

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



“Proyecto de automatización de coberturas de chocolate para helados” en la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L.

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Alejandro Soto Ramírez

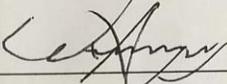
Cartago 2018

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominada "Proyecto de automatización de coberturas de chocolate para helados", realizado por Alejandro Soto Ramírez y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

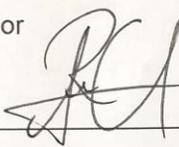
Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. William Marin Moreno

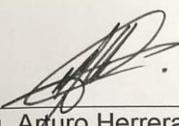
Profesor lector

TEC | Tecnológico
de Costa Rica
Ingeniería Electrónica



Ing. Luis Carlos Rosales Alpizar

Profesor lector



Ing. Arturo Herrera Vega
Profesor asesor

Cartago 2018

Declaratoria de autenticidad

Yo Alejandro Soto Ramírez, cédula 2-0724-0065, declaro que el presente proyecto de graduación ha sido realizado por mi persona, utilizando tanto literatura apropiada, como conocimientos propios obtenidos a lo largo de la carrera universitaria.

Con el fin de respetar la propiedad intelectual, se ha procedido a indicar citas bibliográficas en el caso de la utilización de algún tipo de referencia bibliográfica.

Por consiguiente, asumo completa responsabilidad por el contenido del anteproyecto realizado.

X *Alejandro Soto Ramírez*

Alejandro Soto Ramírez
Cédula: 2 0724 0065

Resumen

La Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L cuenta con dos tanques que utilizan para calentar el chocolate utilizado en coberturas de helados. Por motivos de mejoramiento de calidad se desea utilizar un sistema automático de control que incluye equipos como: válvulas reguladoras y sensores de temperatura. En este diseño se utilizan software de procesamiento matemático con el fin de obtener los valores para la calibración del sistema diseñado. Además, la adecuación al sistema SCADA para la visualización de los datos suministrados por el sistema de control.

En este documento se muestra el diseño de dos controladores PID de temperatura, mediante la obtención de la función de transferencia analítica. Además, de los ajustes en el programa RSLogix 5000 y el sistema Wonderware SCADA.

Palabras claves

PID – P&ID – KP – KI – KD – Punto de equilibrio – SCADA – PLC – RSLogix 5000™ – RSLinx® - Matlab® – Función de transferencia – Dos Pinos

Abstract

Cooperativa de Productores de Leche RL Dos Pinos uses two large tanks to melt the chocolate which will be used as ice cream crust cover. To improve quality of the process, an automatic control system is required which uses temperature sensors and flow regulation valves. In this design, mathematical processing software is used in order to obtain the values for the calibration of the designed system. In addition, the adaptation to the SCADA system for the visualization of the data supplied by the control system shall be implemented.

This document describes the design and implementation of the proposed control system through a mathematical processing software which predicts and calibrates the operation. The document also describes the process to define, the settings in the RSLogix 5000 program and the Wonderware SCADA system.

Keywords

PID – P&ID – KP – KI – KD – Setpoint – SCADA – PLC – RSLogix 5000™ – RSLinx®-
Matlab® – Función de transferencia – Dos Pinos

Dedicatoria

“A mis padres Carlos y Ana, los cuales pusieron todo su esfuerzo y apoyo hasta el final en mi desarrollo como persona y profesional.

También a mis hermanos y hermana, que también me dieron su apoyo a lo largo de todo este proceso.

Asimismo, a todas las personas cercanas que me brindaron su mano y ayuda a lo largo de mis estudios en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.”

Agradecimiento

Primero debo agradecer a mi familia, amigos, profesores y conocidos por brindarme su ayuda y apoyo a través de toda esta etapa de aprendizaje y crecimiento personal.

Además, brindar el agradecimiento al personal de la Cooperativa Productora de Leche Dos Pinos R. L. quienes me dieron la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación, al Ing. Tirso Álvarez por brindarme la guía sobre el proyecto y a Mauricio Bernal por atender las dudas que surgieron durante el proyecto.

Índice General

Capítulo 1. Introducción	12
1.1 Entorno del proyecto	12
1.2 Definición del problema	14
1.2.1 Generalidades	14
1.2.2 Síntesis del problema	15
1.3 Enfoque de la solución	15
Capítulo 2. Meta y Objetivos	18
2.1 Meta	18
2.2 Objetivo General	18
2.3 Objetivos Específicos	18
Capítulo 3. Marco Teórico	19
3.1 ¿Qué es un Control Automático?	19
3.1.1 Control PID	19
3.2 ¿Qué es un diagrama de tuberías o instrumentación (DTI)?	20
3.3 Normas ISO relevantes en la industria de los alimentos	21
3.3.1 ISO 9001 Gestión de la calidad	21
3.3.2 ISO 22000 Gestión de la seguridad de los alimentos	21
3.4 Sensores de temperatura	22
3.4.1 Sensor Temperatura (TPT12), modelo: 90510-5633	22
3.4.2 Sensor de Temperatura Endress. Modelo Clamp 1.5" TM401-62r0/101.	23
3.5 Válvula reguladora Burkert 2702	24
3.5.1 Regulador tipo 8693	25
3.6 Programación en escalera del PLC	26
Capítulo 4. Descripción Detallada de la Solución	28
4.1 Análisis del estado del sistema	28
4.1.1 Reconocimiento del estado, conexiones y partes.	28
4.2 Propuesta de diseño de recolocación del sensor de temperatura y la válvula reguladora.	31
4.2.1 Recolocación Tanque T79.	31
4.2.2 Recolocación del Tanque T80	32
4.3 Cotización del proyecto	34
4.4 Cálculo del modelo de la planta	35

4.4.1	Parámetros de estado estacionario. [4]	37
4.4.2	Modelo del espacio de estados.[4]	38
4.4.3	Cálculo de la función de transferencia T79.[4]	40
4.4.4	Cálculo de la función de transferencia T80.[4]	40
4.5	Ajustes del PID.	41
4.5.1	Escalamiento de la señal del Tanque T79.	41
4.5.2	Escalamiento de la señal tanque T80.	43
4.5.3	Escalamiento de salida.	44
4.5.4	Módulo PID RSLogix 5000™.	44
4.5.5	Cálculo del PID para la planta mediante Matlab®.	51
4.6	Comunicación con el sistema SCADA.	54
4.6.1	Colocación de iconos sobre el sistema SCADA.	54
4.6.2	Creación de interfaz gráfica para las válvulas.	56
4.6.3	Asignación de etiquetas (tagnames).	57
Capítulo 5.	Resultados y Análisis	60
Capítulo 6.	Conclusiones	65
Capítulo 7.	Recomendaciones	66
Referencias		68
Anexos		70
Anexo A-1	Diagrama de tuberías e instrumentación inicial	70
Anexo A-2	Diagrama de tuberías e instrumentación realizado	71
Anexo A-3	Diagrama de tuberías e instrumentación propuesta.	72
Anexo A-4	Ajuste para la válvula.	73
Anexo A-5	Ajuste para la válvula.	73
Anexo A-6	Diseño de los sistemas de control en Simulink®.	74
Anexo A-7	Glosario.	75
Anexo A-8	Software para programación de PLCs.	75

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.....	13
Figura 2. Diagrama de bloques de la propuesta. [Elaboración propia].....	16
Figura 3. Diagrama de tuberías e instrumentación. [26].....	20
Figura 4. TPT12. [21].....	23
Figura 5. Instalación TPT12. [21].....	23
Figura 6. TM401. [9] [9].....	24
Figura 7. Válvula reguladora asiento inclinado 2702. [6] [8].....	25
Figura 8. Regulador tipo 8693. [6].....	26
Figura 9. Descripción lógica escalera. [24].....	27
Figura 10. Patrón de colores establecido. [Elaboración propia].....	28
Figura 11. Diagrama P&ID tanque T79. [Elaboración propia].....	29
Figura 12. Diagrama P&ID tanque T80. [Elaboración propia].....	30
Figura 13. Diagrama P&ID propuesta tanque T79. [Elaboración propia].....	32
Figura 14. Diagrama P&ID propuesta tanque 80. [Elaboración propia].....	33
Figura 15. Calentador de tanque giratorio con chaqueta.[4].....	35
Figura 16. Módulo PID. [Elaboración propia].....	45
Figura 17. Escala módulo PID T79. [Elaboración propia].....	46
Figura 18. Escala módulo PID T80. [Elaboración propia].....	47
Figura 19. Pestaña de configuración módulo PID. [Elaboración propia].....	48
Figura 20. Pestaña de alarmas módulo PID T79. [Elaboración propia].....	49
Figura 21. Pestaña de alarmas módulo PID T80. [Elaboración propia].....	50
Figura 22. Código de tiempos para activar alarmas. [Elaboración propia].....	50
Figura 23. PID Tuner tanque T79. [Elaboración propia].....	52
Figura 24. PID Tuner barras de ajustes. [Elaboración propia].....	52
Figura 25. Parámetros del controlador T79. [Elaboración propia].....	53
Figura 26. Parámetros del controlador T80. [Elaboración propia].....	54
Figura 27. Estado inicial sistema SCADA. [Elaboración propia].....	55
Figura 28. Icono para válvula reguladora. [Elaboración propia].....	55
Figura 29: Estado final sistema SCADA. [Elaboración propia].....	55
Figura 30. Interfaz gráfica para las válvulas. [Elaboración propia].....	57
Figura 31. Creación de las etiquetas. [Elaboración propia].....	58
Figura 32. Señales del control T79. [Elaboración propia].....	60
Figura 33. Apertura de la válvula. [Elaboración propia].....	62
Figura 34. Señales de control T80. [Elaboración propia].....	63
Figura A- 1. Diagrama de tuberías e instrumentación inicial. [Elaboración propia].....	70
Figura A- 2. Diagrama de tuberías e instrumentación realizado. [Elaboración propia].....	71
Figura A- 3. Propuesta de ubicación de sensores y válvulas. [Elaboración propia].....	72
Figura A- 4. Valor Kv, para válvula de 40mm. [8].....	73
Figura A- 5. Relación de temperatura para apertura. [Elaboración propia].....	73
Figura A- 6. Diagrama de bloques de los sistemas en simulink. [Elaboración propia].....	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Reglas heurísticas de ajuste PID. [18].....	20
Tabla 2: Características relevantes sensores de temperatura. [9][21].....	22
Tabla 3. Cotización de instrumentación para el sistema de calentamiento de los tanques de chocolate. [Elaboración propia]	34
Tabla 4. Simbología. [4].....	36
Tabla 5. Parámetros del sistema. [Elaboración propia][4]	37
Tabla 6. Tabla de conversión dependiente a la configuración. [5]	42
Tabla 7. Relación corriente, temperatura y conteos. [Elaboración propia]	43
Tabla 8. Relación corriente, temperatura y conteo TM401. [Elaboración propia].....	43
Tabla 9: Resumen escalamiento módulo PID. [Elaboración propia]	46
Tabla 10. Designación de nombres para comunicación con el SCADA. [Elaboración propia]	58
Tabla 11. Tabla resumen de las gráficas de control. [Elaboración propia].....	64

Capítulo 1. Introducción

1.1 Entorno del proyecto

La Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L. es una empresa líder en productos lácteos no sólo en Costa Rica sino también en Centroamérica y el Caribe, con más de 60 años en el mercado. La Cooperativa procesa el 85% de la leche industrializada en Costa Rica, es decir, más de 220 millones de litros al año para la elaboración de más de 570 productos, entre los cuales se encuentra: leche, helados, otros derivados lácteos, jugos y refrescos. Dicha Cooperativa está formada por 1300 productores asociados en todo el territorio nacional y por 2600 empleados aproximadamente.[22]

Este proyecto se realiza en la sede de Dos Pinos ubicada en el Coyoil, Alajuela. En dicha planta se efectúan los procesos de pasteurización para los diversos lácteos y además cuenta con un apartado en donde se manufacturan las coberturas de chocolates para los helados.

Las coberturas se hacen con chocolate fundido. Este se lleva a una temperatura específica que permite cubrir el helado sin derretirlo, así como aplicar la cantidad de chocolate establecida por la empresa para cada producto.

El proceso para derretir el chocolate es el de calentamiento indirecto por convección térmica. Esto es lo que se conoce popularmente como "baño maría", el cual consiste en sumergir un recipiente – que contiene la sustancia a la cual se le va a transferir calor, en este caso el chocolate– en otro de mayor tamaño que contiene algún líquido – usualmente agua – el cual se lleva hasta punto de ebullición, con el fin de que el calor sea gradual y que la sustancia se vaya calentando de manera suave y constante.

En lo que respecta al funcionamiento actual del sistema que utilizan para derretir el chocolate se debe mencionar que es obsoleto, tiene una serie de fallas y una comunicación limitada al sistema SCADA¹ de la empresa. La maquinaria del sistema para calentar el chocolate es controlada por un sistema PID² electrónico que mediante un lazo de control

¹ **SCADA**: Supervisory Control And Data Acquisition (por sus siglas en inglés). El correspondiente en español es Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

² **PID**: Proporcional Integral Derivativo.

realimenta la temperatura medida en la salida, como mecanismo de control sobre la válvula moduladora para mantener la temperatura del chocolate constante.

El proceso tiene dos variedades de chocolate (Premium y regular) por lo que se cuenta con dos sistemas de control PID para sus respectivas válvulas reguladoras. Ambos sistemas son independientes. Además, cada uno de ellos tiene una instalación distinta para la entrada del agua caliente al tanque. En cuanto a la recepción del chocolate, se da por una misma tubería, razón por la cual un operario debe ir al lugar para cambiar la dirección de ingreso del producto dependiendo del tipo de chocolate mediante un selector manual. (Ver **Figura 1**).

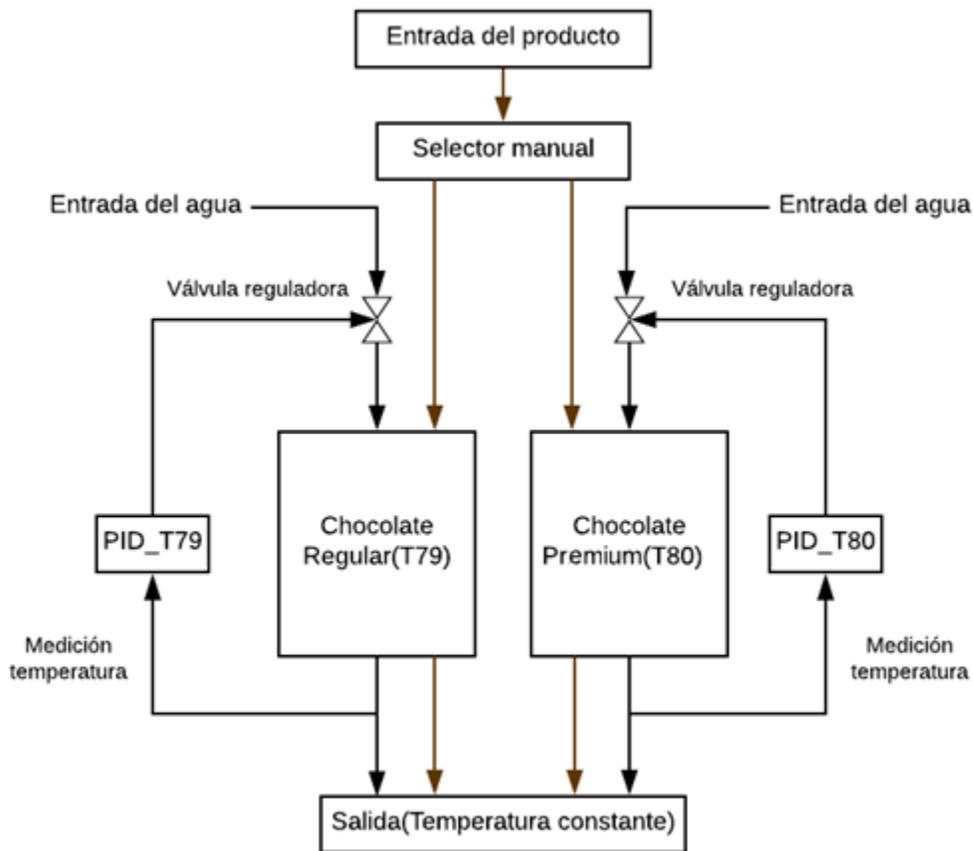


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.

Respecto al software de control, la empresa cuenta con los programas RSlogix 5000™[2] y RSLinx® [1], siendo el primero donde se realiza la programación del PLC³[25] u otros instrumentos, y el segundo una herramienta para conectar PLCs mediante la asignación de una dirección IP única para cada PLC. Así el programa RSlogix 5000™ puede trabajar con varios PLCs al mismo tiempo y sin confundirlos, comunicándolo al sistema SCADA.

1.2 Definición del problema

1.2.1 Generalidades

- **Desconocimiento del sistema inicial**

El área encargada de velar por el funcionamiento (Sala de control y Sala de automatización y electrónica) cuenta con sólo un diagrama poco detallado acerca del proceso de calentamiento del chocolate; cómo se puede observar de la **Figura A- 1**, por lo que se desconoce el funcionamiento exacto de ese sistema.

- **Sistema actual obsoleto**

Las válvulas reguladoras tienen un funcionamiento deficiente por el desgaste de los años y por el uso continuo, estas se han deteriorado al punto que la regulación del flujo de chocolate es imprecisa.

- **No se encuentra conectado al sistema central**

La empresa cuenta con un sistema SCADA donde se puede visualizar la mayoría de los procesos que se realizan en la planta. Sin embargo, el proceso de coberturas de chocolate no se ha podido interconectar a la red de monitoreo y control. En el sistema SCADA solo se puede apreciar la temperatura de los tanques y del cuarto, pero sin mostrar información sobre el sistema de control.

³ **PLC**: Programmable Logic Controller (por sus siglas en inglés). En español corresponde a Controlador Lógico Programable.

1.2.2 Síntesis del problema

El sistema de automatización es obsoleto y deficiente para el proceso de automatización de coberturas de chocolate para helados.

1.3 Enfoque de la solución

La **Figura A- 1**, corresponde al diagrama de tuberías e instrumentación (DTI o P&ID) con el que se cuenta actualmente, sobre este sistema se deben hacer las mejoras.

Para una mejor comprensión del problema se realizó un nuevo diagrama como se muestra en la **Figura A- 2**, entre los círculos se encierran las válvulas reguladoras actuales, estas se van a sustituir por unas válvulas de asiento inclinado **[12]** marca Burkert (este tipo de válvulas cuentan con una eficiencia superior a otras válvulas similares, proporcionando un régimen laminar **[11]** en el flujo). La decisión sobre la utilización de este tipo de válvulas se toma a partir de tres razones: la primera, por la recomendación de la empresa, la segunda, para minimizar el cambio de tubería y la tercera, por un tema de costos.

En función del cambio de válvulas se puede hacer un reposicionamiento de las mismas en las tuberías que transportan el agua caliente (como se muestra en la **Figura A- 3**).

El tanque T80 no cuenta con la misma arquitectura con intercambiador de calor **[29]** como el del tanque T79, por lo que se recomienda a la empresa considerar una implementación futura.

La elección de los sensores tiene que hacerse considerando que el tanque T79 es sobre la tubería de agua caliente y el T80 sobre el tanque del chocolate, para este último, se debe tener en cuenta la inocuidad del producto, debido a la calidad y estándares en salud que debe cumplir la empresa como productora de productos alimenticios, cumpliendo así las normativas ISO 9001 (Gestión de la calidad) y la ISO 22000 (Sistemas de Seguridad Alimentaria).

Otro de los puntos a tratar tiene relación con el control de temperaturas, así como otras señales de interés, el objetivo se basa en llevar dicha información al sistema SCADA con

el fin de tener un control directo de lo que sucede en el lugar y poder actuar de inmediato e informadamente si sucede alguna anomalía.

Se ilustra con un diagrama de bloques el proyecto y lo que se pretende en el (**Figura 2**). En el cual, se desea implementar un módulo de control del flujo del agua caliente antes de que ingrese al sistema de calentamiento tomando como variable de control la temperatura del agua para el tanque T79 y la temperatura del chocolate para el tanque T80. Cabe recordar que al ser dos sistemas independientes el de los tanques T79 y T80, se deben realizar dos controles por separado, uno para cada tanque.

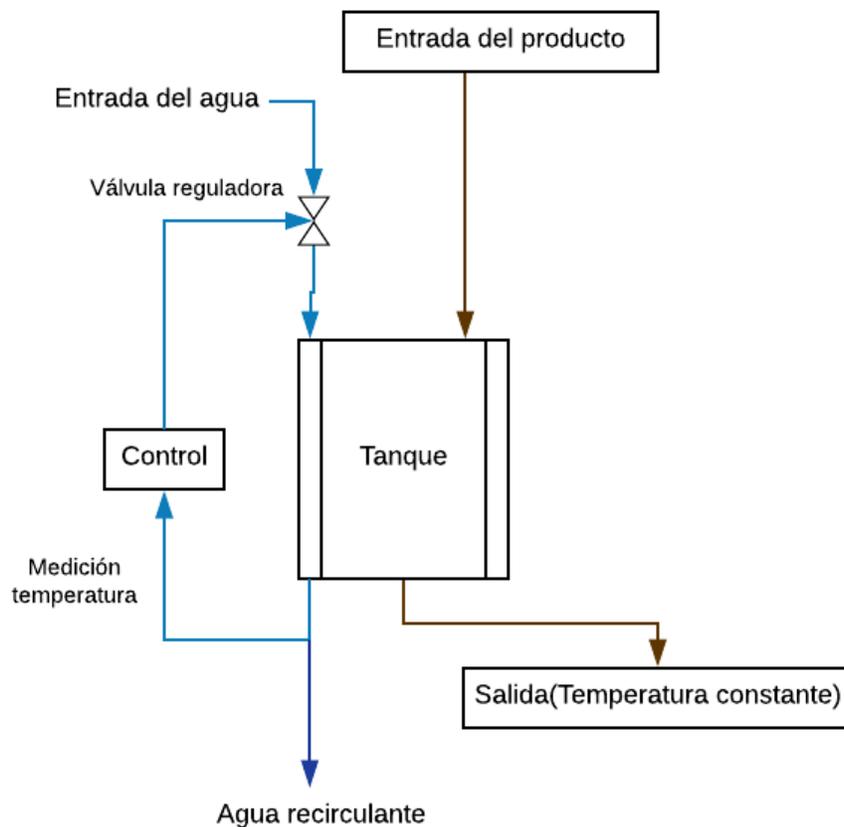


Figura 2. Diagrama de bloques de la propuesta. [Elaboración propia]

La empresa solicita, además del diseño de los sistemas de control, incluir un nuevo panel en el cuarto dónde están los tanques para sustituir el antiguo, por razones de orden, espacio y actualización de la tecnología en uso. En dicho panel se instalarán los módulos de control para las válvulas de los tanques y el módulo de comunicación.

Por criterios de estandarización del proceso industrial se requiere que el módulo de control sea mediante un PLC, específicamente un controlador MicroLogix de Allen Bradley™.

La programación del PLC será del tipo escalera por su facilidad de comprensión y de escritura. A nivel de programación se utilizarán los programas RSLogix 5000™ y RSLinx®. Siendo el primero, el programa principal compatible con la programación en escalera, lo que ayuda a maximizar el rendimiento, ahorro de tiempo al desarrollo del proyecto y mejora de la productividad. El segundo programa RSLinx®, es un programa auxiliar que ayuda a comunicar los PLCs con el programa RSLogix 5000™, mientras minimiza el impacto en la red de automatización y sus controladores.

Se realiza diagrama con la propuesta de la nueva ubicación de los sensores de temperatura utilizados para generar el control (mostrado por un círculo de color azul en la **Figura A- 3**), además de la ubicación de las válvulas reguladoras (círculo verde de la

Figura A- 3).

Para el tanque T80 – haciendo la comparación entre la **Figura A- 2** y la **Figura A- 3** –, respecto a la válvula reguladora no se hace ningún recolocamiento, sino solamente la sustitución de dicha válvula por una nueva. Además, en relación al sensor de temperatura se instala uno nuevo en el tanque.

Para el tanque T79 – haciendo la misma comparación entre **Figura A- 2** y la **Figura A- 3**–, la diferencia es notoria. Por lo que se hace un reposicionamiento de la válvula reguladora hacia la tubería de agua caliente recirculante. Además de la instalación del sensor de temperatura en la entrada de agua caliente del tanque. Esa decisión fue tomada por el jefe a cargo del proyecto.

Capítulo 2. Meta y Objetivos

2.1 Meta

Mejorar el sistema de control sobre el proceso de calentamiento del chocolate utilizado para las coberturas de algunos productos de forma eficiente.

2.2 Objetivo General

Diseñar un sistema de control automático capaz de regular la temperatura de dos contenedores de chocolate de manera independiente por medio de la integración a un sistema SCADA.

2.3 Objetivos Específicos

1. Diseñar una mejora al sistema tomando como base el diseño actual y marcando los cambios efectuados.
2. Estimar los componentes necesarios para la implementación futura del sistema.
3. Generar un modelo analítico del sistema.
4. Diseñar un sistema de control que permita mantener la temperatura a 40°C.
5. Crear la interfaz en el sistema SCADA para la visualización de la temperatura de los tanques y los parámetros de control.

Capítulo 3. Marco Teórico

3.1 ¿Qué es un Control Automático?

Un sistema de control se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados. [27] Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones.
2. El sistema debe cumplir con los criterios predefinidos de eficiencia, de manera que las acciones de control sean funcionales sin caer en cambios abruptos de comportamiento que puedan afectar la operación del sistema.
3. Su implementación debe ser adecuada para la línea de producción y ofrecer una interfaz adecuada para el usuario.

3.1.1 Control PID

La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria. Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativa (D). [17]

Proporcional (P): da una salida del controlador que es proporcional al error.

Integral (I): da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado.

Derivativo (D): estima el error.

A manera de guía se puede usar la

Tabla 1, donde se muestran algunos de los factores más importantes a la hora de realizar un controlador PID y cómo son afectadas por el valor de las constantes de las diferentes partes: “Kp” siendo su constante de proporcional, “Ti” para la parte integral y “Td” para la parte derivativa.

Tabla 1. Reglas heurísticas de ajuste PID. [18]

	Kp aumenta	Ti disminuye	Td aumenta
Estabilidad	Se reduce	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error estacionario	No eliminado	Eliminado	No eliminado
Área del error	Se reduce	Disminuye hasta cierto punto	Se reduce
Perturbación control	Aumenta bruscamente	Aumenta gradualmente	Aumenta bruscamente
Frecuencia lazo	No afecta hasta cierto punto	Disminuye	Aumenta

3.2 ¿Qué es un diagrama de tuberías o instrumentación (DTI)?

Un P&ID o DTI, es un diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental. Estos diagramas están compuestos por una serie de símbolos que nos permitirán identificar todos los componentes que conforman un proceso industrial, como: tuberías, número de líneas de tubería y sus dimensiones, válvulas, controles, alarmas, equipos, niveles, presostatos (interruptor de presión), drenajes, purgas, bombas, etc. [23] En la **Figura 3** se encuentra un ejemplo de un diagrama de tuberías e instrumentación.

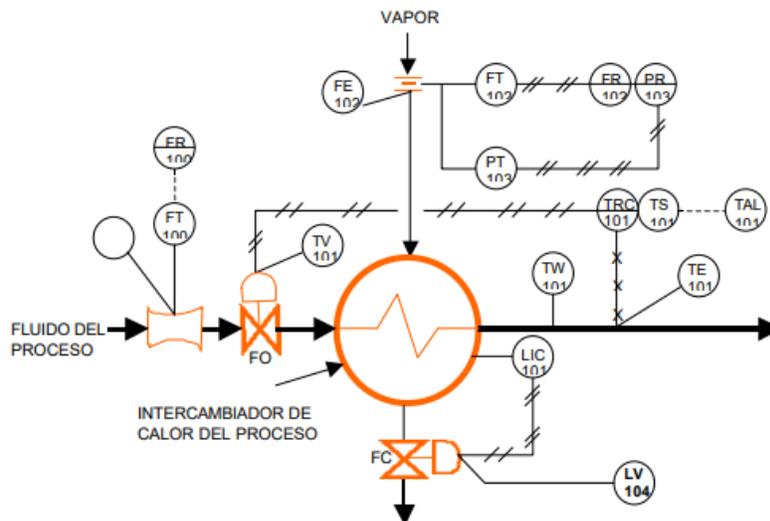


Figura 3. Diagrama de tuberías e instrumentación. [26]

3.3 Normas ISO relevantes en la industria de los alimentos

Puesto que el proyecto se realiza en una empresa con fines alimenticios y específicamente sobre el chocolate para coberturas, se debe tener en cuenta la calidad e inocuidad de los alimentos. Dos de esas normas relevantes son:

3.3.1 ISO 9001 Gestión de la calidad

La norma ISO 9001 de sistemas de gestión de la calidad proporciona la infraestructura, procedimientos, procesos y recursos necesarios para ayudar a las organizaciones a controlar y mejorar su rendimiento y conducirles hacia la eficiencia, servicio al cliente y excelencia en el producto.[13] La empresa Dos Pinos se apoya en el uso de tecnologías, como es el control automático para optimizar y mejorar el rendimiento de sus procesos.

3.3.2 ISO 22000 Gestión de la seguridad de los alimentos

Esta norma Internacional enumera requisitos para un sistema de gestión de la inocuidad de los alimentos cuando una organización en la cadena alimentaria necesita demostrar su capacidad para controlar los peligros relacionados con la inocuidad de los alimentos, con el objeto de asegurarse de que el alimento es inocuo en el momento del consumo humano.

La inocuidad de los alimentos se refiere a la existencia de peligros asociados a estos en el momento de su consumo (ingestión por los consumidores). Como la introducción de peligros para la inocuidad de los alimentos puede ocurrir en cualquier punto de la cadena de producción, es esencial un control adecuado a través de toda la cadena. Así, la inocuidad de los alimentos está asegurada a través de la combinación de esfuerzos de todas las partes que participan. [14]

Por lo tanto, para este proyecto es obligatorio cumplir con estas normas, de manera que el sistema de control automático no perjudique la inocuidad del chocolate o los helados usados en este proceso.

3.4 Sensores de temperatura

Antes de hablar sobre los sensores utilizados primero se aclararán un par de conceptos básicos relacionados los mismos.

Un transductor es un aparato o dispositivo que es capaz de transformar o convertir determinado tipo de energía de entrada por uno distinto en la salida. [15] La señal de interés para los sensores serán los que ofrezcan una salida linealizada la cual normalmente es de 4 a 20 mA.

El criterio de elección de sensores TPT12 se debe a que la empresa cuenta con proveedores autorizados, así como que estos ofrecen rangos de operación adecuados y cumplen con las normas ISO. Igualmente, el sensor Endress fue seleccionado por los mismos criterios.

En los siguientes párrafos se da una breve descripción de las características más relevantes (para este proyecto) de los sensores de temperatura, las cuales pueden verse a manera de resumen en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Características relevantes sensores de temperatura. [9][21]

Sensor	Rango Temp. (°C)	Rango de corriente(mA)	Alimentación (V)
TPT12	0 a 160	4 – 20	10 – 30
Endress	-50 a 200	4 – 20	24

3.4.1 Sensor Temperatura (TPT12), modelo: 90510-5633

El TPT12 (**Figura 4**) es un sistema completo y preciso para mediciones de temperatura. Fue diseñado para dar la mejor medición posible usando el menor tamaño. Además, el transmisor combinado con el sensor PT100 (resistencia de 100 Ω de platino) entrega una señal estandarizada en la industria de 4-20 mA al PLC o al sistema de control, con una resolución de salida del transmisor de 16 bits y una frecuencia de muestreo aproximada de 7 muestras/segundo. El modelo 90510-5633 nos permite un rango de temperatura de 0-160°C. [21]



Figura 4. TPT12. [21]

Su instalación es muy sencilla y puede ser visualizada en la **Figura 5**. Estos deben ser alimentados con una tensión entre 10-30 V.

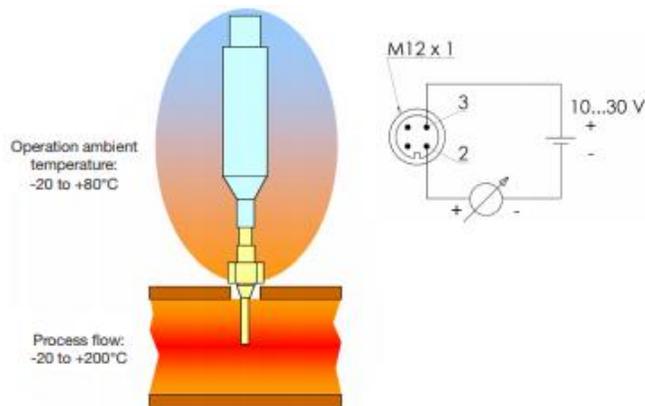


Figura 5. Instalación TPT12. [21]

3.4.2 Sensor de Temperatura Endress. Modelo Clamp 1.5" TM401-62r0/101

Las características físicas de este sensor son las siguientes: es un termómetro de resistencia (RTD)⁴ modular, para aplicaciones sanitarias y asépticas estándar en los sectores industriales de alimentos, bebidas y de las ciencias de la vida. Cuenta con un

⁴ **RTD**: Resistance Temperature Detector (por sus siglas en inglés). En español corresponde a Detector de Temperatura Resistivo.

rango de medición: -50 °C a 200 °C y un rango de presión hasta de 50 bar. Además, con un PT100 y un transmisor capaz de enviar la información en un estandarizado de 4-20 mA y en HART [9] [9]. Puede ser visualizado en la **Figura 6**.



Figura 6. TM401. [9] [9]

3.5 Válvula reguladora Burkert 2702

En cuanto a la decisión sobre la elección de este tipo específico de válvula para el proyecto, se afirma que recae en tres razones: la primera, por la recomendación de la empresa, la segunda, para minimizar el cambio de tubería y la tercera, por un tema de costos y estandarización.

Sobre el funcionamiento de esta válvula tenemos que: a través del movimiento de la parte denominada tapón (**Figura 7**) se puede incrementar o disminuir el flujo del agua que pasa por la válvula. Estas acciones de movimientos son realizadas desde el actuador y controlada por el regulador.

La válvula de control 2702 (**Figura 7**) consta de un cuerpo de asiento inclinado con un actuador de pistón neumático resistente, su ajuste parabólico produce una característica de flujo aproximadamente 35% mayor que las válvulas de control convencionales. Este tipo de válvulas cuentan con una eficiencia superior a otras válvulas similares, proporcionando un régimen laminar en el flujo.

El tipo 2702 puede ser accionado por los reguladores tipo “TopControl” 8692/8693/8694 o el tipo “SideControl” 8635 y 8792/8793. [6]

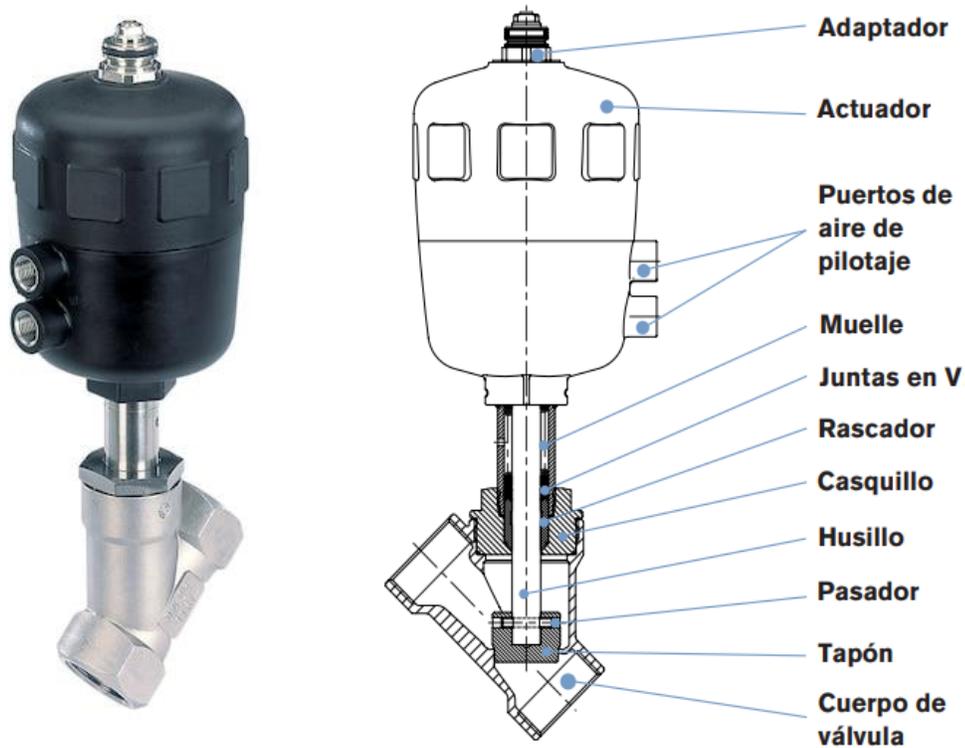


Figura 7. Válvula reguladora asiento inclinado 2702. [6] [8]

3.5.1 Regulador tipo 8693

Es necesario incluir este tipo de regulador a las válvulas para cumplir con las funciones de regulación del flujo, además para la recepción y envío de los datos provenientes del controlador PID.

Una descripción técnica del regulador es la siguiente: el regulador de proceso compacto de tipo 8693 (**Figura 8**) está diseñado para el montaje integrado en accionamientos neumáticos de las series de válvulas reguladoras de proceso de tipo 23xx/2103, también compatible con el modelo 2702 y especialmente para los requisitos de condiciones de procesos higiénicas. El valor real del parámetro de proceso se suministra directamente al equipo como 4-20 mA, PT100 o señal de frecuencia. [6]



Figura 8. Regulador tipo 8693. [6]

3.6 Programación en escalera del PLC

La empresa Dos Pinos solicitó que la solución se implementara usando PLCs de sus proveedores autorizados con el objeto de garantizar que se mantenga el cumplimiento con las normas ISO establecidas.

PLC significa Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller). Estos son dispositivos electrónicos o computadoras digitales de tipo industrial que permiten la automatización, especialmente de procesos de la industria, debido a que controlan tiempos de ejecución y regulan secuencias de acciones. En síntesis y palabras sencillas es un sistema de control. [25]

Existen distintos tipos de lenguaje de programación de un PLC, quizá el más común sea la programación tipo escalera o "Ladder". Los diagramas de escalera son esquemas de uso común para representar la lógica de control de sistemas industriales. Se le llama diagrama "escalera" porque se asemejan a una escalera, con dos rieles verticales (de alimentación) y "escalones" (líneas horizontales), en las que hay circuitos de control que definen la lógica a través de funciones (**Figura 9**).[24] De esta manera las principales características del lenguaje escalera son:

- Las instrucciones de entrada se introducen a la izquierda
- Las instrucciones de salida se sitúan a la derecha.

- Los carriles de alimentación son las líneas de suministro de energía L1 y L2 para los circuitos de corriente alterna, 24 V y tierra para los circuitos de CC⁵.
- La mayoría de los PLC permiten más de una salida por cada renglón (Rung).
- El procesador (o "controlador") explora peldaños de la escalera de arriba a abajo y de izquierda a derecha.

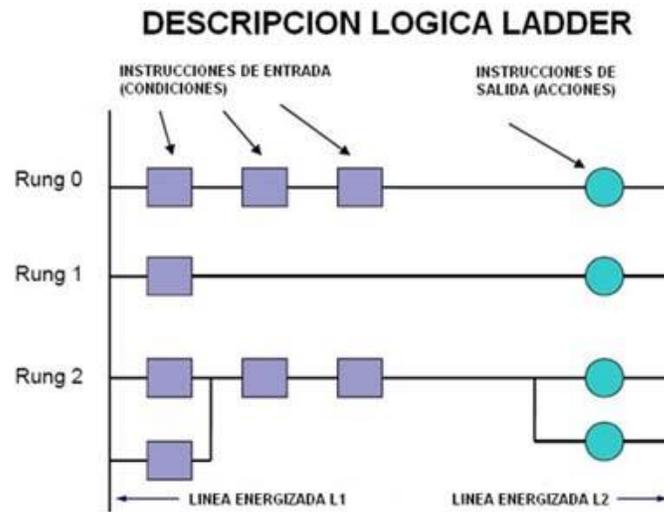


Figura 9. Descripción lógica escalera. [24]

⁵ CC: Corriente continua.

Capítulo 4. Descripción Detallada de la Solución

4.1 Análisis del estado del sistema.

4.1.1 Reconocimiento del estado, conexiones y partes.

En el anexo A la **Figura A- 1**, muestra la información que se tenía inicialmente, siendo esta insuficiente para la comprensión del problema. Por lo que, fue necesario efectuar una inspección de las tuberías de aire, agua y chocolate para determinar la ubicación de los elementos como sensores, bombas, tuberías y válvulas.

Como resultado de la inspección se hicieron diagramas para cada tanque. Posteriormente, se unieron en un solo diagrama actualizando la información recopilada, como se muestra en la **Figura A- 2**.

Para mejorar la comprensión y organización de los diagramas de tuberías, se propuso un patrón de colores visibles en la **Figura 10**:



Figura 10. Patrón de colores establecido. [Elaboración propia]

4.1.1.1 Tanque T79.

Se puede apreciar en la **Figura 11** el tanque T79 junto con los puntos más relevantes del mismo. El tanque contiene el chocolate regular, este último es fundido por medio de la recirculación de agua caliente a través de un intercambiador de calor el cual regula la temperatura del agua que ingresa a la chaqueta (espacio de 3,8 cm entre las paredes

internas y externas del tanque). También cuenta con un pequeño tanque auxiliar de agua para compensar las pérdidas por vapor y burbujas en el agua caliente.

Respecto a la válvula reguladora se conecta antes del intercambiador de calor, la cual se encuentra parcialmente dañada.

Los datos de los sensores principales que se logran identificar están representados por la línea con pequeños círculos. Esto corresponde a dos sensores de temperatura. Uno que se encarga de tomar la temperatura del agua en la chaqueta y otro que se ocupa de prevenir anomalías en la bomba encargada de sacar el chocolate de los tanques.

Existen otros sensores instalados (como, por ejemplo, las celdas de carga para el peso de los tanques), pero no resultan de interés para el presente proyecto.

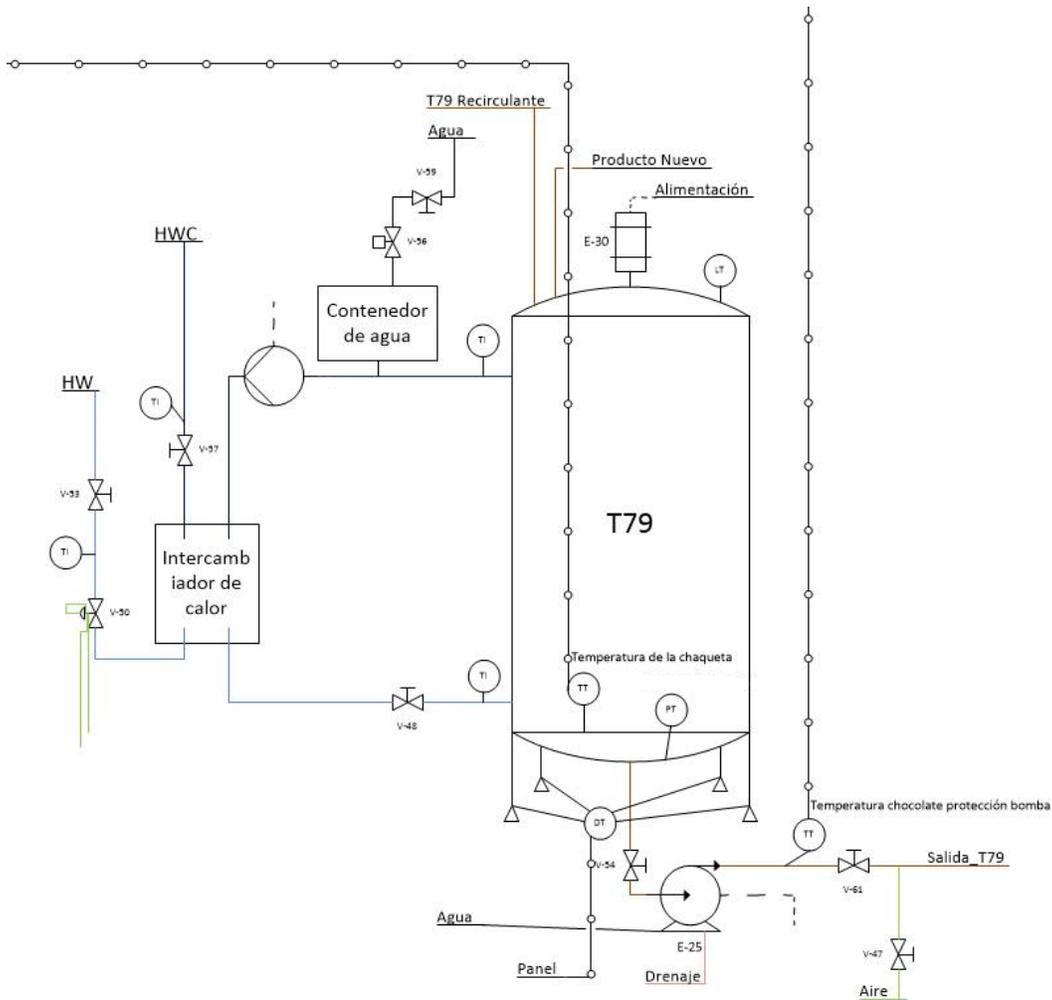


Figura 11. Diagrama P&ID tanque T79. [Elaboración propia]

4.1.1.2 Tanque T80.

El tanque T80 contiene el chocolate Premium (**Figura 12**). Este utiliza un método más directo – en comparación con el T79 – para el ingreso del agua caliente a la chaqueta del tanque.

En este el agua caliente es impulsada hacia la chaqueta por una bomba, el agua sobrante ingresa a la tubería del agua caliente recirculante (HWC) así como el agua proveniente de la salida del tanque.

En cuanto a las conexiones de los sensores cuenta con uno para la protección de la bomba que impulsa el chocolate fuera del tanque y otro para determinar la temperatura de la chaqueta del tanque.

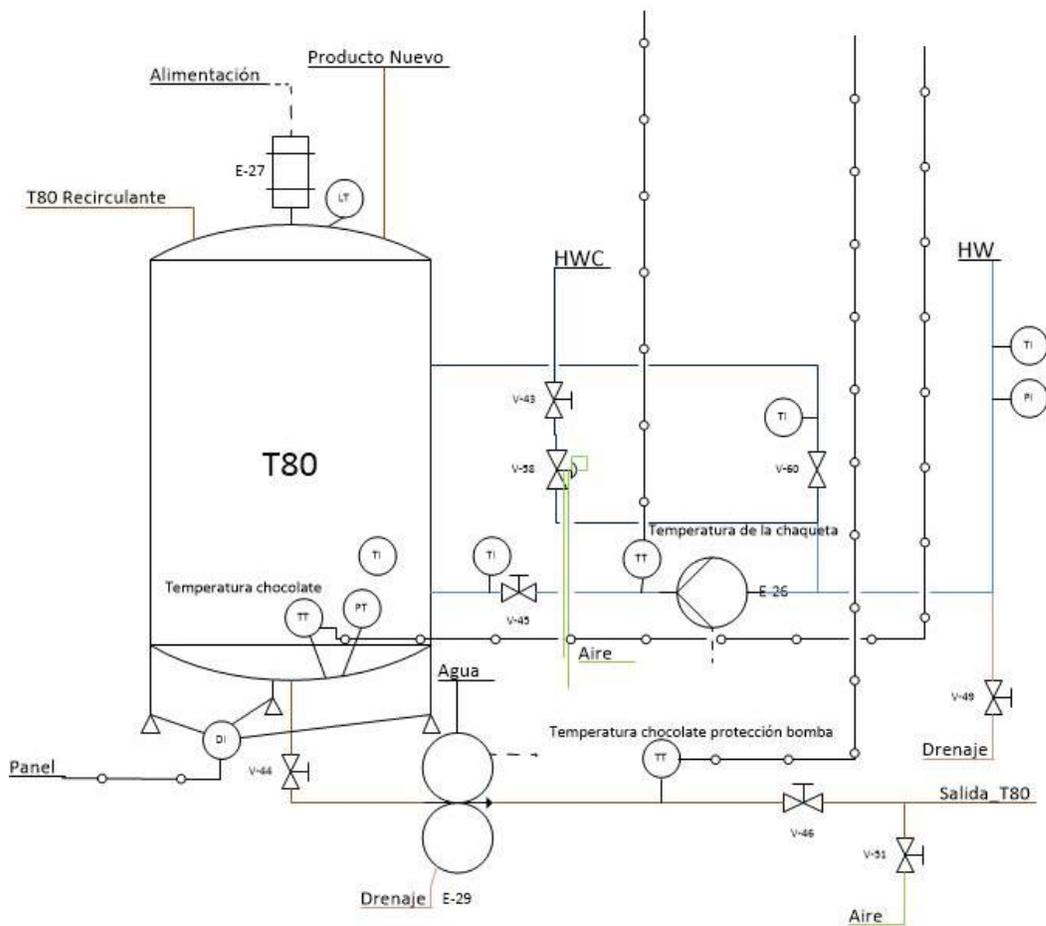


Figura 12. Diagrama P&ID tanque T80. [Elaboración propia]

4.2 Propuesta de diseño de recolocación del sensor de temperatura y la válvula reguladora.

En respuesta a que las arquitecturas de los tanques son diferentes, se decidió hacer cambios de tal forma que se ajusten adecuadamente a las características descritas en el apartado 4.1.1 **Reconocimiento del estado, conexiones y partes**. (el esquema completo de la propuesta se encuentra en el anexo A,

Figura A- 3). Las características se explican a continuación:

4.2.1 Recolocación Tanque T79.

Para el tanque T79 se decide reubicar la válvula reguladora y además reemplazar la válvula vieja por una válvula marca Burkert (**Figura 7**). Se eligió este tipo de válvula por dos motivos: primero porque es la marca que está utilizando la empresa para estandarizar sus procesos, y segundo, porque resultaba ser la que mejor se adecuaba a las necesidades, cumplía con los criterios de inocuidad y finalmente, se ajustaba al presupuesto en función de los costos.

La colocación de esta nueva válvula se hace después del intercambiador de calor (**Figura 13**-círculo rojo), por los siguientes motivos:

1. La válvula ofrece un régimen laminar del flujo, lo que quiere decir, que el movimiento del fluido va ser ordenado **[11]**
2. Debido a la nueva posición de la válvula se tiene un mejor manejo del intercambiador de calor y las variaciones de temperatura del agua.

Por otro lado, se propone la instalación de un nuevo sensor de temperatura (**Figura 4**) para usarlo como realimentación del lazo de control. Con el fin de tener claridad respecto de la temperatura que ingresa a la chaqueta. Esto se puede visualizar en la **Figura 13** (con un círculo verde).

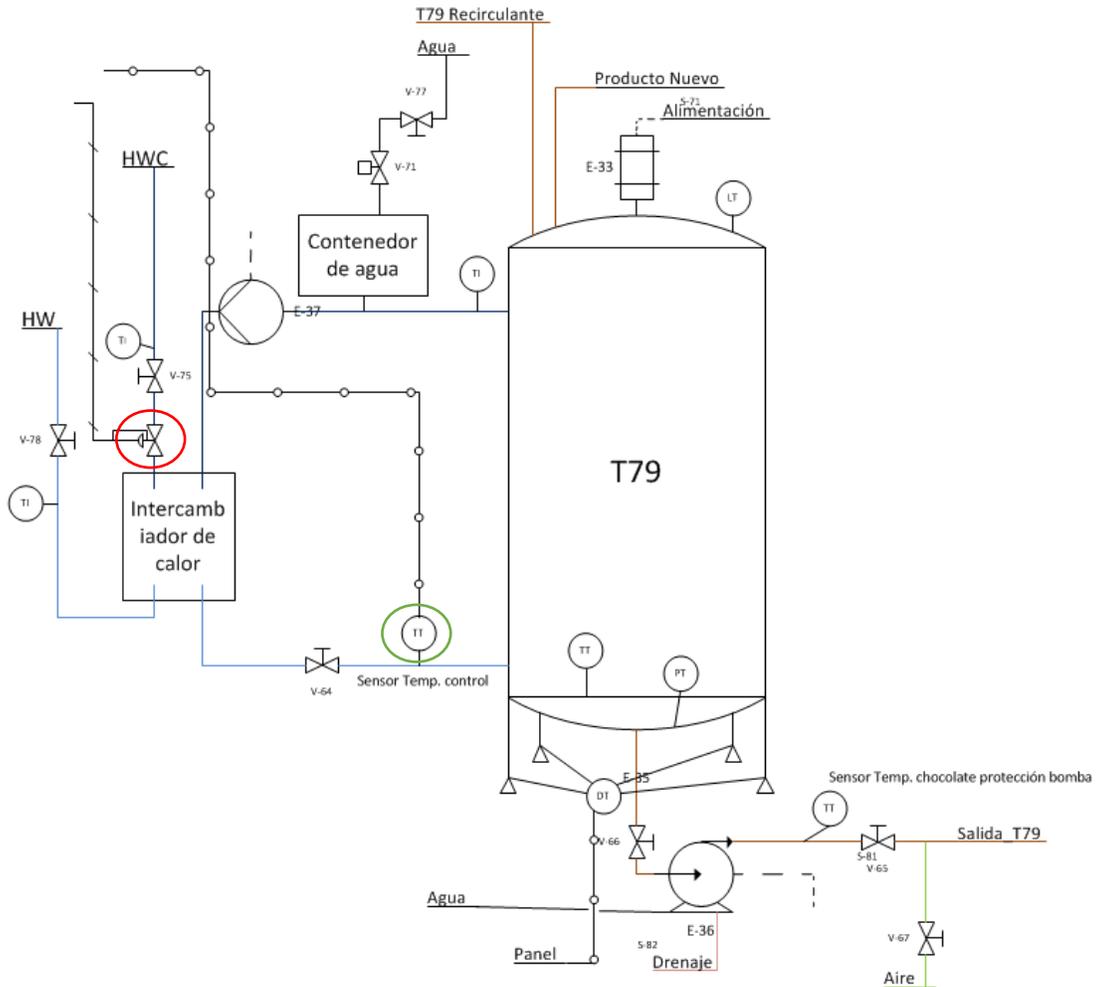


Figura 13. Diagrama P&ID propuesta tanque T79. [Elaboración propia]

4.2.2 Recolocación del Tanque T80.

En el tanque T80 de chocolate Premium, el cambio más notorio es la instalación de un sensor de temperatura que tiene como función la realimentación de datos para el lazo de control. Dicho sensor está en contacto directo con el chocolate. Este debe cumplir con una característica indispensable, es decir, se necesita un sensor de temperatura que sea apto para mantener la inocuidad del chocolate, ver **Figura 6** y **Figura 14** (con círculo verde se muestra ubicación).

Para la colocación de este sensor es necesario hacer un orificio en el tanque. El cual precisa de una instalación más rigurosa para no dejar filtraciones del chocolate al exterior y su vez, para que el chocolate no se contamine.

En el caso de la válvula reguladora existente se cambia por la válvula de la **Figura 7**, pero se deja en la misma posición como se representa en la **Figura 14** con el círculo rojo. El cambio obedece a motivos de estandarización y renovación de las válvulas.

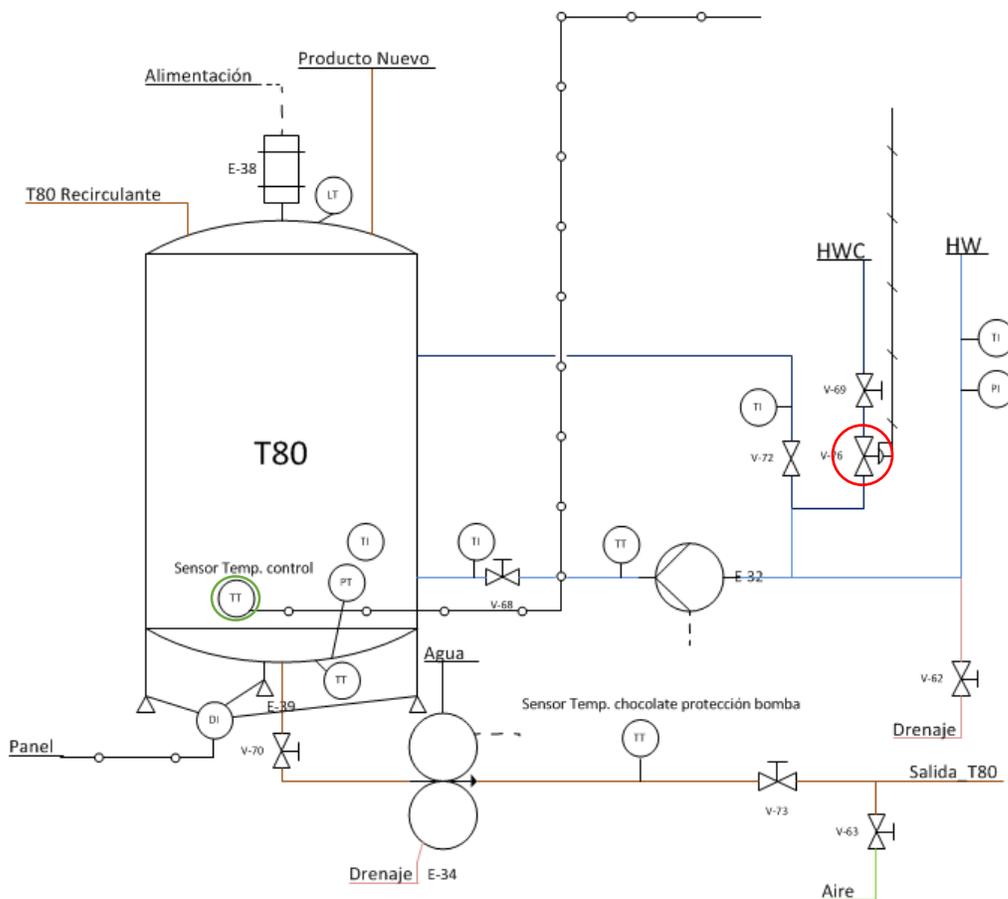


Figura 14. Diagrama P&ID propuesta tanque 80. [Elaboración propia]

4.3 Cotización del proyecto.

Se adjunta la **Tabla 3** donde se enlistan los componentes utilizados y el costo aproximado del proyecto. Teniendo en cuenta el costo de los sensores y válvulas, de la mano de obra, y del panel local que recibe y envía las señales de control desde y hacia el sistema SCADA. Lo anterior, contemplando los cambios propuestos no sólo para la elaboración del proyecto sino también el cambio que tenía previamente planeado la empresa.

Tabla 3. Cotización de instrumentación para el sistema de calentamiento de los tanques de chocolate. [Elaboración propia]

Descripción	Cantidad	Código	Bodega	SAP	Costo
Adapter Ethernet	1	1794 AENT	Si	16000481	¢360.385,33
Módulo neumático	1	CPV	Si	16046106	¢1.406.836,17
Módulo Analog-Input	1	1794-IE8	si	16000482	¢518.162,06
Módulo Analog-Output	1	1794-OE4	si	16002851	¢556.162,06
Módulo Digital-Output	1	1794-OB16	si	16037348	¢101.829,17
Fuente 240 VDC	1	1606-XL60D	si	16030646	¢152.515,15
Breaker 1AMP	1		si	16001050	¢8.477,50
Válvula Moduladoras Burkert	2		no		¢5.352.541,06
Panel de potencia y control (gabinete)	1		no		¢531.698,84
Bases Terminal I/O	3	1794-TB3	no	16014777	¢243.438,42
Sensor Temp TPT12 4-20mA 0-160°C	1	90510-5633	si	16037803	¢79.379,10
Sensor Endress Temp. Clamp 1.5"	1	TM401-62r0/101	si	16047396	¢123.404,00
Mangueras Festo PLN	1	PLN-6X1-NT	si	16028800	¢64.000,00
Mano de obra					¢200.000,00
				Total	¢9.698.828,86

4.4 Cálculo del modelo de la planta.

Sobre los recipientes de fundición (tanques) que se utilizan en muchos procesos químicos (en este caso concreto dónde se derrite el chocolate) se afirma que es común que estén envueltos por una chaqueta donde fluye algún tipo de líquido o gas (aquí, agua caliente) que tiene como objetivo mantener la temperatura, la cual variará de acuerdo a la corriente del líquido o gas dentro de esta.

Considerando el calentamiento de un tanque en agitación como se muestra en la **Figura 15**. Se observa que tiene una entrada/salida de producto del tanque y una entrada/salida del fluido de la chaqueta. Por lo que la transferencia del fluido circulante es a través de la chaqueta con el fin de calentar el fluido del tanque. En cuanto a los cálculos, se asume que no ocurre ningún cambio de fase en los fluidos (agua para la chaqueta y el chocolate para el tanque). [4]

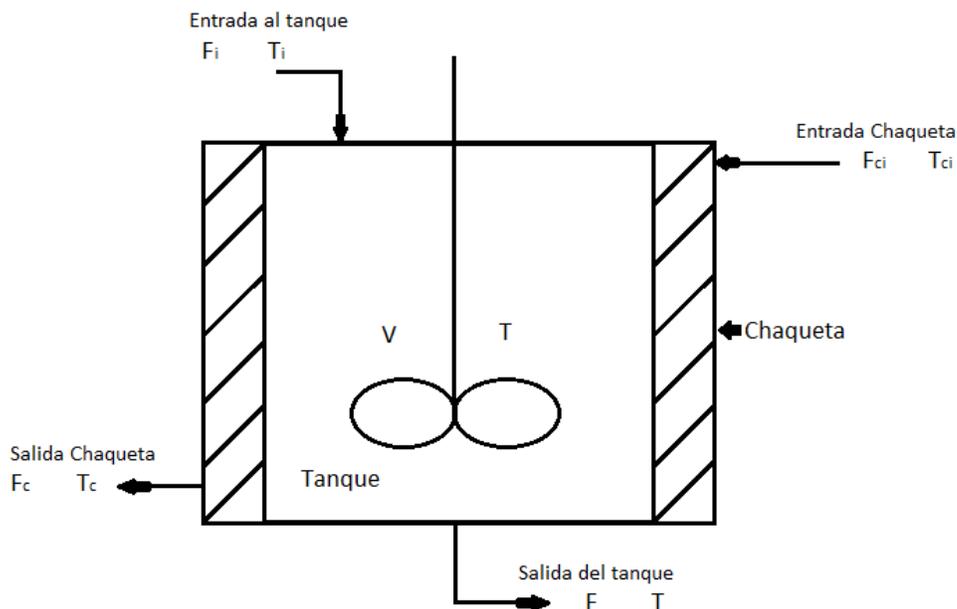


Figura 15. Calentador de tanque giratorio con chaqueta.[4]

En cuanto al cálculo de las ecuaciones dinámicas del sistema se utilizó el Capítulo 5 de *Process dynamics: modeling, analysis, and simulation*⁶ [4]. En este se realiza un análisis extensivo y detallado mediante el balance de materia y energía alrededor del tanque y sobre la chaqueta. A continuación, se explicarán los puntos relevantes para la comprensión del proceso:

- El volumen y los líquidos así como la densidad y capacidad calorífica son constantes.
- La entrada del flujo al tanque, flujo de la chaqueta, la temperatura de entrada del tanque y la temperatura de entrada de la chaqueta pueden variar (corresponden a entradas al sistema).
- Asumiendo que la cantidad de chocolate en el tanque permanece constante, entonces $dV/dt=0$.
- La tasa de cambio de transferencia de calor de la chaqueta al tanque está gobernada por la ecuación $Q = UA (T_{chaqueta} - T)$, donde U es el coeficiente de transferencia de calor superficial y A es el área para la transferencia de calor.

Tabla 4. Simbología. [4]

Variable	Descripción
A	Área para la transferencia de calor (m ²)
c_p	Capacidad calorífica (energía/masa*temp)
F	Flujo volumétrico (Volumen/tiempo)
ρ	Densidad (masa/volumen)
T	Temperatura (Celcios)
t	Tiempo (minutos)
Q	Tasa de transferencia de calor (energía/tiempo)
U	Coeficiente de transferencia de calor (energía/tiempo*área*temp)
V	Volumen (m ³)
i	Entrada
c	Chaqueta
ci	Entrada chaqueta
ref	Estado de referencia

⁶ Para ampliar sobre el se puede completar el capítulo 5 completo en: B. Wayne, B. (1998). *Process dynamics: modeling, analysis, and simulation*. Prentice hall PTR.

s	Estado estacionario
----------	---------------------

En este punto, la realización del proyecto se centra en el cálculo del modelo de los tanques a partir de la utilización de las siguientes ecuaciones dinámicas con el fin de obtener la función de transferencia necesaria para los tanques (T79 y T80):

$$\text{Ecuación 1} \quad \frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_i - T) + \frac{UA(T_c - T)}{V\rho C_p}$$

$$\text{Ecuación 2} \quad \frac{dT_c}{dt} = \frac{F_c}{V_c} (T_{ci} - T_c) - \frac{UA(T_c - T)}{V_c\rho_c C_{pc}}$$

4.4.1 Parámetros de estado estacionario. [4]

Antes de linealizar el modelo para encontrar la forma de espacio de estados, es necesario hallar el valor de las variables de estado estacionario, las cuales se obtienen resolviendo las ecuaciones dinámicas.

En la **Tabla 5** se muestran los valores, además el cálculo de⁷ UA y F_{cs} los cuales son obtenidos resolviendo las ecuaciones (Ecuación 1) y (Ecuación 2) igualándolas a cero (dT/dt = 0 y dT_c/dt = 0). [4] Se debe tomar en cuenta que ambos tanques son de acero inoxidable por lo que se usa la capacidad calorífica y la densidad de este material para los cálculos (siendo esta C_p = 510 J/kg°K y ρ = 7850 Kg/m³).

Además, el flujo volumétrico de estos tanques tiene un aproximado de 2 l/s, haciendo una conversión de unidades da el valor de F_s.

Tabla 5. Parámetros del sistema. [Elaboración propia][4]

⁷ La simbología se encuentra en **Tabla 4**.

T79			T80		
$F_s = 0.18$ m ³ /min	$\rho C_p =$ 14.61x10 ³ J/m ³ °K	$\rho_c C_{pc} =$ 14.61x10 ³ J/m ³ °K	$F_s = 0.18$ m ³ /min	$\rho C_p =$ 14.61x10 ³ J/m ³ °K	$\rho_c C_{pc} =$ 14.61x10 ³ J/m ³ °K
$T_{is} = 308.15^\circ\text{K}$	$T_s = 315.15^\circ\text{K}$	$V = 6 \text{ m}^3$	$T_{is} = 308.15^\circ\text{K}$	$T_s = 315.15^\circ\text{K}$	$V = 5 \text{ m}^3$
$T_{cis} = 317.15^\circ\text{K}$	$T_{cs} = 311.15^\circ\text{K}$	$V_c = 0.43$ m ³	$T_{cis} = 317.15^\circ\text{K}$	$T_{cs} = 311.15^\circ\text{K}$	$V_c = 0.43$ m ³
$UA = 762 \text{ 300}$ J/min°K	$F_{cs} = 0.21$ m ³ /min		$UA = 762 \text{ 300}$ J/min°K	$F_{cs} = 0.21$ m ³ /min	

4.4.2 Modelo del espacio de estados.[4]

En este apartado se linealiza las ecuaciones no lineales del modelo para los tanques T79 y T80⁸, para encontrar el espacio de estado usando la siguiente estructura:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

Donde los estados, entradas y salidas están dados por los siguientes vectores:

$$x = \begin{bmatrix} T - T_s \\ T_c - T_{cs} \end{bmatrix} = \text{Variables de estado}$$

$$u = \begin{bmatrix} F_c - F_{cs} \\ F - F_s \\ T_i - T_{is} \\ T_{ci} - T_{cis} \end{bmatrix} = \text{Variables de entrada}$$

$$y = \begin{bmatrix} T - T_s \\ T_c - T_{cs} \end{bmatrix} = \text{Variables de salida}$$

Para resolver la matriz A, primero se debe tener en cuenta que las ecuaciones (Ecuación 1) y (Ecuación 2) también pueden ser representadas de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 3} \quad \frac{dT}{dt} = f_1(T, T_c, F_c, F, T_i, T_{ci}) = \frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_i - T) + \frac{UA(T_c - T)}{V\rho C_p}$$

⁸ En el trabajo sólo observa el procedimiento para el tanque T79. Esto debido a que ambos tanques llevan el mismo procedimiento.

$$\text{Ecuación 4} \quad \frac{dT_c}{dt} = f_2(T, T_c, F_c, F, T_i, T_{cis}) = \frac{dT_c}{dt} = \frac{F_c}{V_c} (T_{ci} - T_c) - \frac{UA(T_c - T)}{V_c \rho_c c_{pc}}$$

Seguidamente se debe aplicar una derivada parcial de la siguiente forma $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$, para calcular los valores de la matriz A:

$$A_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} = \frac{\partial f_1}{\partial T} = -\frac{F_s}{V} - \frac{UA}{V \rho_c c_{pc}} = -0,0825$$

$$A_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{\partial f_1}{\partial T_c} = \frac{UA}{V \rho_c c_{pc}} = 0,0525$$

$$A_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = \frac{\partial f_2}{\partial T} = \frac{UA}{V_c \rho_c c_{pc}} = 0,732$$

$$A_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = \frac{\partial f_2}{\partial T_c} = -\frac{F_{cs}}{V_c} - \frac{UA}{V_c \rho_c c_{pc}} = -1,221$$

Sobre la matriz B se tiene que los elementos de esta son:

$$B_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial u_1} = \frac{\partial f_1}{\partial F_c} = 0$$

$$B_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial u_2} = \frac{\partial f_1}{\partial F} = \frac{T_{is} - T_s}{V} = -1,16$$

$$B_{13} = \frac{\partial f_1}{\partial u_3} = \frac{\partial f_1}{\partial T_i} = \frac{F_s}{V} = 0,03$$

$$B_{14} = \frac{\partial f_1}{\partial u_4} = \frac{\partial f_1}{\partial F_{ci}} = 0$$

$$B_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial u_1} = \frac{\partial f_2}{\partial F_c} = \frac{T_{cis} - T_{cs}}{V_c} = 13,953$$

$$B_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial u_2} = \frac{\partial f_2}{\partial F} = 0$$

$$B_{23} = \frac{\partial f_2}{\partial u_3} = \frac{\partial f_2}{\partial T_i} = 0$$

$$B_{24} = \frac{\partial f_2}{\partial u_4} = \frac{\partial f_2}{\partial T_{ci}} = \frac{F_{is}}{V_c} = 0,488$$

De los resultados de las matrices A, B y C⁹ se obtiene:

$$\text{Ecuación 5} \quad A = \begin{bmatrix} -0,0825 & 0,0525 \\ 0,732 & -1,221 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 6} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -1,16 & 0,03 & 0 \\ 13,953 & 0 & 0 & 0,488 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 7} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.4.3 Cálculo de la función de transferencia T79.[4]

Gracias a las propiedades que nos brinda el dominio de Laplace se puede calcular la función de transferencia con sólo conocer las matrices (A, B y C) del espacio de estado del sistema.

Para calcular dicha función de transferencia se debe aplicar la siguiente fórmula¹⁰:

$$\text{Ecuación 8} \quad G(s) = C(sI - A)^{-1}B$$

La Ecuación 8 puede ser calculada por la herramienta Matlab® con la función ss2tf que transforma de espacio de estados a función de transferencia, por lo obtenemos la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{\begin{bmatrix} 0,732 & (-1,16s - 1,416) & (0,03s + 0,0366) & 0,0552 \\ (13,935s + 1,1511) & -0,849 & 0,022 & (0,488s + 0,0403) \end{bmatrix}}{s^2 + 1,3035s + 0,0623}$$

La función de transferencia de interés para este proyecto, es la que relaciona la salida de temperatura del tanque (salida 1) y la temperatura en la chaqueta (entrada 4), se representa de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 9} \quad g_{14}(s) = \frac{0,0552}{s^2 + 1,3035s + 0,0623}$$

4.4.4 Cálculo de la función de transferencia T80.[4]

⁹ Donde la matriz C es 1.

¹⁰ Donde G(s) representa salida sobre entrada.

Se debe recordar que para cálculo de la función de transferencia se utiliza el mismo procedimiento que el explicado líneas arriba para el tanque T79. Por lo que únicamente se procederá a mostrar los resultados.

Los valores para las matrices A, B y C para este tanque serán:

$$\text{Ecuación 10} \quad A = \begin{bmatrix} -0,99 & 0,063 \\ 0,851 & -1,418 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 11} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -1,4 & 0,036 & 0 \\ 16,216 & 0 & 0 & 0,567 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 12} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tomando la Ecuación 10, Ecuación 11 y Ecuación 12 e ingresándolas en la función ss2tf de Matlab® se obtiene:

$$G(s) = \frac{\begin{bmatrix} 0,0357 & (-1,4s - 1,985) & (0,036 + ,051) & 1,252 \\ (16,216s + 16,054) & -1,191 & 0,0306 & (0,567s + 0,561) \end{bmatrix}}{s^2 + 2,408s + 1,35}$$

En cuanto a la función de transferencia de interés para este proyecto, la misma relaciona la salida de temperatura del tanque (salida 1) y la temperatura en la chaqueta (entrada 4) y se representa de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 13} \quad g_{14}(s) = \frac{1,252}{s^2 + 2,408s + 1,35}$$

4.5 Ajustes del PID.

4.5.1 Escalamiento de la señal del Tanque T79.

El módulo analógico 1794-IE8 y el sensor de temperatura de la **Figura 5** usan una señal estándar para enviar la información conocida como: modo 4 a 20, lo que significa una señal de corriente de 4-20 mA.

Es necesario conocer como el módulo interpreta esta medición, para eso nos apoyamos con la **Tabla 6**, en donde explica que el módulo analógico 1794-IE8 para la configuración

de 4-20 mA hace un conteo de 0x0000 a 0x7878 en hexadecimal, y pasado al sistema decimal corresponde a un conteo de 0 a 30840. [5]

Tabla 6. Tabla de conversión dependiente a la configuración. [5]

Corriente (mA)	Modo de 4-20 mA
0.00	----
1.00	----
2.00	----
3.00	----
4.00	0x0000
5.00	0x0787
6.00	0x0F0F
7.00	0x1696
8.00	0x1E1E
9.00	0x25A5
10.00	0x2D2D
11.00	0x34B4
12.00	0x3C3C
13.00	0x43C3
14.00	0x4B4B
15.00	0x52D2
16.00	0x5A5A
17.00	0x61E1
18.00	0x6969
19.00	0x70F0
20.00	0x7878
21.00	0x7FFF

Con esta información y con el rango de operación de temperaturas del sensor de la **Figura 4** (de 0-160°C), podemos hacer una relación lineal primero con la temperatura donde 4 mA representa 0°C y 20mA representa 160°C. Dicho esto podemos relacionar entonces 0°C

como un conteo de 0 y 160°C como un conteo de 30840, para una mejor lectura de lo dicho anteriormente se propone la **Tabla 7**.

Tabla 7. Relación corriente, temperatura y conteos. [Elaboración propia]

Corriente (mA)	Temperatura (°C) (y)	Conteo (x)
4	0	0
20	160	30840

Se puede calcular cualquier temperatura usando los datos de la **Tabla 7**, y usando la ecuación de la recta, con lo que se tiene:

Ecuación 14
$$m = \frac{30840-0}{160-0} = 192,75$$

Con un cruce por cero, por lo que b=0, se tiene una ecuación final para calcular cuántos conteos equivale la temperatura.

Ecuación 15
$$y = 192,75x$$

Dada la Ecuación 15 se calcula el “setpoint” (punto de equilibrio) a unos 40°C y nos da como resultado de 7710 conteos, estos valores se tomarán en cuenta más adelante.

4.5.2 Escalamiento de la señal tanque T80.

El escalamiento de este tanque es muy similar al tanque T79, puesto que comparten el mismo modulo analógico 1794-IE8, pero difieren en el sensor de temperatura. Para el tanque T80 se usa el sensor de la **Figura 6**, el cual cuenta con un rango de temperatura de -50°C a 200°C, por lo que se pueden visualizar lo datos en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Relación corriente, temperatura y conteo TM401. [Elaboración propia]

Corriente (mA)	Temperatura(°C) (y)	Conteo (x)
4	-50	0
20	200	30840

Con los datos de la **Tabla 8** se obtiene una nueva fórmula para determinar cuánto es el conteo a una temperatura determinada, la cual se consigue usando igualmente la ecuación de la recta.

Ecuación 16
$$m = \frac{30840-0}{200--50} = 123,36$$

Ahora calculando el valor de b, poniendo $y = 0$ y $x = -50$:

Ecuación 17
$$b = y - 123,36 * x = 6168$$

Por lo que tenemos una ecuación final para el cálculo de conteos de la siguiente forma:

Ecuación 18
$$y = 123,36x + 6168$$

Igualmente calculando el “setpoint” para el tanque T80 a una temperatura de 40°C, usando la Ecuación 18, se obtiene el valor de “setpoint” = 11102,4 conteos.

4.5.3 Escalamiento de salida.

El escalamiento de salida se calcula de igual manera para cada tanque (T79 y T80) debido a que van al mismo tipo de válvula y la señal sale por el mismo módulo de salida 1794-OE4. Enviando una señal de 4-20 mA. Este escalamiento es más sencillo de realizar, se debe poner el valor suministrado por la hoja de datos [5], siendo este igualmente de 0 – 30840 conteos.

4.5.4 Módulo PID RSLogix 5000™.

Gracias a las facilidades que brinda el programa RSLogix 5000™ tiene una función de PID la cual está lista para ser usada en programación en escalera, simplemente es necesario ajustar los parámetros que se aprecian en la **Figura 16**.

Los datos recolectados por el sensor de temperatura deberán ser ingresados en “process variable” y la acción de control generada será enviada por el parámetro llamado “control variable”. En ambos casos se asigna un nombre para identificarlos.

El módulo también puede ser configurado para ser esclavo de otra operación y/u otras funciones, sin embargo, para este caso no será necesario por lo que sólo se deberán rellenar las opciones con “0” para inhabilitar dichas funciones.

Otros aspectos que muestra el módulo son el “setpoint” (valor de equilibrio), el valor del sensor de temperatura y el porcentaje de salida de la válvula que se debe entender como la apertura generada para la corrección del error.

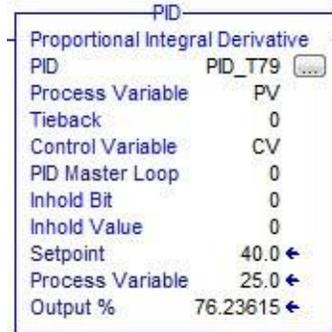


Figura 16. Módulo PID. [Elaboración propia]

4.5.4.1 Escalamiento en el módulo PID.

El módulo PID tiene una diversidad más detallada de ajustes, razón por la que se configuro de la siguiente manera: en la pestaña de “Scaling” (escalamiento) se ingresan los valores que se calcularon en la sección: **4.5.1** y **4.5.2**. En lo que respecta a la colocación de los valores debe realizarse de manera que el valor de los conteos para la señal del sensor de temperatura sea colocado en el apartado de “Process Variable (PV)”, en el “Unscaled Max” (siendo esta la escala máxima que suministra el módulo 1794-IE8) y se define con el valor de 30840 y un 0 para la escala mínima “Unscaled Min”.

El “Engineering Unit” hace referencia a la escala del sensor de temperatura por lo que se pone el rango de temperatura de funcionamiento del sensor, siendo estos de 0°C a 160°C para el T79 y de -50°C a 200°C para el T80.

Por último, se debe escalar también la salida del controlador “Control Variable (CV)” con los valores de 30840 para el máximo, es decir, cuando esté al 100% y un 0 para el mínimo. La **Figura 17** y **Figura 18** se dan como referencia para la colocación de los valores para el tanque T79 y T80 respectivamente. A manera de resumen se puede usar la siguiente tabla:

Tabla 9: Resumen escalamiento módulo PID. [Elaboración propia]

	T79	T80
	Process Variable	
Unscaled Max	30840	30840
Unscaled Min	0	0
Engineering Unit Max	160	200
Engineering Unit Max	0	-50
	Control Variable	
Max. (at 100%)	30840	30840
Min. (at 0%)	0	0

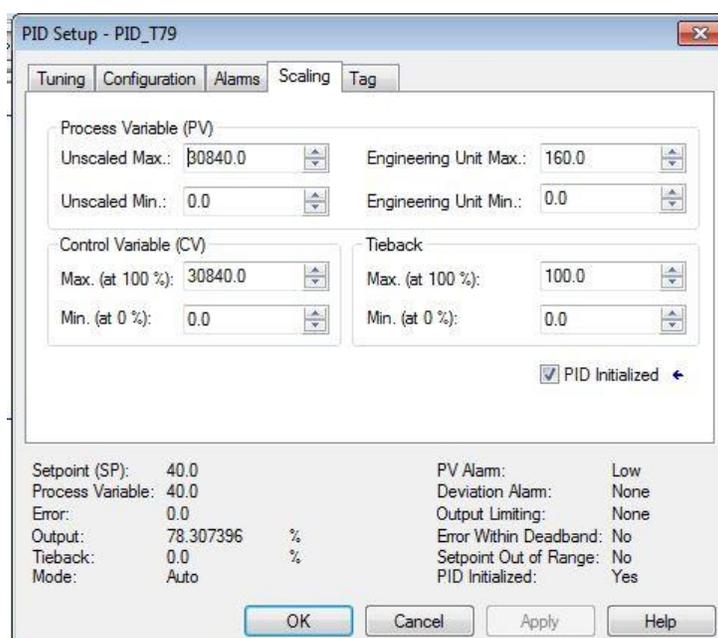


Figura 17. Escala módulo PID T79. [Elaboración propia]

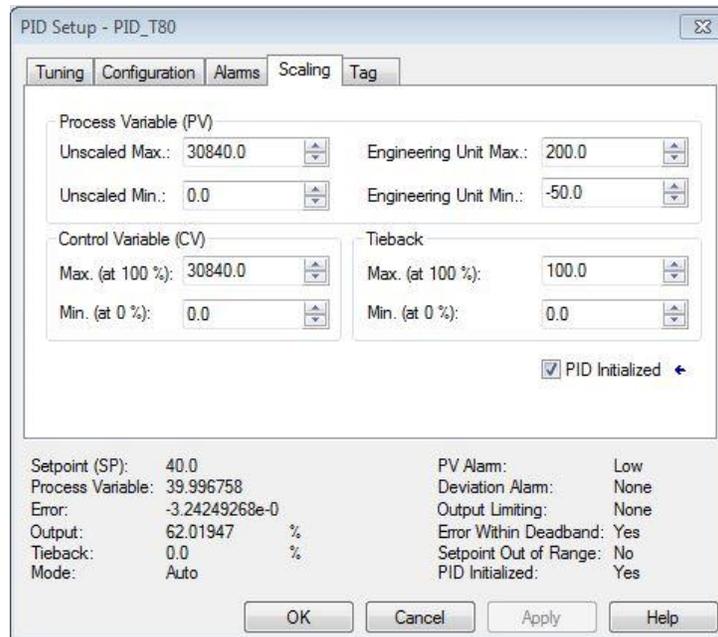


Figura 18. Escala módulo PID T80. [Elaboración propia]

4.5.4.2 Configuración de tiempo de muestreo, “deadband” y límites de apertura de la válvula en el módulo PID.

En la pestaña de configuración (**Figura 19**) se editan los parámetros “PID Equation” se deja en la opción de independiente para que tome los valores de Kp, Ki y Kd de manera separada y que no influyan directamente el cambio de los valores en estas constantes sobre toda la ecuación que usa el módulo PID.

El parámetro “Control Action” se debe colocar en la opción donde el error lo calcule con la resta del dato que adquiere el sensor (PV) con el dato de estado estable conocido como “setpoint” (SP).

Se define un tiempo de muestreo “Loop update time” de 5 milisegundos bajo la premisa del Teorema de Nyquist **[19]**(cap. 7) dice que sea 2 veces más rápido pero en la implementación se recomienda que sea 10 veces más rápido con un mínimo de 5 veces, conociendo que el módulo analógico trabaja un tiempo de muestreo de 50 milisegundos se designa 5 milisegundos para el muestreo del PID.

Otra configuración es el ajuste de un límite máximo o mínimo en porcentaje de la señal de control (CV). Esta función se da a conocer puesto que para varios sistemas como, por ejemplo, en los sistemas calentados por vapor se tienden a limitar las válvulas para que no abran al 100% y así evitar daños por sobrecalentamiento. En este caso específico se pueden mantener los valores al máximo y mínimo ya que es agua caliente lo que circula.

Se definió un valor de “Deadband” de 0,3 esto significa que la válvula no va a reaccionar a cambios de temperatura de aproximadamente 0,2°C. Se configura de dicha manera para que la válvula se conserve por más tiempo y no se desgaste por el uso constante. La configuración de esta pestaña fue la misma para los dos tanques por lo que sólo se presenta una de las imágenes (**Figura 19**).

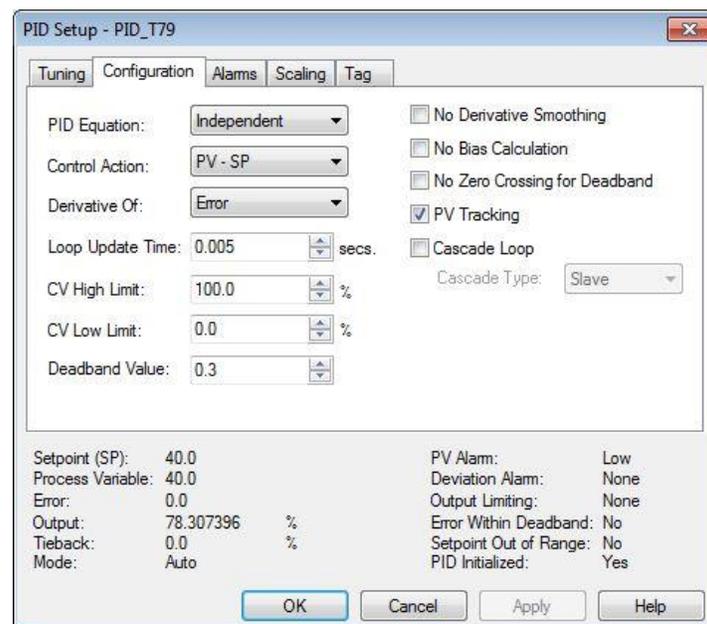


Figura 19. Pestaña de configuración módulo PID. [Elaboración propia]

4.5.4.3 Ajuste de límites para alarmas en el módulo PID.

Se establece una temperatura límite inferior y superior en la pestaña de alarmas, se configura el módulo PID para que accione una señal cuando la temperatura se eleve o disminuya 3°C, es decir, que este por debajo de los 37°C o por encima de los 43°C (en la **Figura 20** y **Figura 21** se tienen los valores ya escalados para los límites ya establecidos).

En la **Figura 22** se presenta una porción del programa en dónde se hace la comparación de la temperatura que envía el sensor y el valor designado para activar la alarma. Siendo esta condición verdadera se activa un contador el cual da un tiempo de 20 segundos antes de activar la alarma (es un tiempo preventivo), ya que este proceso se regula lentamente y es innecesario que la alarma se active continuamente.

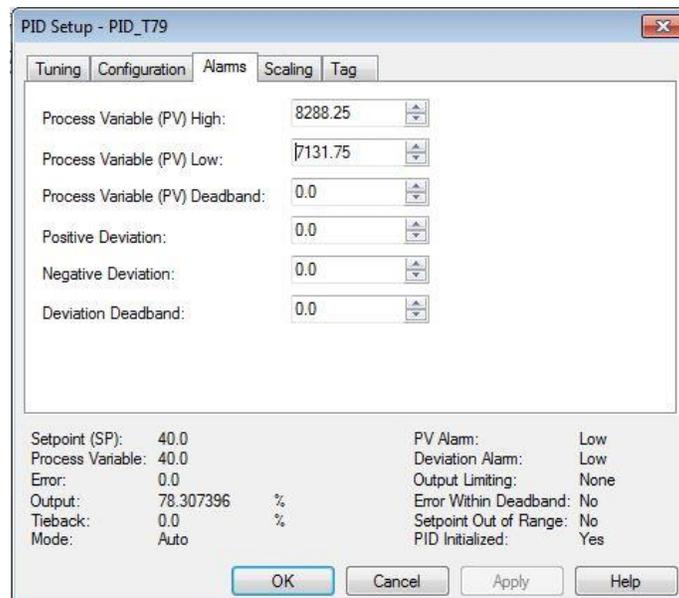


Figura 20. Pestaña de alarmas módulo PID T79. [Elaboración propia]

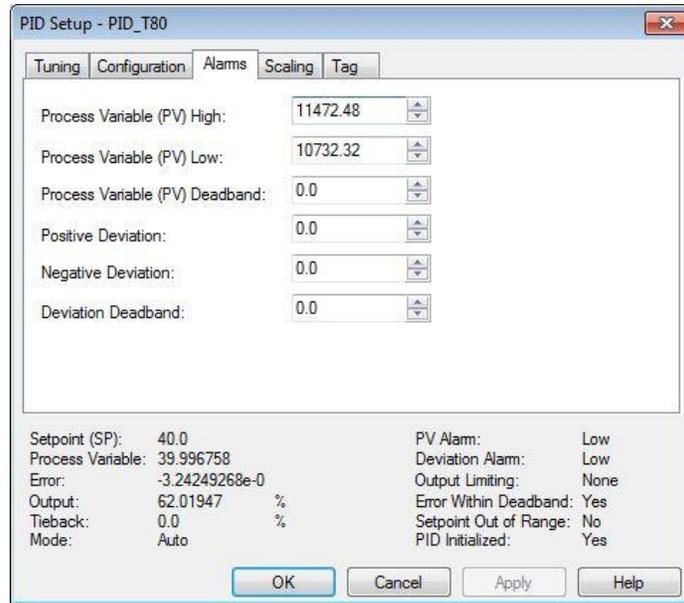


Figura 21. Pestaña de alarmas módulo PID T80. [Elaboración propia]

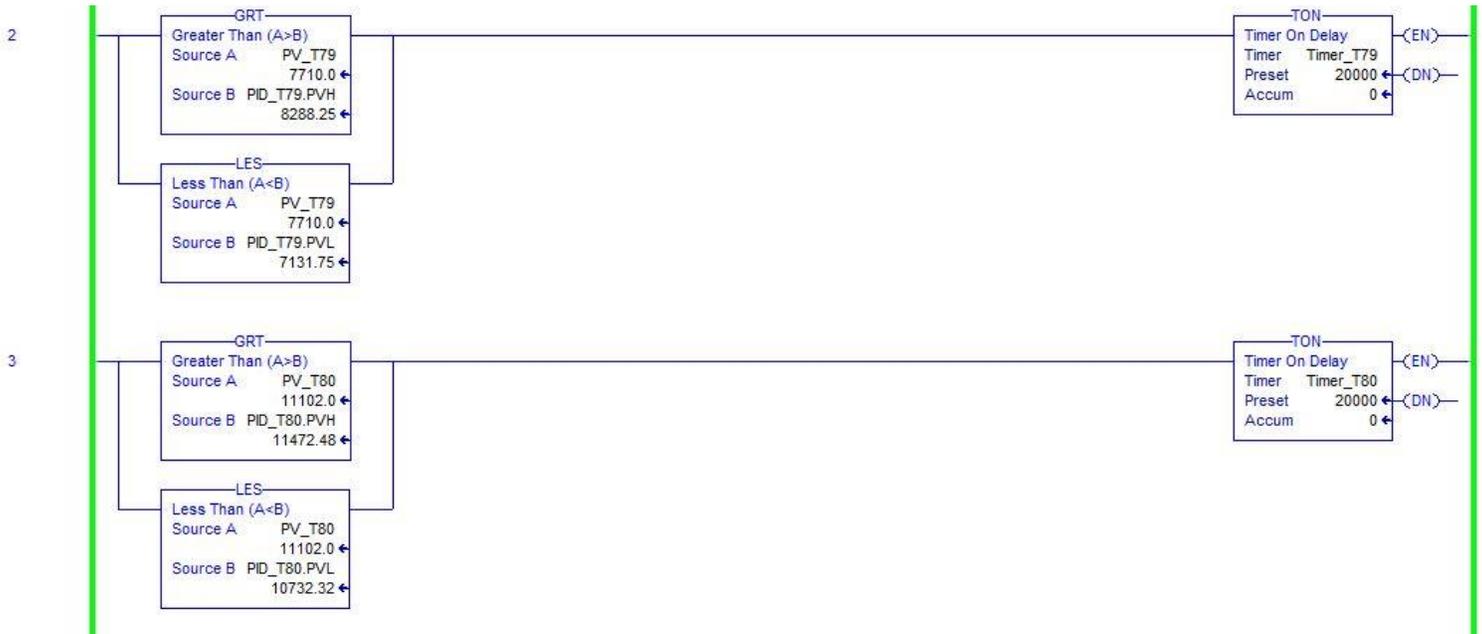


Figura 22. Código de tiempos para activar alarmas. [Elaboración propia]

4.5.4.4 Método de asignación empírica de las variables K_p , K_i y K_d .

Se propone un método para el cálculo de las variables K_p , K_i y K_d , de una manera empírica puesto que la mayor cantidad de tiempo el ajuste final de los sistemas PID se efectúan de dicha manera.

Consiste en llevar el sistema a un punto de oscilación, hacer que la válvula reguladora comience a oscilar, esto se logra poniendo las constantes K_p , K_i y K_d en cero, seguidamente, se sube la constante K_p hasta lograr un comportamiento oscilatorio, una vez se logra la elección del K_p que da dicho comportamiento, se toma ese valor de K_p y se divide entre dos.

La elección del valor para la constante K_i se realiza de una manera sencilla. Simplemente se debe tomar el valor de K_p y sacar el 10% de este valor (este 10% viene por criterio de experto), con estos pasos se hace la elección de dos de las constantes para el PID.

El tercer valor, es decir, el valor de la constante K_d se mantiene en cero, esto porque se está trabajando con un proceso termodinámico. Los procesos de temperatura para el calentamiento de tanques son procesos lentos, lo que implica que los cambios de temperatura no se realizan de una manera abrupta sino de manera paulatina, por lo que la constante K_d no hace efecto en este tipo de sistema (la constante K_d predice el comportamiento del sistema). La constante K_p normalmente es utilizada en procesos que requieran velocidad de reacción ante perturbaciones.

Lo que busca este método es hacer que la constante K_p se aproxime lo más cercanamente posible al valor de estabilidad y que el valor de K_i termine de llevarlo hasta el valor de estabilidad deseado. El ajuste final se hace variando poco a poco los valores ya establecidos hasta lograr el comportamiento deseado.

4.5.5 Cálculo del PID para la planta mediante Matlab®.

Para el cálculo de las constantes del PID del tanque T79 se usó la ecuación de transferencia (Ecuación 9). Esta ecuación fue ingresada en una de las aplicaciones, llamada PID Tuner [16], que facilita el programa Matlab®. En esta aplicación, se despliega una gráfica como se muestra en la **Figura 23** con el comportamiento ya ajustado por Matlab® con valores

iniciales ante la respuesta a un escalón unitario (estos valores ya fueron cambiados en la **Figura 23**). De primera intención los parámetros de control (PID) se pueden visualizar en la parte inferior derecha, también está el orden del filtro (N) que se le está aplicando.

Las barras que se presentan en la parte superior (como se ejemplifica en la **Figura 24**) son las que permiten hacer el ajuste de la curva haciendo que esta tenga un tiempo de estabilización más corto o más largo dependiendo de la aplicación o cuánto sobre-impulso se desea en la curva. La barra de arriba (flecha roja) es para hacer cambios más agresivos, mientras que la barra de abajo (flecha verde) es para cambios más sutiles.

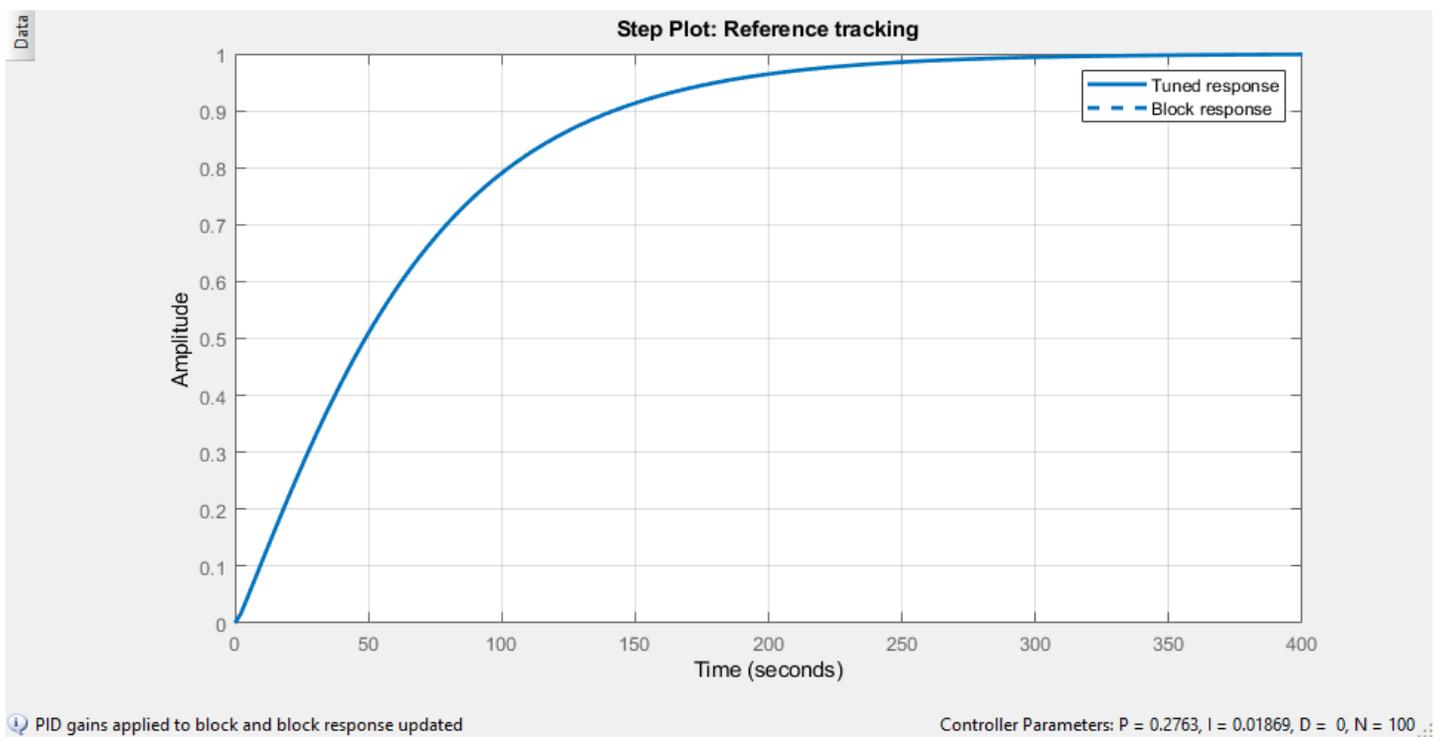


Figura 23. PID Tuner tanque T79. [Elaboración propia]

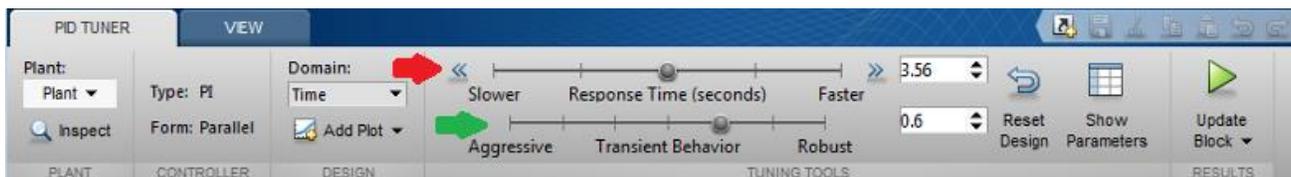


Figura 24. PID Tuner barras de ajustes. [Elaboración propia]

Para un mejor ajuste es recomendado abrir la pestaña llamada “Show Parameters” (mostrar parámetros). En esta ventada se brinda más información de lo que está sucediendo como se muestra en la **Figura 25**. Se tiene el tiempo de subida (Rise time), el tiempo de estabilización (Settling time) y de cuanto es el sobre-impulso (Overshoot), entre otros.

Para el ajuste del tanque T79 se busca que no tenga sobre impulso y que se vaya estabilizando lentamente. Por lo que se definió un tiempo de estabilización de aproximadamente 4 minutos (este tiempo fue recomendado por uno de los ingenieros de la empresa, indicando que el tiempo de estabilización podía estar aproximadamente en un rango de entre 2 – 5 minutos).

The image shows a software window titled "Controller Parameters" with two sections. The first section, "Block", contains a table with PID parameters. The second section, "Performance and Robus", contains a table with system response metrics.

Controller Parameters	
	Block
P	0.27628
I	0.018692
D	0
N	100

Performance and Robus	
	Block
Rise time	132 seconds
Settling time	232 seconds
Overshoot	0 %
Peak	1
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	85 deg @ 0.0151 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 25. Parámetros del controlador T79. [Elaboración propia]

Para el tanque T80 (al igual que en el T79) se obtienen los valores del PID y un tiempo de estabilización de un poco más de 2 minutos. El cual coincide con los tiempos recomendados para la estabilización de los tanques como se puede ver en la **Figura 26**.

The image shows a software window titled 'Controller Parameters' with a close button (X) in the top right corner. It contains two tables. The first table, 'Block', lists PID parameters: P (0.1016), I (0.03435), D (0), and N (100). The second table, 'Performance and Robus', lists system response metrics: Rise time (70.8 seconds), Settling time (125 seconds), Overshoot (0 %), Peak (1), Gain margin (Inf dB @ Inf rad/s), Phase margin (92.2 deg @ 0.0322 rad/s), and Closed-loop stability (Stable).

Controller Parameters	
	Block
P	0.1016
I	0.03435
D	0
N	100

Performance and Robus	
	Block
Rise time	70.8 seconds
Settling time	125 seconds
Overshoot	0 %
Peak	1
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	92.2 deg @ 0.0322 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 26. Parámetros del controlador T80. [Elaboración propia]

4.6 Comunicación con el sistema SCADA.

4.6.1 Colocación de iconos sobre el sistema SCADA.

Inicialmente en el sistema SCADA en la sección de los tanques de chocolate se muestra los procesos o datos como la temperatura del cuarto, temperatura de los tanques, peso de los tanques, si las bombas para circulación del agua están activas, igualmente si se encuentra en movimiento el chocolate, todos estos detalles se pueden apreciar en la **Figura 27**.

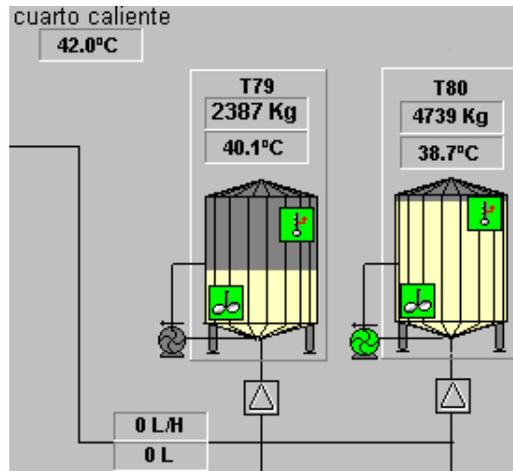


Figura 27. Estado inicial sistema SCADA. [Elaboración propia]

Por medio de la herramienta InTouch-WindowMaker® se agrega el ícono que hace representación de una válvula reguladora. Dicho ícono se puede apreciar en la **Figura 28**, este puede ser activado por el usuario y genera una pestaña extra con más detalles que serán explicados en el siguiente punto.



Figura 28. Icono para válvula reguladora. [Elaboración propia]

Finalmente, en la **Figura 29** se puede apreciar el estado final de la visualización con el ícono de la válvula reguladora, evidenciando que se tiene un control sobre este proceso.

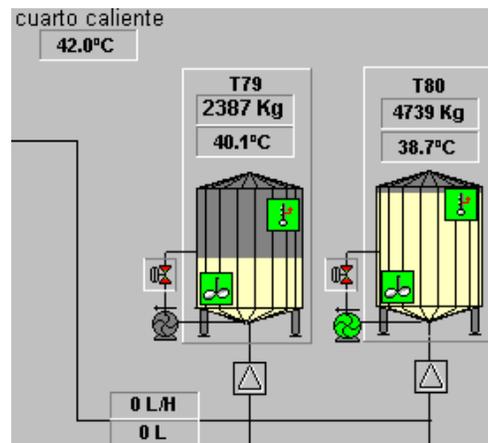


Figura 29: Estado final sistema SCADA. [Elaboración propia]

4.6.2 Creación de interfaz gráfica para las válvulas.

La creación de la interfaz para las válvulas se realizó con ayuda del programa InTouch-WindowMaker®. La misma se despliega cuando se selecciona el ícono de la **Figura 28**, y abre la **Figura 30**. Se designa con el nombre V1141 para el tanque T79 y V1142 para el tanque T80 (estos nombres fueron proporcionados por la empresa con el objetivo de llevar el control sobre las válvulas instaladas) y el nombre TCV como válvula controladora de temperatura que responde a la normativa ISA. La misma ventana es empleada para los dos tanques por lo que por fines prácticos sólo se presenta uno de ellos.

En esta interfaz se colocan tres barras verticales con su respectiva escala y un indicador en la parte inferior. Uno corresponde al sensor de temperatura (roja), otro al punto de equilibrio (celeste) y el otro a la apertura de la válvula (verde). Estas barras se encuentran en la parte izquierda de la **Figura 30**.

Se adicionan tres indicadores para visualizar y editar los valores de las constantes K_p , K_i y K_d . Se deja esta opción de editar para no ingresar constantemente al código fuente y poder hacer los ajustes desde esta interfaz.

Finalmente se agrega un graficador en tiempo real con una escala de tiempo en horas y minutos, en donde se muestran el punto de equilibrio deseado, la temperatura enviada por el sensor y la apertura de la válvula. La finalidad de este graficador es visualizar la tendencia con mayor claridad y corroborar el funcionamiento del módulo PID.

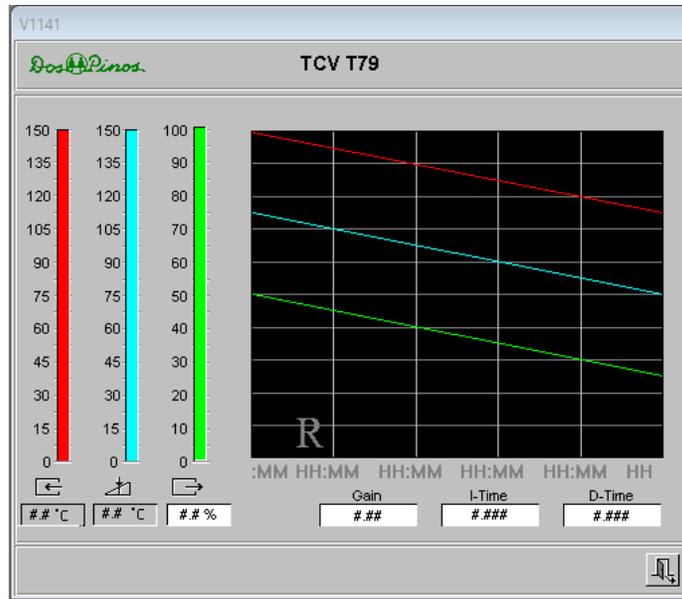


Figura 30. Interfaz gráfica para las válvulas. [Elaboración propia]

4.6.3 Asignación de etiquetas (tagnames).

La asignación de las etiquetas se hace mediante el programa InTouch-WindowMaker®. Dando un doble “click” sobre cualquier parte de la **Figura 30** despliega la información de la **Figura 31** donde se elegirá un nombre para cada variable y el tipo de dato (tal como marca la flecha roja). Se deberá seleccionar como tipo de dato para esta etiqueta (e igualmente para las demás) una entrada/salida real (I/O Real). En la flecha naranja se debe elegir alguno de los PLCs reconocidos por el programa RSLinx® en este caso el PLC designado para el cuarto caliente (nombre como reconoce la empresa el lugar dónde se lleva a cabo el proyecto). Y por último donde señala la flecha azul, se debe colocar el nombre de la respectiva entrada o salida que se piensa utilizar del PLC, por ejemplo, para una salida O:1.12

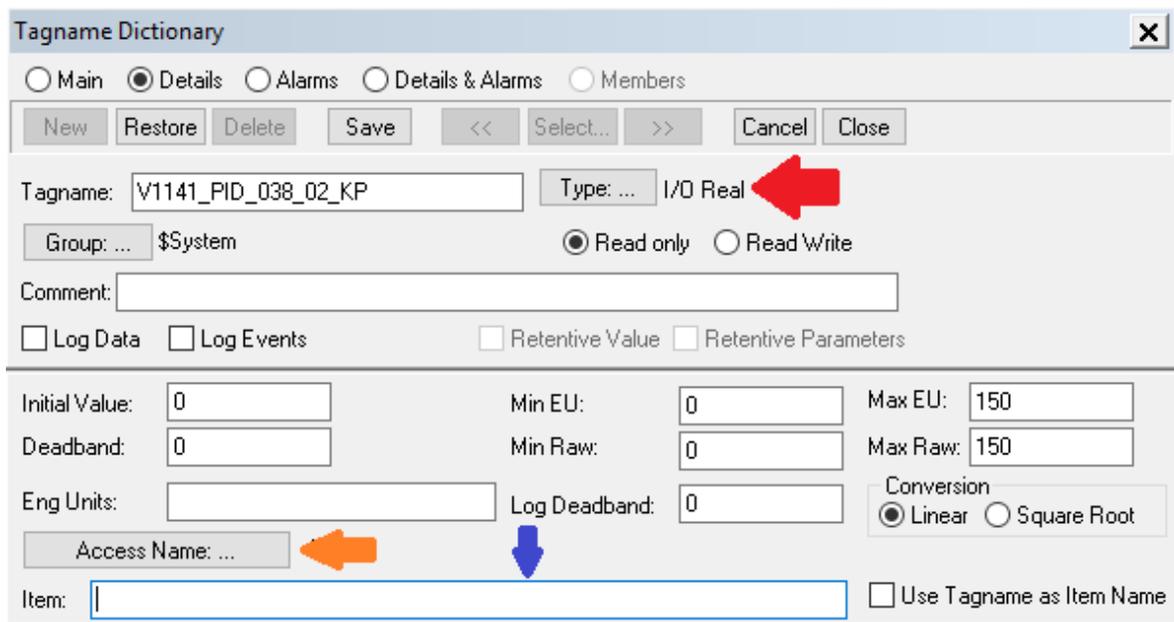


Figura 31. Creación de las etiquetas. [Elaboración propia]

En la **Tabla 10**, se pueden visualizar todas las etiquetas, tanto para el tanque T79 como el tanque T80. El nombre de la etiqueta se designó de la siguiente manera:

- La primera parte hace referencia al nombre de la válvula preestablecida como se puede ver en el anexo A, **Figura A- 1**.
- El término siguiente es la función (PID).
- Los números hace referencia a la numeración de los tanques.
- Las letras designan el valor a mostrar, ya sea el valor de las constantes del PID, el “setpoint”, el valor de la variable de proceso, etc.

Tabla 10. Designación de nombres para comunicación con el SCADA. [Elaboración propia]

Tanque T79		Tanque T80	
Etiqueta (tag)	Tipo de dato	Etiqueta (tag)	Tipo de dato
V1141_PID_038_02_KP	Analógico	V1142_PID_038_03_KP	Analógico
V1141_PID_038_02_TD	Analógico	V1142_PID_038_03_TD	Analógico
V1141_PID_038_02_TI	Analógico	V1142_PID_038_03_TI	Analógico
V1141_PID_038_02_OUT	Analógico	V1142_PID_038_03_OUT	Analógico
V1141_PID_038_02_PV	Analógico	V1142_PID_038_03_PV	Analógico
V1141_PID_038_02_SP	Analógico	V1142_PID_038_03_SP	Analógico

Dichas etiquetas una vez creadas sólo deben ser designadas en el lugar correspondiente tomando la **Figura 30** como parámetro. En la barra roja y en su indicador debe ir la etiqueta de la variable de proceso (PV), en la barra celeste y su indicador el punto de equilibrio (setpoint "SP") y en la barra verde y su indicador la salida, es decir, la apertura de la válvula (OUT). Deben ser puestas dichas etiquetas en el graficador para ver sus comportamientos. Quedando pendientes en este punto únicamente las etiquetas KP, TD y TI que corresponden a los valores de las constantes del PID, las cuales se colocan en los indicadores en la parte baja del graficador.

Capítulo 5. Resultados y Análisis

En esta sección se llevará a cabo la interpretación de las gráficas que se obtuvieron de la simulación en Simulink® con el programa Matlab® y sus parámetros relevantes.

Tanque T79:

Se dará inicio con los detalles sobre el control empleado para el tanque T79. En la sesión **4.4.3**, se calculó la función de transferencia (de manera que tenga como entrada la temperatura de la chaqueta y de salida la temperatura del tanque). Al final de esta sección se presentará una tabla resumen con los datos (**Tabla 11**).

A continuación, se visualizará una gráfica (**Figura 32**) con las señales de control, temperatura y apertura de válvula. El código de colores es el siguiente:

- **Anaranjado** → Temperatura de la chaqueta.
- **Verde** → Temperatura del tanque T79.
- **Celeste** → Valor de equilibrio (setpoint).
- **Morado** → Perturbación de prueba.
- **Lila** → Apertura de la válvula

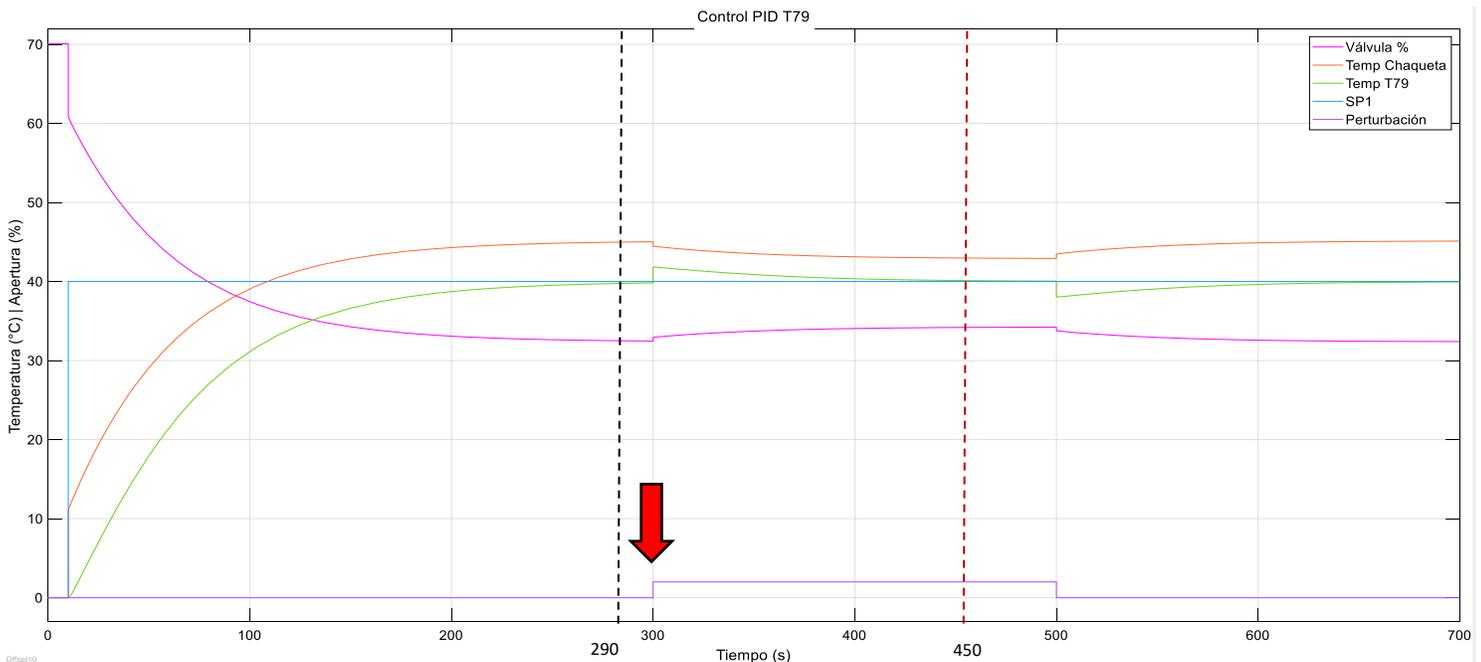


Figura 32. Señales del control T79. [Elaboración propia]

En la anterior imagen se establece un valor de equilibrio de 40°C (al cual debe llegar la temperatura del tanque T79). Si se sigue la línea de color verde se puede observar que el tanque T79 llega a la temperatura de 40°C en un tiempo aproximado de 280 segundos¹¹. Es importante mencionar además que al utilizar otra aplicación de Matlab®, específicamente PID Tuner se obtuvo un tiempo de estabilización de la temperatura de 232 segundos (lo que implica una diferencia de 48 segundos), ver **Figura 25**. Esta diferencia entre aplicaciones corresponde a ajustes finales que se efectuaron al momento de unir el bloque de control con el bloque de la función de transferencia (como se ve en el **Figura A-6**). Ahora bien, la línea morada (enfaticada con la flecha roja) evidencia que a los 300 segundos se aplica una perturbación de 2°C¹². Esa situación planteada con antelación implica que el sistema requiere de 150 segundos para su estabilización, razón por la que se concluye que el tiempo de estabilización variará de acuerdo a la perturbación una vez encontrada la temperatura de equilibrio. En relación con el sobre-impulso, este se ignora ya que su aporte es irrelevante como se aprecia en la **Figura 32**.

En relación con el análisis realizado supra, se puede afirmar que se obtiene un buen indicador, ya que la temperatura de la chaqueta está aproximadamente 5°C más alta que la temperatura del tanque (cuando este alcanza la temperatura de estabilidad, ver **Figura 32**). Ahora bien, una vez aplicada la perturbación, la temperatura de la chaqueta disminuye para estabilizar la temperatura del tanque.

¹¹ **NOTA:** este valor se visualiza en la imagen como 290 segundos, sin embargo, se hace la aclaración que los 10 segundos iniciales fueron agregados únicamente con el objetivo de facilitar la visualización de la gráfica. Por lo que 280 segundos corresponde al valor correcto.

¹² Se elige este valor ya que resulta ser el de mayor frecuencia en el sistema.

En cuanto a la acción de control (apertura de la válvula) fue necesario para la simulación hacer un bloque de ajuste donde se tuviera una relación entre la apertura de la válvula y la temperatura de la chaqueta. De la aplicación de dicha relación se obtiene la **Figura 33**.

Donde:

- La línea azul representa la temperatura de la chaqueta
- La línea roja representa la apertura de la válvula en porcentaje.

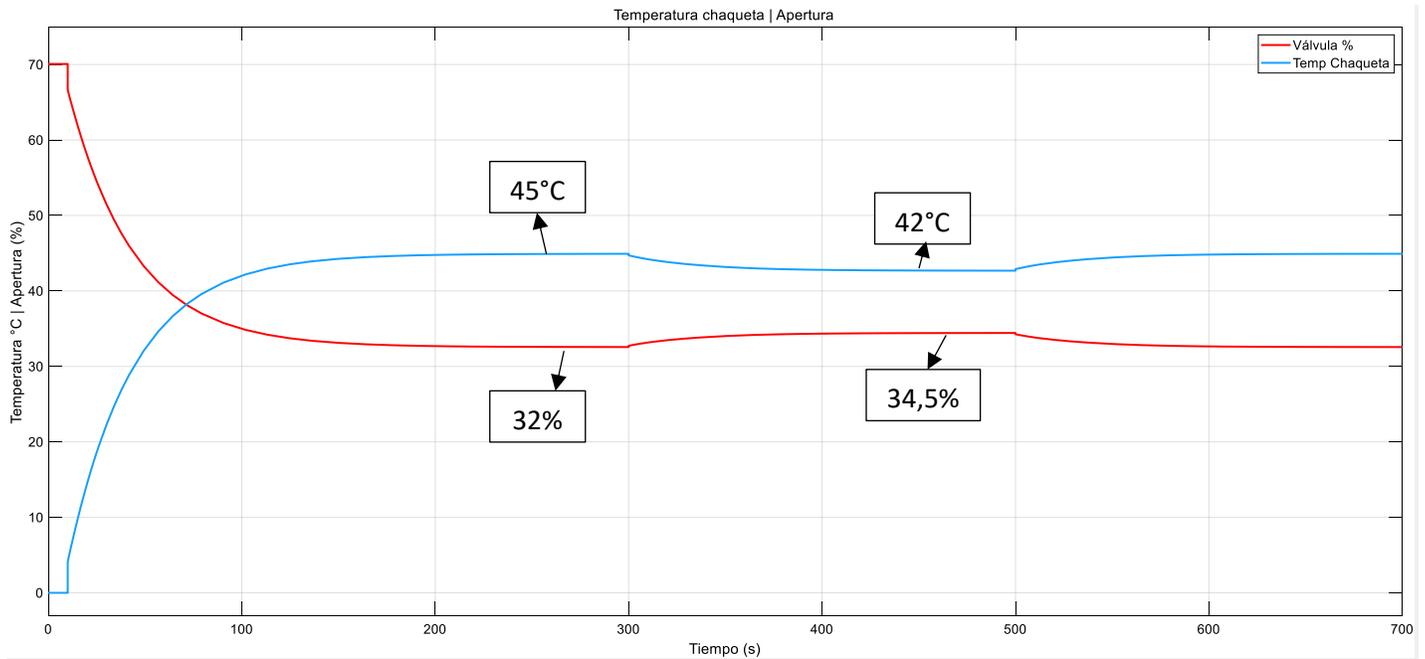


Figura 33. Apertura de la válvula. [Elaboración propia]

Nota: la relación está en el **Figura A- 5** y usó **Figura A- 4** para el cálculo .

Se inició con un 70% en la apertura de la válvula puesto que el sistema no requiere una mayor apertura. Los cambios fuertes se dan entre 20 – 50% de apertura. Con los anteriores datos se tiene que se necesita de una apertura de 32% para mantener la temperatura de la chaqueta en unos 45°C. Adicionalmente, una vez que se le aplica la perturbación de 2°C, la válvula aumenta su apertura aproximadamente a 34,5%. Ese cambio de apertura le permite al sistema variar la temperatura de 45°C a 42°C aproximante en la chaqueta y que el tanque T79 se estabilice en una temperatura de 40°C (así se muestra en la línea verde de la **Figura 33**).

Tanque T80:

En relación con el tanque T80 se aplicó el mismo procedimiento que para el tanque T79.

En la **Figura 34** se muestra el código de color utilizado:

- **Anaranjado** → Temperatura del tanque T80.
- **Verde** → Temperatura de la chaqueta.
- **Celeste** → Valor de equilibrio (setpoint).
- **Rojo** → Perturbación de prueba.
- **Morada** → Apertura de la válvula

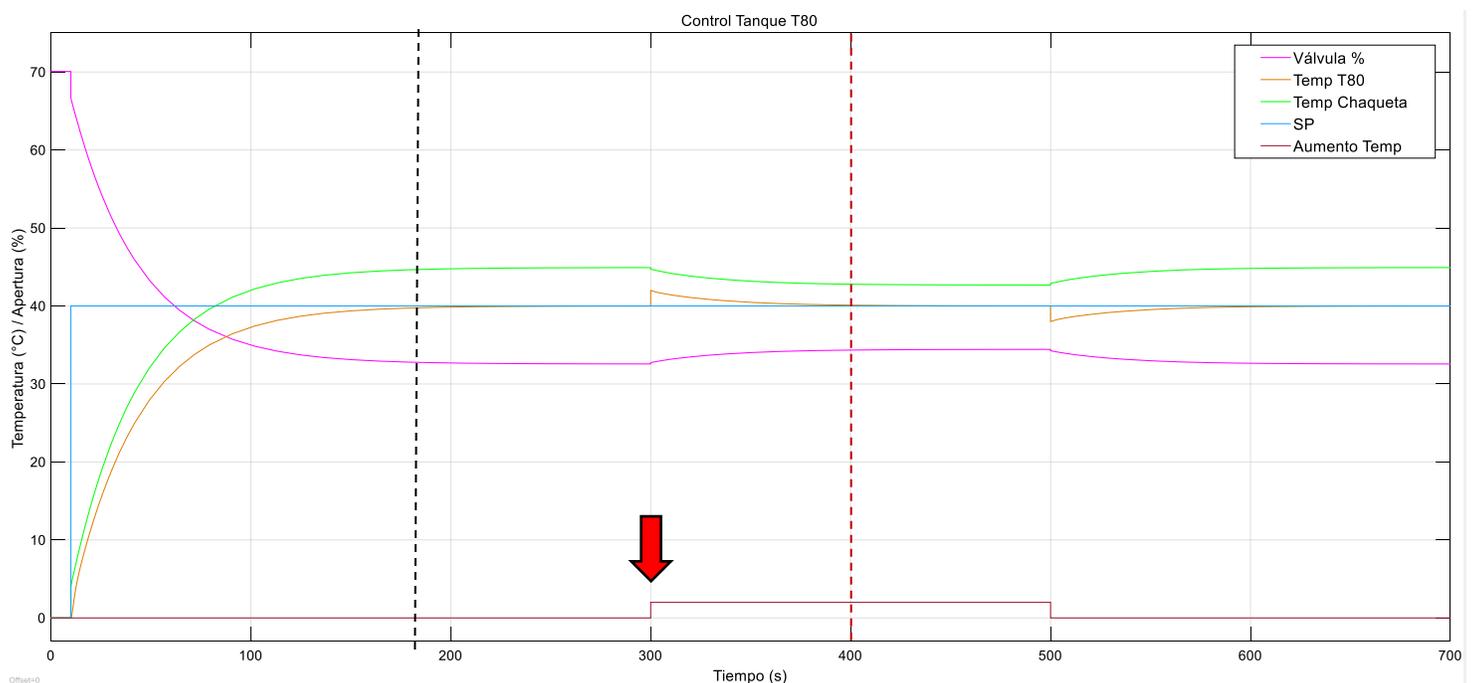


Figura 34. Señales de control T80. [Elaboración propia]

Cuando se aplica una perturbación de 2°C, el tiempo de estabilización es de unos 100 segundos, donde este se acerca más al que se calculó. Donde se resalta un sobre impulso despreciable

En la anterior imagen se establece un valor de equilibrio de 40°C (al cual debe llegar la temperatura del tanque T80). Si se sigue la línea de color anaranjada se puede observar que el tanque T80 llega a la temperatura de 40°C en un tiempo aproximado de 180

segundos¹³. Es importante mencionar además que al utilizar otra aplicación de Matlab®, específicamente PID Tuner se obtuvo un tiempo de estabilización de la temperatura de 125 segundos (lo que implica una diferencia de 55 segundos), ver **Figura 26**. Esta diferencia entre aplicaciones corresponde a ajustes finales que se efectuaron al momento de unir el bloque de control con el bloque de la función de transferencia (como se ve en el **Figura A-6**). Ahora bien, la línea roja (enfaticada con la flecha roja) evidencia que a los 300 segundos se aplica una perturbación de 2°C¹⁴. Esa situación planteada con antelación implica que el sistema requiere de 100 segundos para su estabilización, razón por la que se concluye que el tiempo de estabilización variará de acuerdo a la perturbación una vez encontrada la temperatura de equilibrio. En relación con el sobre-impulso, este se ignora ya que su aporte es irrelevante como se aprecia en la **Figura 34**.

Tabla 11. Tabla resumen de las gráficas de control. [Elaboración propia]

T79		T80	
Tiempo Estabilización (s)		Tiempo Estabilización (s)	
Calculado	Simulación	Calculado	Simulación
232	280	125	180
Sobre impulso (%)		Sobre impulso (%)	
0	0	0	0
Apertura (%)		Apertura (%)	
//	35	//	34,7
T. Chaqueta estable(°C)		T. Chaqueta estable(°C)	
//	40	//	40

¹³ **NOTA:** este valor se visualiza en la imagen como 190 segundos, sin embargo, se hace la aclaración que los 10 segundos iniciales fueron agregados únicamente con el objetivo de facilitar la visualización de la gráfica. Por lo que 180 segundos corresponde al valor correcto.

¹⁴ Se elige este valor ya que resulta ser el de mayor frecuencia en el sistema.

Capítulo 6. Conclusiones

1. Luego de analizar el sistema de control existente fue posible hacer una serie de recomendaciones relacionadas a la ubicación de los elementos mecánicos (válvulas, sensores, tuberías, etc.). A partir de las mismas se realizó un nuevo diseño de un control automático optimizado y se generó un DTI para su incorporación en los planos de la empresa.
2. Se efectuó un documento detallado en el que se indica cuáles son los componentes necesarios para la futura implementación del proyecto en la empresa.
3. Se logró desarrollar un modelo matemático que permitió realizar los cálculos de coeficientes y variables de ajuste, obteniendo los tiempos y comportamientos adecuados de respuesta del sistema de cobertura de chocolate a partir del sistema de control automático actualizado.
4. Se logró diseñar un sistema de control que permite mantener la temperatura a 40°C (temperatura requerida por la empresa de acuerdo sus necesidades) gracias a las funciones de transferencia generadas por el modelo analítico.
5. Se creó la interfaz en el sistema SCADA lográndose la visualización de las temperaturas de los tanques, los distintos parámetros de control y un gráfico en tiempo real en donde se aprecia la temperatura del tanque, apertura de la válvula y el valor de equilibrio al que deben estar los tanques. Lo que colabora con el aseguramiento de la operación y el cumplimiento de las normas ISO definidas por la empresa.

Capítulo 7. Recomendaciones

1. Para futuros cambios o recalibración del sensor del tanque T80 se recomienda la colocación de termopozos con el objetivo de proteger los sensores de temperatura (como termopares, termistores y termómetros bimetálicos) contra los daños causados por presión excesiva, velocidad del material y corrosión. También para aumentar la vida útil del sensor y permitir la sustitución de este sin necesidad de vaciar el sistema, lo que reduciría la probabilidad de contaminación. **[20]**
2. De necesitarse, en el futuro, un modelo de un sistema y no contar con el modelo analítico de este, se recomienda la utilización de la aplicación "IDENT" de Matlab®. La cual se utiliza para generar la función de transferencia en el momento en que el sistema estudiado presente complejidades en los cálculos en relación con su comportamiento (poca maniobrabilidad o falta de datos, etc.).
3. En relación con las alarmas, se configuraron de forma tal que prevengan la elevación o disminución de la temperatura respecto de los límites establecidos para los tanques. Por lo tanto, están configuradas para activarse cuando varíe la temperatura en 3°C sobre el valor de equilibrio, es decir, que se activarán cuando estén por encima de los 43°C o por debajo de los 37°C (esto corresponde al uso estándar). Sin embargo, se recomienda que las alarmas deberán ser ajustadas dependiendo de la función que la empresa quiera efectuar, ya que para algunos productos se requiere de una cobertura de chocolate más gruesa, lo que implica que el punto de equilibrio sea más bajo. Mientras que cuando se necesita de una cobertura más delgada el punto de equilibrio deberá subir.
4. Los intercambiadores de calor son dispositivos cuya función es transferir el calor de un fluido a otro de menor temperatura. La transferencia de calor se produce a través de una placa metálica o tubo que favorezca el intercambio entre fluidos sin que estos se mezclen. **[29]** Una vez dicho lo anterior, se recomienda la colocación de un intercambiador de calor para el tanque T80 ya que esto facilita manejo de la temperatura, lo cual implicaría una reducción en el riesgo de una posible afectación a la materia prima, es decir, al chocolate.

5. Se recomienda como un parámetro de detección de fallas en el sistema de control, revisar al menos una vez a la semana el gráfico de tendencias de temperatura de los tanques y observar que la media se mantenga en el valor requerido.

6. También se recomienda la revisión del gráfico de tendencias (al menos una vez por semana) para determinar si es necesario variar las constantes del PID. Lo que implica que, por ejemplo, si la temperatura del tanque está por debajo del valor requerido será necesario hacer un ajuste de las constantes del PID. Todo lo anterior, haciendo la excepción de que se dé un cambio abrupto, situación en la que se deberá intervenir de inmediato.

Referencias

- [1]Automation, R. (2008, Agosto). RSLinx Classic. Retrieved from http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/gr/Inx-gr001_-es-e.pdf
- [2]Automation, R. (n.d.). RSLogix. Retrieved from <https://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/products/rslogix.page>
- [3]Automation, R. (n.d.). RSLogix 5000™. Retrieved from https://la.mathworks.com/products/connections/product_detail/rslogix-5000.html
- [4]B. Wayne, B. (1998). Process dynamics: modeling, analysis, and simulation. Prentice hall PTR.
- [5]Bradley, A. (1996, Mayo). Manual del usuario. Retrieved from Allen Bradley: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1794-um002_-es-p.pdf
- [6]Burkert. (n.d.). Tipo 2702 - Válvula reguladora. Retrieved from Burkert: <https://www.burkert.es/es/type/2702>
- [7]Burkert. (n.d.). Tipo 8693 - Regulador de proceso electroneumático. Retrieved from Burkert: <https://www.burkert.es/es/type/8693>
- [8]Burkert. (n.d.). Válvula de control de asiento inclinado. Retrieved from Burkert: <https://www.burkert.com/en/Media/plm/DTS/DS/DS2702-Standard-ES-ES.pdf?id=DTS00000000000000001000081841ESB>
- [9]Endress+Hauser. (n.d.). iTHERM TM401. Retrieved from Endress+Hauser: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/temperature-measurement-thermometers-transmitters/Hygienic-RTD-thermometer-iTHERM-TM401>
- [10]Endress+Hauser. (n.d.). Technical Information iTHERM TM401. Retrieved from Endress+Hauser: https://portal.endress.com/wa001/dla/5000572/5794/000/02/TI01058TEN_0315.pdf
- [11]I, M., R, S., & R, F. (2011). Mecánica de Fluidos. España.
- [12]Intor. (n.d.). Válvulas de asiento inclinado: cómo son y para qué se utilizan. Retrieved from Intor: <http://www.intor.com.ar/valvulas-de-asiento-inclinado-como-son-y-para-que-se-utilizan/>
- [13]ISO. (2015). ISO 9001 Calidad. Retrieved from ISO: <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>
- [14]ISO. (2018, Junio). ISO 22000 Inocuidad de los alimentos. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/65464.html>
- [15]JMIndustrial. (n.d.). Transductores de temperatura. Retrieved from <https://www.jmi.com.mx/transductores-de-temperatura>

- [16]MathWorks. (n.d.). PID Tuner. Retrieved from MathWorks:
<https://la.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner.html>
- [17]Mazzone, V. (2002, Marzo). Automatización y Control Industrial. Retrieved from
[eng.newcastle.edu.au](http://www.eng.newcastle.edu.au):
<http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [18]Morilla García, F. (2007, Enero 11). El Controlador PID. Madrid. Retrieved from
<https://es.slideshare.net/MnicaMoreno/el-controlador-pid>
- [19]Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: Person.
- [20]Omega. (n.d.). Qué es un termopozo. Retrieved from <https://es.omega.com/technical-learning/criterios-de-seleccion-y-caracteristicas-de-termopozos.html>
- [21]Pak, T. (n.d.). TPT12. Retrieved from <https://docslide.us/documents/ptp12.html>
- [22]Pinos, D. (n.d.). Retrieved from
https://www.facebook.com/pg/dospinos/about/?ref=page_internal
- [23]Pribloc. (2017, Marzo 1). ¿Que es un P&ID? Retrieved from
<https://www.pirobloc.com/blog-es/que-es-un-piping-and-instrumentation-diagram/>
- [24]Rocatek. (n.d.). Programacion en escalera PLC basica. Retrieved from
http://www.rocatek.com/forum_programacion_ladder.php
- [25]Sánchez, A. E. (2013, Octubre 25). Que es un PLC. Retrieved from CTIN:
<http://www.ctinmx.com/que-es-un-plc/>
- [26]Simbolos y Diagramas. (n.d.). Retrieved from <http://dea.unsj.edu.ar/sinc/Simbologia-ISA.pdf>
- [27]Sistemas de control. (n.d.). Retrieved from
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>
- [28]Wonderware. (n.d.). Qué es SCADA. Retrieved from <http://www.wonderware.es/hmi-scada/que-es-scada/>
- [29]Garcia, R. (3 de Noviembre de 2017). Intercambiadores de Calor. Obtenido de
<https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>

Anexos

Anexo A-1 Diagrama de tuberías e instrumentación inicial

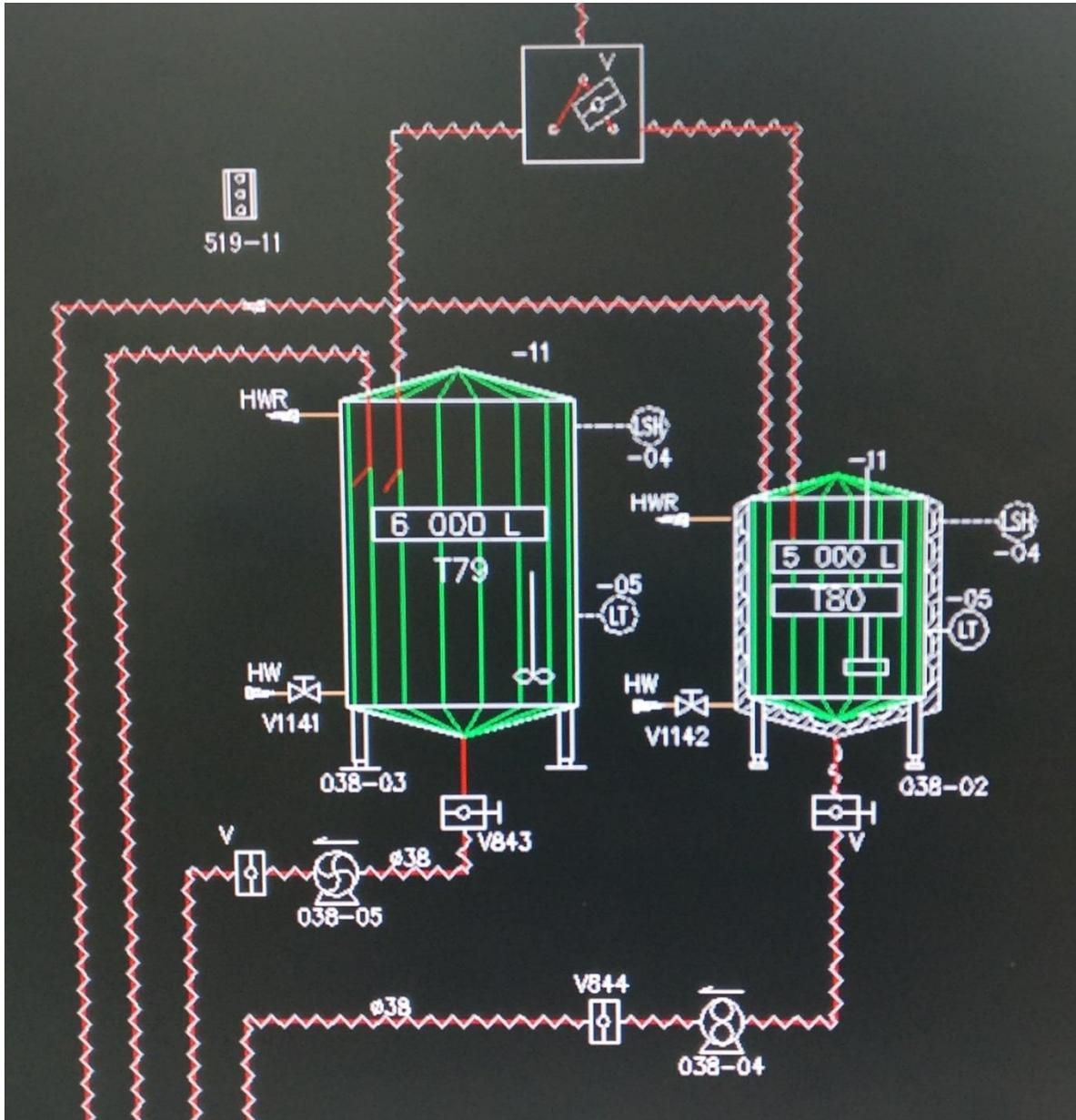


Figura A- 1. Diagrama de tuberías e instrumentación inicial. [Elaboración propia]

Anexo A-3 Diagrama de tuberías e instrumentación propuesta.

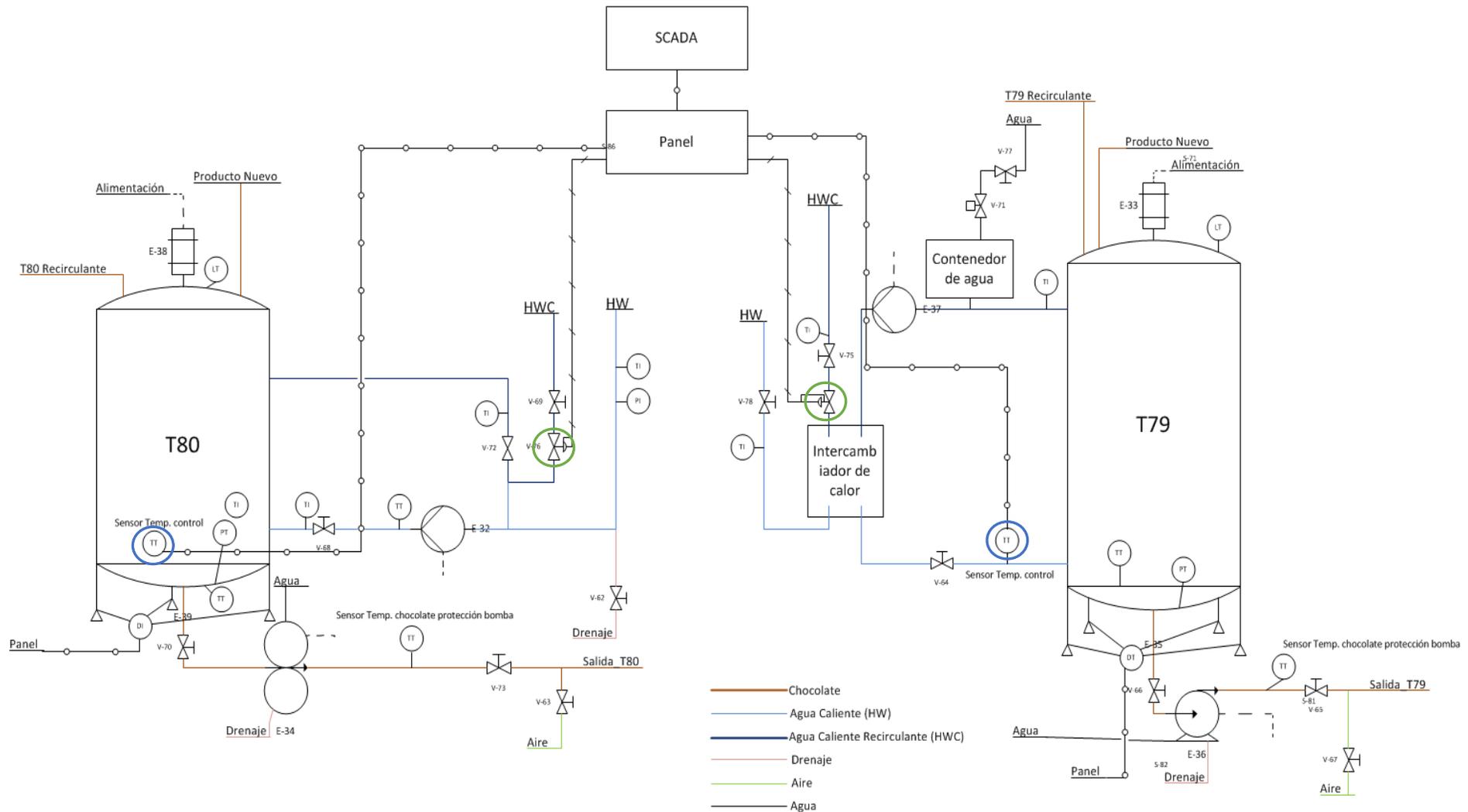


Figura A- 3. Propuesta de ubicación de sensores y válvulas. [Elaboración propia]

Anexo A-4 Ajuste para la válvula.

Valores Kv [m³/h]

Tamaño puerto y orificio [mm]	Tamaño actuador [mm]	Carrera [%]										
		5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
13/15	F-80	0,23	0,24	0,26	0,35	0,7	1,85	2,9	3,5	4	4,3	4,5
20	F-80	0,30	0,33	0,42	0,7	2,85	5,3	6,6	7,5	8,2	8,6	9
25	F-80	0,39	0,41	0,60	1,25	4,5	8,5	10,5	12,2	13,5	14,2	15
32	F-80	0,55	0,65	0,95	1,5	4	9,3	13,8	16,5	18,8	21	23
40	G-100	0,65	0,85	1,5	5	14	20	25	27	30	33	35
50	G-100	1	1,3	2	5	16	27	34	41	45	49	53

Figura A- 4. Valor Kv, para válvula de 40mm. [8]

Anexo A-5 Ajuste para la válvula.

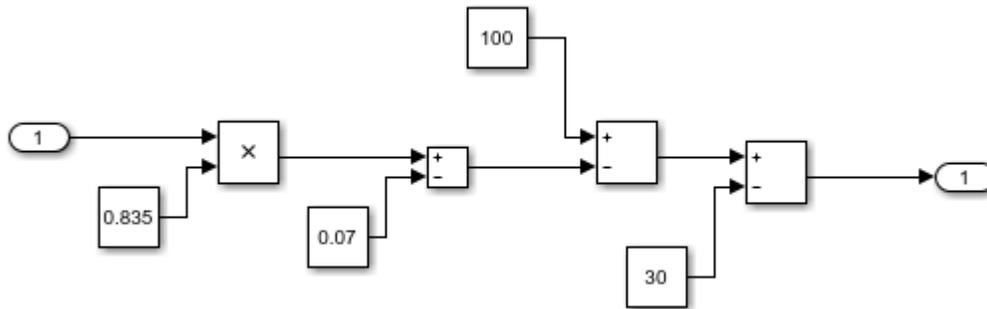


Figura A- 5. Relación de temperatura para apertura. [Elaboración propia]

Anexo A-6 Diseño de los sistemas de control en Simulink®.

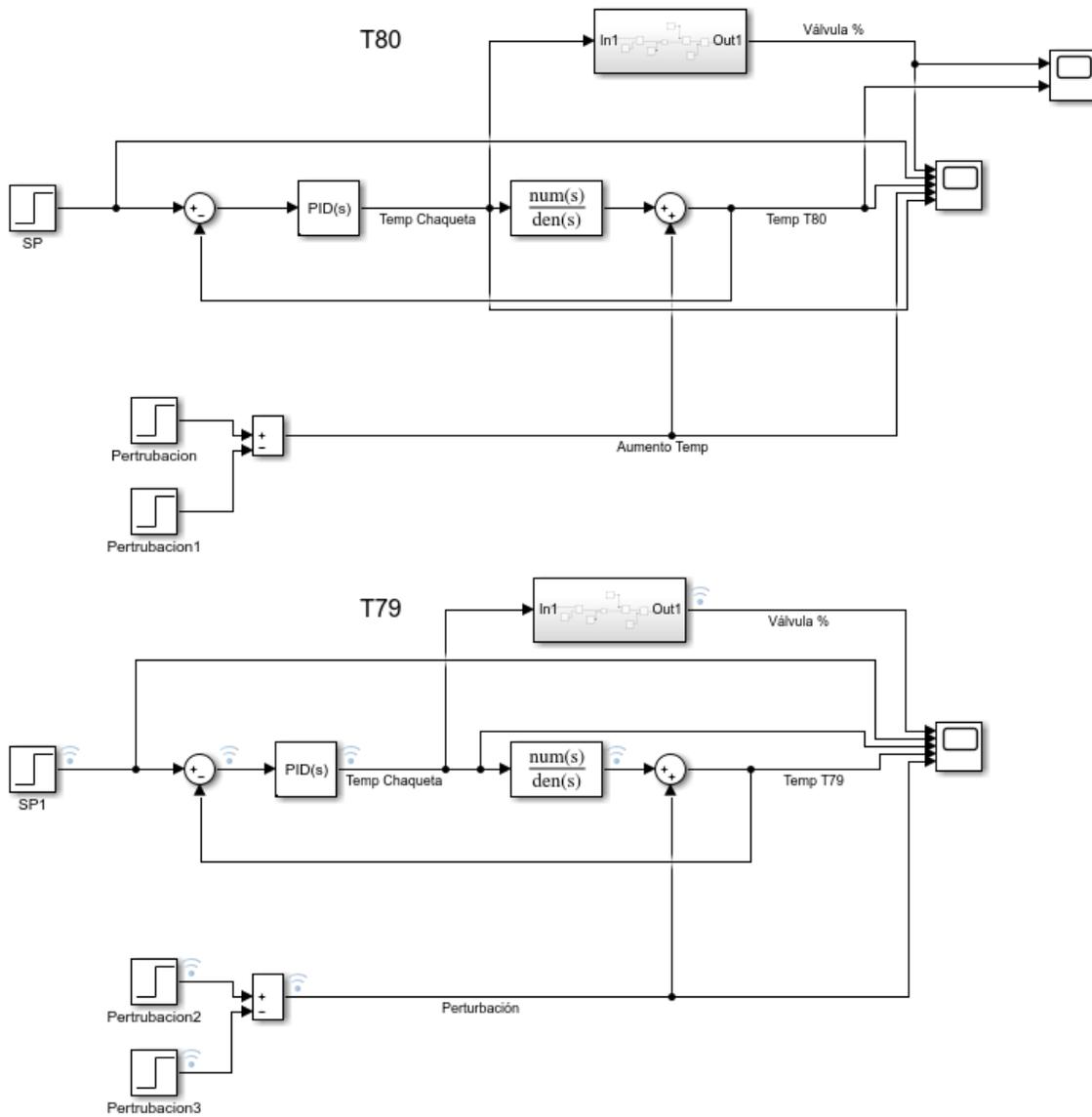


Figura A- 6. Diagrama de bloques de los sistemas en simulink. [Elaboración propia]

Anexo A-7 Glosario.

DTI: Diagrama de Tuberías e Instrumentación.

PID: Proporcional Integral Derivativo.

PLC: Programmable Logic Controller (controlador lógico programable).

P&ID: Piping and Instrumentation Diagram/Drawing.

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos).

Anexo A-8 Software para programación de PLCs.

RSLogix 5000™

RSLogix 5000™ es un software de diseño y configuración basado en Rockwell Automation Integrated Architecture™. Proporciona un entorno común para los usuarios que programan los controladores Allen-Bradley® ControlLogix® y CompactLogix™, en configuraciones estándar y de seguridad, junto con una amplia gama de módulos de redundancia, comunicación, movimiento y E / S disponibles para cada uno. [2]

Si tiene aplicaciones discretas, de proceso, por lotes, de movimiento, de seguridad y basadas en unidades, RSLogix 5000™ ofrece una interfaz compatible con IEC61131-3 fácil de usar, programación simbólica con estructuras y matrices y un completo conjunto de instrucciones que sirve para muchos tipos de aplicaciones. Proporciona lógica de escalera, texto estructurado, diagrama de bloques de funciones y editores de gráficos de función secuencial para el desarrollo de programas, así como compatibilidad con el modelo de estado de fase de los equipos S88 para aplicaciones de control por lotes y máquinas. [3]

RSLinx®

RSLinx® para redes y dispositivos de Rockwell Automation es una solución completa para comunicaciones industriales. Permite que el controlador programable Allen-Bradley acceda a una amplia variedad de aplicaciones de Rockwell Software y Allen-Bradley. Entre estas

aplicaciones se incluyen desde aplicaciones de configuración y programación tales como RSLogix y RSNetWorx hasta aplicaciones HMI (interfaz operador-máquina) como RSView32, hasta sus propias aplicaciones de adquisición de datos mediante Microsoft Office, páginas Web o Visual Basic®. Además, RSLinx Classic utiliza técnicas de optimización de datos avanzadas y dispone de una serie de diagnósticos. La interfaz de programación de aplicaciones (API) admite aplicaciones personalizadas creadas con RSLinx Classic SDK. **[1]**

SCADA

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition por sus siglas en inglés) no es una tecnología concreta sino un tipo de aplicación. Cualquier aplicación que obtenga datos operativos acerca de un “sistema” con el fin de controlar y optimizar ese sistema es una aplicación SCADA. La aplicación puede estar un proceso de destilado petroquímico, un sistema de filtrado de agua, los compresores de un gasoducto o cualquier otra. **[28]**