{0.025X + 0.25} \quad (93)$$

$$k_i = \frac{0.015\beta}{1 + X} \quad (94)$$

Esta función de transferencia solo aplica en áreas cercanas al punto de trabajo 17.5 cm, es decir que sus condiciones iniciales no empezarán en cero, esto difiere de la realidad ya que en un inicio el contenedor de mezcla estará vacío y tomará un tiempo llegar al área de trabajo, pero para entonces ya habrá un desequilibrio en el funcionamiento del sistema automático debido a que este el integrador se saturará y en consecuencia su comportamiento no será el deseado. Esto se solucionó implementando un algoritmo en el programa que active el sistema de control de nivel solo en áreas cercanas al punto de equilibrio, es decir, a partir de 15cm de altura.

En la interfaz HMI se puede observar el ítem que se enciende cuando está activo el sistema de control de nivel y viceversa.



Por otro lado, se hizo un reajuste en las expresiones de cálculo en un inicio su señal de control empieza con un flujo de entrada de  $0 \text{ cm}^3/\text{s}$  y va aumentando con el tiempo, pero a una altura de 15 cm el flujo de salida del contenedor le ganará al flujo de entrada y el nivel empezará a disminuir haciendo que el sistema se desestabilice. Esto se solucionó dándole una condición inicial al sistema de control para que no inicie desde 0, sino más bien desde el 25% de su salida.

#### 5.4 Producción continua

Gracias al nivel controlado en 17.5 cm se produce un flujo de  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$  a la salida del contenedor produciendo así 2.7 litros /min, mientras no falten los colores primarios como suministro para la mezcla la planta podrá seguir produciendo cuanto sea necesario. Si es necesario interrumpir el flujo de salida para el cambio de envase, el controlador de nivel se encargará de interrumpir el proceso de mezcla ya que el nivel subirá y el sistema de control no permitirá que siga subiendo.

### 5.5 Planta prototipo

El diseño de la planta prototipo se dividió en 3 partes, etapa de entrada, controlador y etapa de salidas. A continuación se muestra una lista con los componentes que fueron utilizados.

- Dos bombas de 12VDC a 2A para el suministro de flujos.
- Dos flujómetros de efecto Hall.
- Un sensor de nivel de ultrasonido con sistema de disparo.
- Microcontrolador ATmega2560.
- Tarjeta de recepción y distribución de señales.
- Dos transistores Mosfet tipo N.
- Potenciómetro de 1K  $\Omega$ .
- Cable USB tipo B 2.0.
- Sistema HMI implementado en la plataforma LabVIEW.
- Fuente de alimentación 12VDC.
- Dos contenedores para los colores a mezclar.
- Un contenedor de mezcla.
- Válvula manual de descarga de mezcla.

En la sección 3 se comparó distintos modelos de instrumentos y controladores, la selección de modelos adecuados se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 9** *Comparación de componentes*

Adecuado	No adecuado
- Flujómetro de efecto Hall YF-S401, rango de medida de 0 a 100 cm <sup>3</sup> /s, menor resolución.	Flujómetro de efecto Hall YF-S201, rango de medida de 0 a 583 cm <sup>3</sup> /s, mayor resolución.
- Bomba DP-521, alimentación de 12VDC a 2A, produce hasta 50 cm <sup>3</sup> /s, voltaje mínimo de alimentación de 1.5V.	Bomba DC20E, alimentación de 12VDC a 0.4A, produce hasta 45 cm <sup>3</sup> /s y su voltaje mínimo de alimentación es de 5V
- Microcontrolador ATmega2560, de 8 bits y trabaja a 5V, 54 E/S digitales	Microcontrolador Atmel ARM Cortex-M3, de 32 bits y trabaja a 3.2V, 54 E/S.

Los sensores de la etapa de entrada fueron compatibles con el controlador ya que manejan los mismos niveles de alimentación y sus rangos de medida son los adecuados para las dimensiones que maneja la planta prototipó, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la Tabla 4. Los dos flujómetros y el sensor de ultrasonido (nivel) emiten una señal análoga representada por PWM por lo que fue necesario implementar un código que interprete la lectura a base de frecuencia como se muestra en la figura 14 y figura 17.

*Figura 14 Código para lectura de flujo*

```
PH1= pulseIn(9,HIGH); //Tiempo de pulso en Alto (microsegundos)
PL1= pulseIn(9,LOW); //Tiempo de pulso en Bajo (microsegundos)
frecuencia1=1000000.00/(PH1+PL1); //Inversión de periodo completo escalado a segundos
F1 = frecuencia1*0.189; //Obtener Flujo al multiplicar frecuencia con factor
```

*Nota: Elaboración propia*

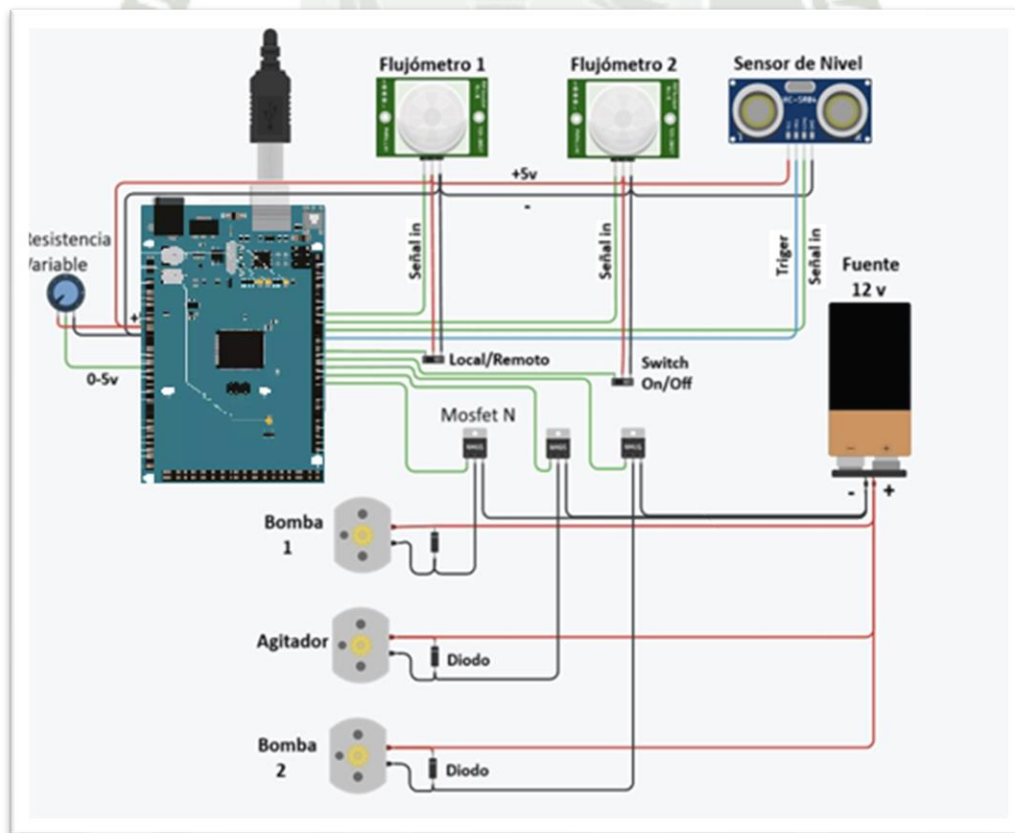
Figura 17 Código para leer el Nivel de contenedor

```
digitalWrite(6,HIGH); //Pulso para TRIG
delayMicroseconds(15); //Retardo para mantener en alto TRIG
digitalWrite(6,LOW); //Pulso TRIG en bajo
tiempo_ultrasonido=pulseIn(7,HIGH); //Medida de tiempo de pulso ECHO
Nivel= 24.1- ( tiempo_ultrasonido / 58.2 ); //constante que convierte la distancia en centímetros (2*31.45)
```

Nota: Elaboración propia

En la etapa de salidas, las bombas no fueron compatibles con el controlador. El requisito para las bombas es que sean de flujo variable y de buena resolución, el amperaje que manejan dichas bombas suele ser de 2 A con una alimentación de 12 V, por ello fue necesario implementar una etapa de potencia a base de mosfet tipo N como se muestra en la figura 19. Las bombas fueron moduladas a través de una señal PWM de 5V de amplitud, así se logró implementar la etapa de actuadores sin problemas de compatibilidad.

Figura 21 Recepción de señales y distribución de alimentación



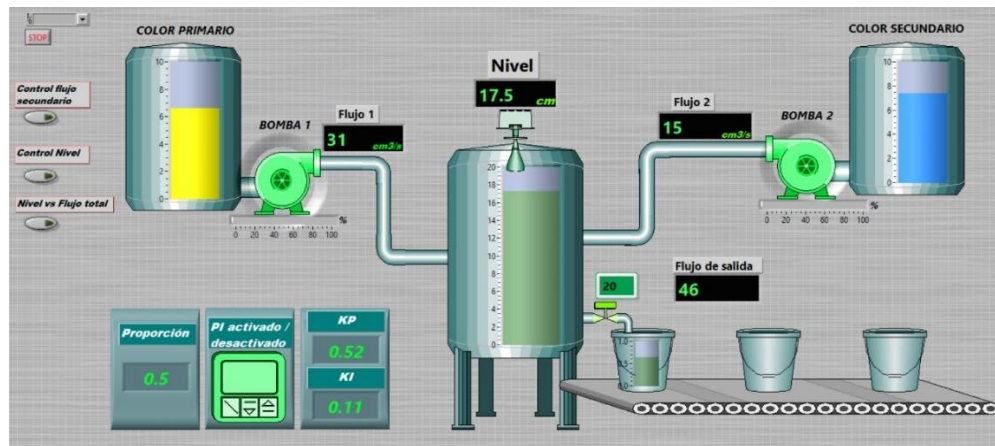
Nota: Elaboración propia

Cabe resaltar las limitaciones de los instrumentos. El sensor de flujo no es capaz de medir flujos menores a  $5 \text{ cm}^3/\text{s}$  ya que el valor que proporciona se basa en la frecuencia de su señal y al ser una frecuencia muy baja el programa tarda mucho en tomar lectura del periodo, esto ocasiona un desequilibrio en el programa debido a que deja de ejecutar otras instrucciones a su debido tiempo. Se implementó un algoritmo en el programa que inhabilita la lectura de flujo cuando tiene valores menores a  $6 \text{ cm}^3/\text{s}$  logrando así eliminar este problema. Por otro lado, las bombas no trabajan con voltajes menores a  $2\text{V}$ , esto limita el rango en el cual puede trabajar el factor de proporción de mezcla ya que un factor muy bajo requerirá de valores muy bajos para el flujo secundario, por lo tanto, el voltaje de alimentación de la bomba dos será muy bajo y no moverá la bomba. Por este motivo la planta solo produce matices con valores para el factor de proporción entre 0.3 y 1.

### **5.6 Sistema HMI**

Se logró implementar un sistema de supervisión HMI en la plataforma LabVIEW. Las herramientas que ofrece esta plataforma son intuitivas, el entorno de diseño es amigable y mediante la comunicación serial fue posible establecer un intercambio de datos entre el controlador y el HMI en tiempo real. Los ítems y animación implementados en el HMI permiten tener una clara idea del funcionamiento de la planta, las variables relevantes nivel, flujo1, flujo2, factor de proporción, flujo de salida y ganancias sintonizadas se encuentran presentes en el entorno y muestran sus valores en tiempo real como se ve en la figura 38.

Figura 38 HMI Equipos Activados



*Nota: Elaboración propia*

La implementación de ventanas emergentes fue con fines demostrativos, estas ventanas permiten comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas de control de flujo y nivel, comparan valores entre el flujo 1 y flujo 2, entre el nivel y Setpoint y entre el nivel y el flujo total como se muestra en la figura 64, figura 65y figura 66 respectivamente.

La transmisión de datos fue a través de una sola trama portadora de todas las variables como se muestra en la figura 36 para el microcontrolador.

Figura 36 Código para comunicación serial

```
Serial.print(100+Nivel,1);|
Serial.print('\t');
Serial.print(100+F1,0);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+F2,0);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+P,2);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+kpl,3);
Serial.print('\t');
Serial.print(100+kil,3);
Serial.print('\t');
Serial.println(PIA);
```

*Nota: elaboración propia*

### 5.7 Mejora de producción

Para poder medir los resultados respecto a la producción, comparemos el tiempo que tarda la producción de un lote de matizado en forma manual y automática. Esto lo veremos a través del siguiente indicador relativo.

$$I_{tp} = \frac{T_m - T_a}{T_m} \cdot 100 \quad (95)$$

Donde  $I_{tp}$  es el indicador de tiempo de producción,  $T_m$  es el tiempo que tarda en producir un lote manualmente y  $T_a$  es el tiempo que tarda en producir un lote la planta automatizada.

Si consideramos producir un lote de 60 litros, el tiempo que tarda en producirse manualmente es de 40 minutos, esto considerando que el operador tendrá que hacer mediciones de las cantidades a matizar repetidas veces hasta obtener los 60 litros, también el tiempo que tarda en batir y lograr una mezcla uniforme cada vez que mezcle. Por otro lado, el sistema automatizado obtuvo los 60 litros en 15 minutos ya que la producción continua evita la repetición de pasos cada que el recipiente se llene hasta alcanzar la cantidad deseada.

$$I_{tp} = \frac{40 - 15}{40} \cdot 100 = 62.5\% \quad (96)$$

Se obtuvo una mejora del 62.5% en el tiempo de producción.

Poniendo un caso hipotético, la demanda de matizados al día es de 600 litros, en forma manual no se logra producir más que 400 litros, de forma automática se logra producir 660 litros. Si consideramos que el litro vale 12 soles, podemos proyectar que de forma manual se obtiene un ingreso de 4800 soles y de forma automática se obtendría un ingreso de 7920 soles.

$$I_i = \frac{7920 - 4800}{4800} \cdot 100 = 65\% \quad (97)$$

El indicador de ingresos nos muestra una mejora del 65%.

Logró hacerse una producción continua y la calidad del producto mejoró ya que las mediciones son más exactas y continuas.



## Conclusiones

1. El modelo matemático para el sistema de flujo como se expresa en flujo 2 cumplió su cometido, describe el comportamiento del flujo impulsado por la bomba. En la realidad existe un retardo de 0.07 segundos el cual no es significativo para el sistema, posteriormente dicha expresión sirvió para encontrar las ganancias proporcional e integral para el control de flujo.

Respecto al sistema de nivel, como se muestra en la expresión nivel, esta no es lineal por lo que tuvo que linealizarse mediante las series de Taylor como se mostró en su expresión linealizada; finalmente se obtuvo una función de transferencia aplicando la transformada de Laplace como se muestra en la función de nivel. Los resultados mostrados en la figura 59, figura 60 y figura 61 muestran la similitud entre la simulación y la realidad ya que se comprobó que el tiempo de establecimiento para áreas cercanas a 17.5 cm de altura es de 230 segundos en simulación y 250 segundos en la realidad. De igual manera llenando el recipiente desde cero tardó 330 segundos en estabilizarse en 17.5 cm, en simulación tardó 300 segundos. Por lo tanto, al no ser significativas las diferencias se concluye que el modelo matemático obtenido es satisfactorio.

2. Se pudo implementar el control realimentado para mantener la relación constante entre el flujo secundario y el principal, este hizo consistente y robusto el sistema ya que la proporción entre ambos flujos se mantiene constante, cuando el flujo primario sufre cambios bruscos el flujo secundario tarda tan solo 1 segundo en alcanzarlo logrando así que el matiz no se vea afectado por variaciones en el flujo. Para esto la ganancia proporcional se estableció en 0.002554 y la ganancia integral fue de 0.025, los resultados de la función de transferencia de control de flujo se mostraron en la figura 53 donde claramente el flujo alcanza el set point de  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$  en un segundo.

3. El algoritmo matemático obtenido para la sintonización automática de las ganancias dinámicas cumple su función de manera satisfactoria, es capaz de calcular las ganancias

proporcional e integral para el sistema de control de nivel en función del matiz que se desee obtener, es decir, en función de la razón proporcional entre los flujos. Dicho algoritmo se obtuvo después de haber integrado todo el sistema y obtener una sola Función de transferencia como se muestra en la expresión FT global, de aquí se dedujo las 3 expresiones que permiten calcular la ganancia proporcional e integral, estas son BETA, K proporcional y K integral. Asignando un factor de proporción de 0.5 y un máximo sobre impulso de 16%, el algoritmo nos arrojó los valores de  $\beta = 6.3876$ ,  $k_c = 1.1158$  y  $k_i = 1.1573$ . Estos valores hicieron que el comportamiento del sistema fuera el deseado como se muestra en la figura 67 y figura 68; sin embargo, en la planta real se tuvo que agregar una condición inicial al sistema de control de nivel ya que este solo trabaja correctamente dentro de un área cercana al punto de trabajo que es 17.5 cm. La condición inicial fue hacer arrancar al controlador desde el 50% a su salida.

4. La producción de matizado es continua, gracias al sistema de control de nivel es posible suministrar un flujo continuo hacia el envasado aprovechando la presión hidrostática. Dicho flujo es de  $46 \text{ cm}^3/\text{s}$  y produce 2.7 litros/minuto.

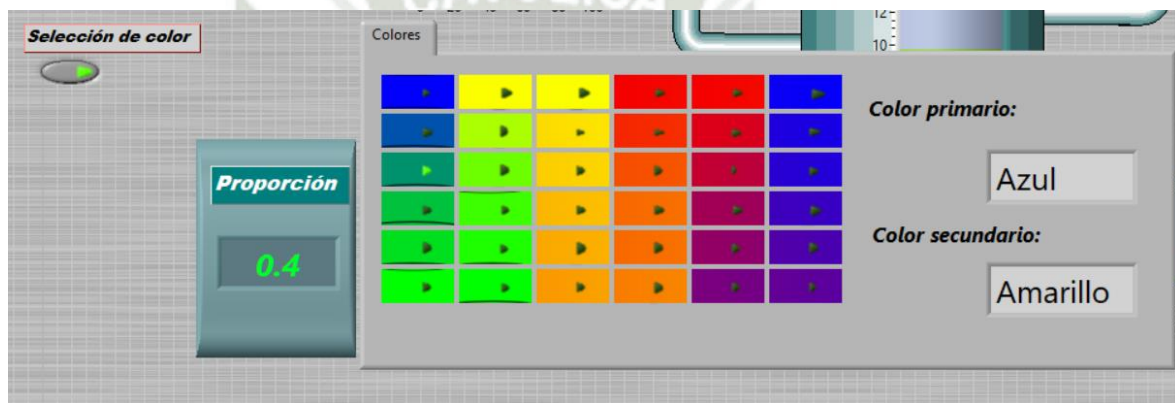
5. Se pudo implementar una planta prototipo capaz de medir flujos y nivel, procesarlos y en base a ello controlar la producción de matizado con precisión y de forma continua. Fue necesario elaborar un circuito en placa para la recepción de señales, etapa de potencia y distribución de alimentación como se muestra en la figura 21. Se contrastó los valores de medición de los sensores con valores experimentales, así se confirmó que las medidas de los sensores eran correctas.

6. La elaboración continua y automatizada mejoró notablemente la calidad y cantidad de producción, mediante el indicador de tiempo mostrado en la sección Mejora de producción, se pudo demostrar una mejora del 62.5% en el tiempo de producción con respecto al modo de producción manual, de igual modo mediante un ejemplo hipotético se demostró una mejora del 65% en el ingreso diario, esto repercutiría positivamente en la economía del negocio.

## Recomendaciones

- Panel de selección de color: Se recomienda implementar un panel que permita seleccionar el tono de matiz que se desee obtener evitamos que el operador deba estar calculando la razón adecuada entre flujos, este sistema debe ser capaz de calcular el valor de la razón que se necesita de forma automática en base a un catálogo de colores predefinido como se muestra a continuación.

Figura 70 Panel de selección de color



*Nota: elaboración propia*

Este sistema daría una mejor experiencia de usuario y mayor fluidez al proceso.

- Sistema de alarmas e interlock: Es conveniente para todo proceso industrial contar con alarmas que indiquen desbordes de medidas y acciones para mantener seguro a los equipos y al personal, en este caso resulta importante evitar desbordes de mezcla en los contenedores. Se recomienda establecer alarmas baja y alta a los 5cm y 20cm respectivamente y detener automáticamente el suministro si el nivel es menor a 3 cm y mayor a 22cm de altura.

Por otro lado, se recomienda proteger el sistema de flujo implementando una alarma si el flujo 2 tarda mas de 3 segundos en alcanzar su set point, y si tarda mas de 5 segundos detener el proceso para revisar posibles fallas en el sistema. Al mismo tiempo generar un historial de eventos en los que se accionaron las alarmas con la finalidad de analizar tendencias.

## Referencia

- ArduinoVe. (2022). *ARDUINOVE.COM*. Obtenido de [https://www.arduinove.com/index.php?route=product/product&product\\_id=325](https://www.arduinove.com/index.php?route=product/product&product_id=325)
- Castaño, S. (2015). *Control I+PD*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-de-procesos/control-ipd/>
- Castaño, S. (2017). *Controlador PI por Asignación de Polos*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/controlador-pi-por-asignacion-de-polos>
- Castaño, S. (2017). *Función de Transferencia*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/funcion-de-transferencia/>
- Castaño, S. (2019). *Control en Cascada*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-en-cascada/>
- Castaño, S. (2019). *PWM Arduino*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/pwm-arduino/>
- Castaño, S. (2020). *Control en Cascada*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-en-cascada/>
- Castaño, S. (2020). *Sistemas de Segundo Orden*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/sistemas-de-segundo-orden/>
- Castaño, S. (2020). *Sistemas de tercer orden*. Obtenido de Control Automático Educación: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/sistemas-de-tercer-orden/>
- Díaz, J. (2017). Diseño e Implementación de un sistema de control cascada en la planta de intercambio térmico - PIT000.
- MACTRÓNICA. (2014). *MACTRÓNICA*. Obtenido de <https://www.mactronica.com.co/sensor-de-flujo-de-agua-yf-s401>
- Moreno, R. P. (1999). Evolución histórica de la Ingeniería de Control

NAYLAMPMECHATRONICS. (2021). *TUTORIAL DE ARDUINO Y SENSOR ULTRASÓNICO HC-SR04*. Obtenido de NAYLAMPMECHATRONICS.COM: [https://naylampmechatronics.com/blog/10\\_tutorial-de-arduino-y-sensor-ultrasonico-hc-sr04.html](https://naylampmechatronics.com/blog/10_tutorial-de-arduino-y-sensor-ultrasonico-hc-sr04.html)

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control Moderno*. Madrid: PEARSON.

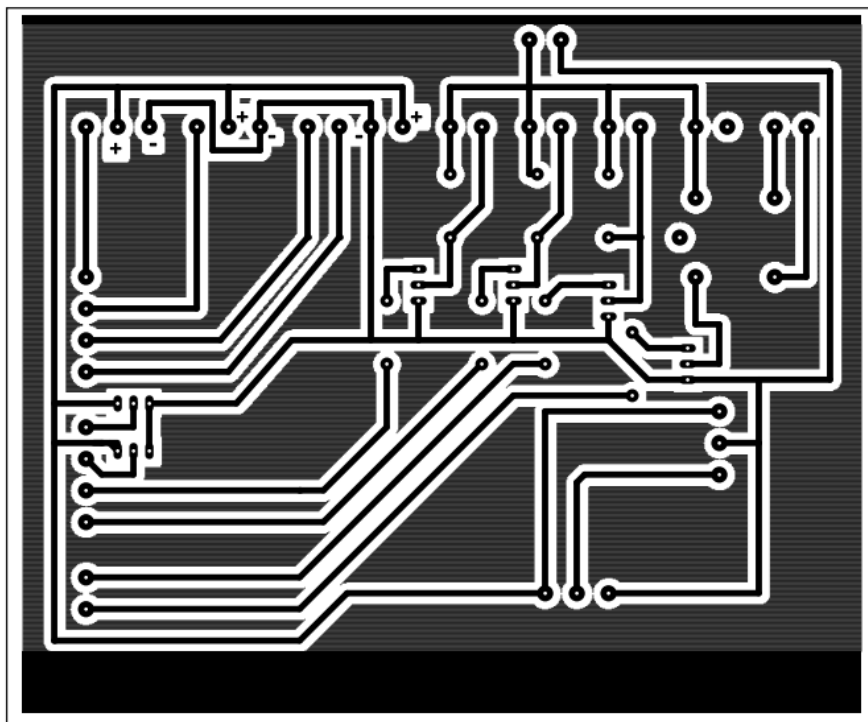
uelectronics. (2022). *Bomba de Agua 12V*. Obtenido de UNIT Electronics: <https://uelectronics.com/producto/bomba-de-agua-12v-60w-conexiones-de-10mm-para-manguera/>

Valdivia Corzo, R. A. (2021). *MODELAMIENTO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTOR DC [Tesis de título profesional, Universidad Católica de Santa María]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10698>

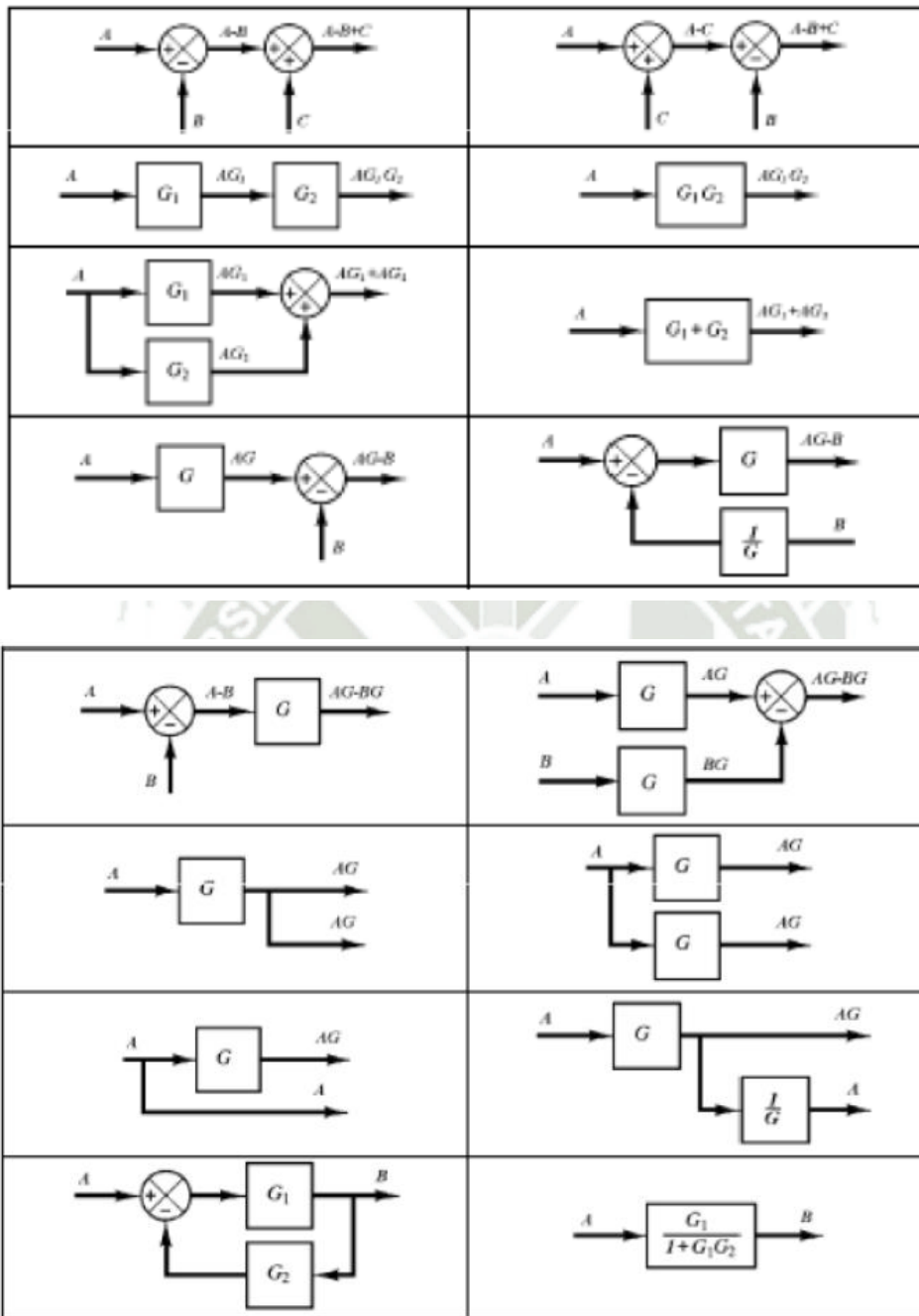
Villajulca, J. C. (2023). *Instrumentación y control.net*. Obtenido de Estrategia de Control de Razon: <https://instrumentacionycontrol.net/estrategia-de-control-de-razon-o-proporcion-una-explicacion-detallada-con-ejemplos/>

## Anexos

*Anexo 1 Modelo de placa para adquisición de datos.*



Anexo 2 Tabla de equivalencias algebra de bloques



### *Anexo 3 Datasheet arduino MEGA 2560*

#### Features

- **ATmega2560 Processor**
  - Up to 16 MIPS Throughput at 16MHz
  - 256k bytes (of which 8k is used for the bootloader)
  - 4k bytes EEPROM
  - 8k bytes Internal SRAM
  - 32 × 8 General Purpose Working Registers
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four 8-bit PWM Channels
  - Four Programmable Serial USART
  - Controller/Peripheral SPI Serial Interface
- **ATmega16U2**
  - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
  - 16k bytes ISP Flash Memory
  - 512 bytes EEPROM
  - 512 bytes SRAM
  - USART with SPI master only mode and hardware flow control (RTS/CTS)
  - Master/Slave SPI Serial Interface
- **Sleep Modes**
  - Idle
  - ADC Noise Reduction
  - Power-save
  - Power-down
  - Standby
  - Extended Standby
- **Power**
  - USB Connection
  - External AC/DC Adapter
- **I/O**
  - 54 Digital
  - 16 Analog
  - 15 PWM Output

#### *Anexo 4 Datasheet sensor HC-SR04*

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:

- (1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
- (2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
- (3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.

Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

#### **Wire connecting direct as following:**

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

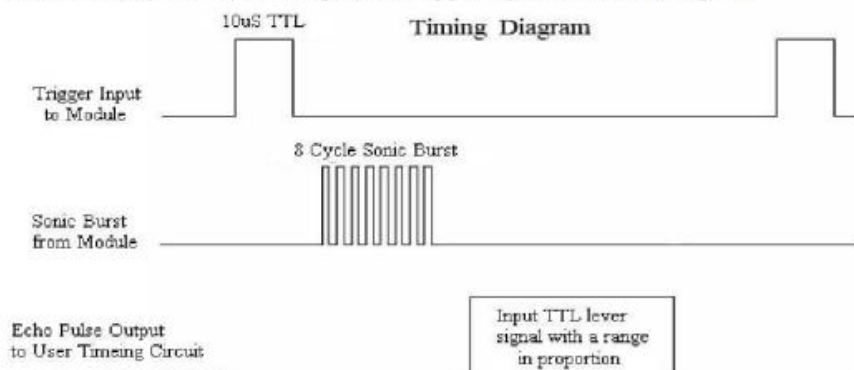
#### **Electric Parameter**

<b>Working Voltage</b>	<b>DC 5 V</b>
<b>Working Current</b>	<b>15mA</b>
<b>Working Frequency</b>	<b>40Hz</b>
<b>Max Range</b>	<b>4m</b>
<b>Min Range</b>	<b>2cm</b>
<b>MeasuringAngle</b>	<b>15 degree</b>
<b>Trigger Input Signal</b>	<b>10uS TTL pulse</b>
<b>Echo Output Signal</b>	<b>Input TTL lever signal and the range in proportion</b>
<b>Dimension</b>	<b>45*20*15mm</b>



### Timing diagram

The Timing diagram is shown below. You only need to supply a short 10uS pulse to the trigger input to start the ranging, and then the module will send out an 8 cycle burst of ultrasound at 40 kHz and raise its echo. The Echo is a distance object that is pulse width and the range in proportion. You can calculate the range through the time interval between sending trigger signal and receiving echo signal. Formula:  $\mu\text{s} / 58 = \text{centimeters}$  or  $\mu\text{s} / 148 = \text{inch}$ ; or: the range = high level time \* velocity (340M/S) / 2; we suggest to use over 60ms measurement cycle, in order to prevent trigger signal to the echo signal.



### Anexo 5 Datasheet sensor YF-S401



Water flow sensor consists of a PVC body, a water rotor, and a hall-effect sensor. When water flows through the rotor, rotor rolls. Its speed changes with different rate of flow. The hall-effect sensor outputs the corresponding pulse signal. This one is suitable to detect flow in water dispenser or coffee machine.

#### Features

- Compact, Easy to Install
- High Sealing Performance
- High Quality Hall Effect Sensor
- RoHS Compliant

#### Specifications

- Mini. Working Voltage: DC 4.5V
- Max. Working Current: 15mA (DC 5V)
- Working Voltage: DC 5V~24V
- Water resistant 0.35MPa
- Flow Rate Range: 1~ 5L/min
- Load Capacity:  $\leq 10\text{mA}$  (DC 5V)
- Operating Temperature:  $\leq 80^\circ\text{C}$
- Liquid Temperature:  $\leq 120^\circ\text{C}$
- Operating Humidity: 35%~90%RH
- Water Pressure:  $\leq 1.75\text{MPa}$
- Storage Temperature:  $-25\sim + 80^\circ\text{C}$
- Storage Humidity: 25%~95%RH
- Internal diameter: 1.2mm;
- Error:  $\pm 2\text{L}/\text{min}$ ;
- Insulation resistance  $> 100\text{M}\Omega$
- Output pulse duty cycle  $50\% \pm 10\%$
- Output pulse high level  $> \text{DC } 4.7\text{V}$  (input voltage DC 5V)
- Flow pulse characteristics  $F = (98 * Q) \pm 2\% Q = \text{L} / \text{MIN}$

### Other Features

- Light weight, small, easy to install;
- With stainless steel axis in the wheel, abrasion resistant;
- Sealing ring would never leak water;
- All material meets RoHS standard

### Application

- Suitable for water heater, automatic water dispenser, coffee machine etc.

### Caution

- Non-violent shocks and chemical erosion.
- Non-throwing or collision.
- Install it in vertical, inclination should not beyond 5 degree;
- Medium temperature should not exceed 120°C.
- Frequency:  $F = 98 * Q$  (L / Min) Error:  $\pm 2\%$  ,voltage :3.5-24VDC, current can not exceed 10mA,

### Connector Details

- Red : IN positive
- Yellow : OUT signal output
- Black : GND negative

### Dimensions / Weight

- Dimensions : 2.28 in x 1.38 in x 1.06 in (5.8 cm x 3.5 cm x 2.7 cm)
- Weight : 0.88 oz (25 g)



Anexo 6 Datasheet mosfet IRFZ44N

**isc N-Channel MOSFET Transistor**

**IRFZ44N, IIRFZ44N**

**• FEATURES**

- Static drain-source on-resistance:  
 $R_{DS(on)} \leq 17.5m\Omega$
- Enhancement mode
- Fast Switching Speed
- 100% avalanche tested
- Minimum Lot-to-Lot variations for robust device performance and reliable operation

**• DESCRIPTION**

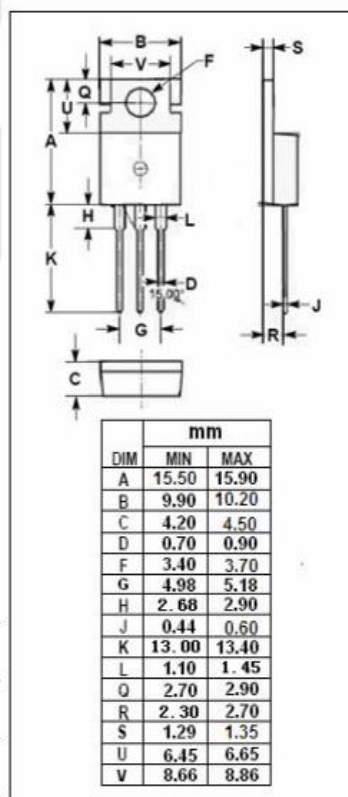
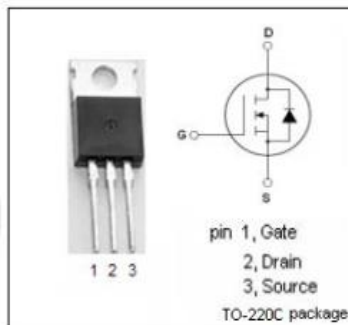
- reliable device for use in a wide variety of applications

**• ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS( $T_a=25^\circ C$ )**

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$V_{DS}$	Drain-Source Voltage	55	V
$V_{GS}$	Gate-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_D$	Drain Current-Continuous	49	A
$I_{DM}$	Drain Current-Single Pulsed	160	A
$P_D$	Total Dissipation @ $T_c=25^\circ C$	94	W
$T_j$	Max. Operating Junction Temperature	175	$^\circ C$
$T_{stg}$	Storage Temperature	-55~175	$^\circ C$

**• THERMAL CHARACTERISTICS**

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNIT
$R_{th(ch-c)}$	Channel-to-case thermal resistance	1.5	$^\circ C/W$
$R_{th(ch-a)}$	Channel-to-ambient thermal resistance	62	$^\circ C/W$





INCHANGE Semiconductor

**isc N-Channel MOSFET Transistor**

**IRFZ44N, IIRFZ44N**

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

$T_c=25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$BV_{DSS}$	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS}=0V; I_D=250\ \mu A$	55			V
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS}=V_{GS}; I_D=250\ \mu A$	2.0		4.0	V
$R_{DS(on)}$	Drain-Source On-Resistance	$V_{GS}=10V; I_D=25A$			17.5	m $\Omega$
$I_{GSS}$	Gate-Source Leakage Current	$V_{GS}=\pm 20V$			$\pm 0.1$	$\mu A$
$I_{DSS}$	Drain-Source Leakage Current	$V_{DS}=55V; V_{GS}=0V$			25	$\mu A$
$V_{SD}$	Diode forward voltage	$I_S=25A, V_{GS}=0V$			1.3	V

