



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN TANQUE DE MEZCLADO
CON CALENTAMIENTO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA
PARA CONTROL DE PROCESOS”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: PAMELA LISSETTE LEGÑA ANRANGO

DIRECTOR: Ing. DARÍO FERNANDO GUAMÁN LOZADA, MSc.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Pamela Lissette Legña Anrango

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Pamela Lissette Legña Anrango, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 15 de septiembre de 2021

Pamela Lissette Legña Anrango

100512012-4

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; Tipo: Propuesta Tecnológica **MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN TANQUE DE MEZCLADO CON CALENTAMIENTO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA CONTROL DE PROCESOS**, realizado por la señorita: **PAMELA LISSETTE LEGÑA ANRANGO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marlon Ernesto Moscoso Martínez, MSc. _____ PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2021-09-15
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada, MSc. _____ DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN		2021-09-15
Ing. Linda Mariuxi Flores Fiallos, MSc. _____ MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2021-09-15

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado a mi madre Gladys Anrango quien ha sabido guiar cada uno de mis pasos, que con su ejemplo me mostró lo que una mujer con determinación puede conseguir, que con esfuerzo y sacrificio me sacó adelante, una mujer incansable y luchadora con la que siempre estaré en deuda. A mi abuelita Erlinda Morales, pues era su gran anhelo mientras estuvo a mi lado, quien me brindó su amor incondicional y ahora se convirtió en mi motivación para nunca rendirme.

Pamela.

AGRADECIMIENTO

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento en primer lugar a Dios, por otorgarme el milagro de la vida y por permitirme cumplir cada meta que me he trazado.

Gracias a mi madre Gladys Anrango por su entrega incondicional, por su fe, su confianza y soporte.

A mis abuelitos Erlinda Morales y Daniel Anrango, quienes me enseñaron que con esfuerzo y sacrificio se puede salir adelante, con honestidad y humildad. De la misma manera agradezco a mis tías Carmen y Eva (+) Morales mujeres maravillosas y de carácter fuerte, que me enseñaron la importancia de tener bien cimentados los buenos valores, que me brindaron su afecto y cuidados cuando más desamparada estaba.

A toda mi familia que ha sido mi apoyo y una parte importante en mi desarrollo personal y profesional, formaron parte de este arduo pero fructífero trayecto, quienes son parte de mi alegrías y tristeza, con ustedes aprendí lecciones importantes de vida y cooperaron como un gran equipo para impulsarme a alcanzar mis más grandes anhelos.

Agradezco también al Ing. Darío Guamán por la confianza y oportunidad que me brindó para desarrollar el presente proyecto de titulación.

Para concluir quisiera agradecer a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Facultad de Ciencias, por acogerme y permitir formarme profesionalmente, porque se convirtió en mi hogar y formo mi carácter, además allí conocí, compartí y conviví con mis amigos quienes se convirtieron en mi segunda familia.

Pamela.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. Antecedentes.....	16
1.2. Planteamiento del problema.....	16
1.3. Justificación del proyecto.....	17
1.4. Objetivos.....	19
1.4.1. Objetivo General.....	19
1.4.2. Objetivos Específicos.....	19
1.5. Alcance.....	20

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Estado de Arte.....	21
2.1.1. Tanque de mezcla con calentamiento.....	21
2.1.2. Modelado.....	22
2.1.3. Equipos virtuales.....	23
2.2. Bases Teóricas.....	23
2.2.1. Proceso de Mezclado.....	23
2.2.2. Equipo utilizado en la mezcla de fluidos.....	24
2.2.2.1. Tipos de tanques.....	24
2.2.2.2. Agitadores.....	26
2.2.2.3. Tipos de agitadores.....	26
2.2.3. Propiedades del fluido.....	28
2.2.4. Intercambiadores de calor.....	29

2.2.4.1.	Definición de Intercambiador de calor	29
2.2.4.2.	Mecanismos de transmisión de calor.....	29
2.2.4.3.	Tipos de Intercambiador de Calor	31
2.2.4.4.	Chaqueta de vapor	31
2.2.5.	Control de procesos.....	31
2.2.5.1.	Sistemas de control.....	33
2.2.5.2.	Variables que intervienen en el control de procesos.....	34
2.2.5.3.	Elementos para el control de procesos	35
2.2.6.	Elementos finales de control.....	36
2.2.7.	Controladores Industriales	38
2.2.7.1.	Tipos de controladores	38
2.2.8.	Simulación	41
2.2.9.	Softwares de simulación.....	42
2.3.	Marco Legal.....	43
2.3.1.	Software en Ecuador.....	43

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA	46
3.1.	Etapas de la metodología	46
3.2.	Selección de software.....	47
3.3.	Establecimiento de los parámetros de funcionamiento.....	47
3.3.1.	Generalidades del proceso	47
3.4.	Modelado matemático del sistema.....	49
3.4.1.	Control de nivel	50
3.4.2.	Balance de energía.....	55
3.4.3.	Balance de energía en la chaqueta	58
3.4.4.	Diagrama de bloques del sistema	60
3.4.4.1.	Control de nivel	60
3.4.4.2.	Control de temperatura	60
3.5.	Simulación en Matlab/Simulink	60
3.5.1.	Control de nivel	60
3.5.2.	Control de temperatura	64
3.6.	Construcción de la interfaz gráfica	66
3.6.1.	Interfaz gráfica para el control de nivel	66
3.6.2.	Interfaz gráfica para el control de temperatura.....	68

3.7.	Validación el sistema modelado	69
3.7.1.	Análisis dimensional de la función de transferencia del control de nivel	69
3.7.2.	Análisis dimensional de la función de transferencia del control de temperatura	70
3.8.	Desarrollo del manual del usuario	72

CAPÍTULO IV

4.	GESTIÓN DEL PROYECTO	74
4.1.	Presupuesto	74
4.2.	Recursos y Materiales.	74
4.3.	Cronograma	75
4.4.	Discusión y análisis de resultados	76
4.4.1.	Informe de resultados del modelado e interfaz gráfica	76
4.4.2.	Resultados para el control de nivel	78
4.4.2.1.	Proceso sin control	78
4.4.2.2.	Control PID	80

CONCLUSIONES	94
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	95
------------------------------	----

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2. Valores típicos de coeficiente de convección.....	30
Tabla 2-2. Marco Legal del uso de Software en Ecuador	44
Tabla 1-3. Parámetros estructurales del sistema para el control de nivel.....	48
Tabla 2-3. Condiciones operativas iniciales del sistema para el control de Nivel.....	48
Tabla 3-3. Parámetros estructurales del sistema para el control de temperatura	48
Tabla 1-4. Presupuesto del proyecto de titulación.....	74
Tabla 2-4. Cronograma de actividades	75
Tabla 3-4. Parámetros para la función pulso del proceso sin control Va1	79
Tabla 4-4. Parámetros para la función pulso del proceso sin control Va2	80
Tabla 5-4. Valores resultantes de las constantes para en control PID de Va2.....	83
Tabla 6-4. Parámetros de la función pulso Va1	84
Tabla 7-4. Valores de la función escalón Set Point	84
Tabla 8-4. Valores resultantes de las constantes para en control PID de Va1.....	86
Tabla 9-4. Parámetros de la función pulso para la válvula de alimentación.	88
Tabla 10-4. Parámetros de la función pulso para la válvula de alimentación.	90
Tabla 11-4. Valores para el control On-off.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Tanque típico del proceso con agitación	24
Figura 2-2. Tanque discontinuo	25
Figura 3-2. Tanque continuo	26
Figura 4-2. Agitador de paletas	27
Figura 5 -2. Agitadores para líquidos de viscosidad moderada	27
Figura 6-2. Agitadores para líquidos altamente viscosos	28
Figura 7-2. Proceso de convección.....	30
Figura 8-2. Sistema de control de un intercambiador de calor	32
Figura 9-2. Sistema de lazo abierto	34
Figura 10-2. Sistema de lazo cerrado	34
Figura 11-2. Partes de una válvula de control	36
Figura 12-2. Sistema de control de un intercambiador de calor	38
Figura 13-2. Señal de con control PID	39
Figura 14-2. Diagrama de bloques del control Proporcional Derivativo	40
Figura 15-2. Diagrama de bloques de Control Proporcional Integral	41
Figura 1-3. Esquema del tanque de mezcla con calentamiento	50
Figura 2-3. Diagrama de bloques para el control de nivel	60
Figura 3-3. Diagrama de bloques para el control de temperatura	60
Figura 4-3. Diagrama de bloques realizado en simulink	61
Figura 5-3. Diagrama del sistema para el control de nivel	61
Figura 6-3. Bloque Matlab función	62
Figura 7-3. Contenido de bloque Matlab Function, VA1	62
Figura 8-3. Contenido de bloque Matlab Function, VA2	63
Figura 9-3. Bloque de controlador PID	63
Figura 10-3. Bloque de control ON/OFF.....	63
Figura 11-3. Interior del bloque ON/OFF	64
Figura 12-3. Diagrama de bloques realizado en simulink	64
Figura 13-3. Diagrama del sistema de control de temperatura	65
Figura 14-3. Bloque de funciones, Matlab para el control de temperatura	65
Figura 15-3. Perturbación de la válvula de alimentación del tanque	66
Figura 16-3. Interfaz gráfica para el control de nivel	66
Figura 17-3. Pantalla para la gráfica de control de nivel.	67
Figura 18-3. Pantalla con los casos de estudio, almacenados	68
Figura 19-3. Interfaz gráfica para el control de temperatura	68

Figura 20-3. Gráfica obtenida desde simulink, para el control PID-out	71
Figura 21-3. Gráfica obtenida desde App Designer.	72
Figura 22-3. Botón para acceder al instructivo.....	72
Figura 1-4. Diagrama del sistema para el control de nivel	76
Figura 2-4. Diagrama del sistema de control de temperatura	77
Figura 3-4. Pantalla inicial de la aplicación.....	77
Figura 4-4. Pantalla secundaria de la aplicación.....	78
Figura 5-4. Proceso sin control	79
Figura 6-4. Perturbación en la Va1	79
Figura 7-4. Acción de control manual Va2	80
Figura 8-4. Sistema PID para el control de nivel.....	81
Figura 9-4. Linealización de la planta con PID Tuner.....	82
Figura 10-4. Control PID en la válvula Va2.....	82
Figura 11-4. Control PID en la Válvula de salida.....	83
Figura 12-4. Perturbación del control PID	84
Figura 13-4. Sistema PID para control de nivel en Va1	85
Figura 14-4. Control PID en la Va1	85
Figura 15-4. Perturbación en Va2	86
Figura 16-4. Control de Nivel ON-OFF.....	87
Figura 17-4. Control ON-OFF en la válvula Va1	87
Figura 18-4 Perturbación en la Va2	88
Figura 19-4. Diagrama del proceso sin control	89
Figura 20-4. Comportamiento de la válvula de alimentación de vapor	89
Figura 21-4. Flujo de vapor.....	89
Figura 22-4. Control PID de Temperatura.....	91
Figura 23-4. Válvula controlada.....	91
Figura 24-4. Flujo de vapor.....	91
Figura 25-4. Control on-off de Temperatura	92
Figura 26-4. Flujo de vapor con el controlador on-off	93

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: INTRODUCCIÓN AL MANUAL DE USUARIO.

ANEXO B: FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

ANEXO C: PROCESO DE SIMULACIÓN.

ANEXO D: CONTROL DE NIVEL DE FLUIDO

ANEXO E: RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO 1

ANEXO F: CASO DE ESTUDIO 2

ANEXO G: CASO DE ESTUDIO 4

ANEXO H: CASO DE ESTUDIO CON CONTROL ON-OFF

ANEXO I: CONTROL DE TEMPERATURA.

ANEXO J: CONTROL PID DE TEMPERATURA

ANEXO K: CONTROL ON-OFF DE TEMPERATURA

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CM	Completamente Mezclada
P	Proporcional.
I	Integral.
D	Derivativo.
PI	Proporcional-Integral.
PD	Proporcional-Derivativo.
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
SP	Set Point
M&S	Modelado y Simulación.
K_p	Constante proporcional para el controlador.
K_d	Constante derivativa para el controlador.
K_i	Constante integral para el controlador.
LT	Transmisor de nivel
LC	Control de nivel
TT	Transmisor de temperatura
TC	Control de temperatura

RESUMEN

El propósito del presente trabajo de integración curricular fue modelar y simular un tanque de mezclado con calentamiento, que sirva como una herramienta didáctica para la asignatura de control automático de procesos. Para ello se empleó funciones de transferencia, obtenidas de los balances de masa y energía, se declararon valores constantes y parámetros que determinan el comportamiento del sistema, con el fin de representarlos en diagramas de bloques y posteriormente programarlos gráficamente en Simulink, para poder observar el comportamiento dinámico del sistema en un rango determinado de tiempo. En este proyecto se aplicaron controladores Proporcional, integral, derivativo (PID) y ON-OFF, para el nivel y temperatura, presentando así varias formas de control. Los valores del punto de referencia (Set Point) y las perturbaciones se las definió como funciones escalón, cada una de ellas determinadas con parámetros de funcionamiento como amplitud, retraso y periodo, parámetros que fácilmente pueden ser modificados por el usuario. Además de los diferentes parámetros de los controladores, la interfaz gráfica se desarrolló empleando la herramienta App Designer de Matlab, la cual interactúa mediante una función directamente con el modelo del sistema en Simulink, que facilitó el diseño de la aplicación haciéndola visualmente comprensible y dinámica para los usuarios. La validación del modelo del sistema se lo hizo comparándola con la resolución de un caso práctico de forma manual. Se concluye que la herramienta virtual desarrollada logra simular el comportamiento de un tanque de mezclado con calentamiento, presenta una amplia funcionalidad y es de uso didáctico. Se recomienda realizar el diagrama de bloques a fin de tener una interpretación global del comportamiento del sistema.

Palabras clave: <TANQUE DE MEZCLADO CON CALENTAMIENTO>, <CONTROL DE PROCESOS>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <SIMULINK (SOFTWARE)>, <FUNCIONES DE TRANSFERENCIA>, <HERRAMIENTA DIGITAL>, <APP DESIGNER>, <SIMULACIÓN>, <MODELADO MATEMÁTICO>.



1781-DBRA-UTP-2021

SUMMARY

The aim of this work was to develop the modeling and simulation of a mixing tank with heater, which will work as a didactic tool for Automatic Process Control subject. To achieve this, transfer functions were used, obtained from the mass and energy balances, constant values and parameters that determine the behavior of the system were declared, in order to represent them in block diagrams and later program them graphically in Simulink, to be able to observe the dynamic behavior of the system in a given time range. In this project, proportional, integral, derivative (PID) and ON-OFF controllers were applied for level and temperature, presenting various forms of control. The values of set point and the disturbances were defined as step functions, each of them determined with operating parameters such as amplitude, delay and period, parameters that can easily be modified by the user. In addition to the different parameters of the controllers, the graphical interface was developed using Matlab's App Designer, which interacts by means of a function directly with the system model in Simulink, which facilitated the design of the application, making it visually understandable and dynamic for users. The validation of the system model was done by comparing it with the resolution of a practical case manually. It is concluded that the virtual tool developed manages to simulate the behavior of a mixing tank with heater, shows a wide functionality and didactic use. It is recommended to make the block diagram in order to have a global interpretation of the behavior of the system.

Keywords: <MIXING TANK WITH HEATER>, <PROCESS CONTROL>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <SIMULINK (SOFTWARE)>, <TRANSFER FUNCTIONS>, <DIGITAL TOOL>, <APP DESIGNER>, <MATHEMATICAL MODELING >.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Desde hace algunos años la idea de emular el comportamiento real de un sistema bajo un ambiente informático se extendió rápidamente entre los investigadores, siendo aceptada como una de las más poderosas herramientas tanto para la comprensión de fenómenos físicos como para la predicción operativa y/o funcional del sistema frente a algún aspecto o condición de operación (Buelvas y Alvear 2012, p. xi).

El sistema educativo actual enfrenta múltiples retos, uno de ellos son los cambios en nuestra sociedad, pues el internet a generado un gran interés en todos los ámbitos sociales. Desde la perspectiva académica que busca ofrecer programas acordes a las tendencias globalizadas de la economía, busca por medio de programas innovadores y tecnológicos mejorar la cobertura de la educación llevándola a todos los lugares posibles, como lo menciona (Tamayo Velez, Murillo Hoyos y Posada Williamson 2016, p. 18), en su artículo, por ello la presente investigación se basa en propiciar la utilización de equipos virtuales en las aulas de clase para fortalecer la enseñanza de la asignatura de control automático de procesos.

Mediante esta investigación se pretende explorar los recursos tecnológicos como una herramienta para el interaprendizaje abierto, dinámico y flexible, este trabajo tiene su base en el enfoque de modelación y simulación, el cual consiste en resolver numéricamente un modelo matemático que rige un sistema físico en el que la solución analítica no se conoce. El modelado y la simulación es un área de constante crecimiento e investigación, que va desde el mismo desarrollo y enfoques de modelado hasta la simulación de sistemas que permitan predecir comportamientos, ajustar diseños, probar condiciones de experimentación, hasta productos como simuladores de entrenamiento para operarios y herramientas de apoyo a la toma de decisiones en diferentes áreas del conocimiento (Buelvas y Alvear 2012, p. xi).

1.2. Planteamiento del problema

La Ingeniería Química está relacionada con los procesos en los cuales la materia experimenta un cambio en su composición, en el contenido energético o de estado físico; en los diferentes procedimientos para procesar la materia y en su aplicación para alcanzar objetivos útiles que sirvan de beneficio en favor de la sociedad. (Mans Teixidó et al. 2006, p. 21).

(Barderas y Bienzobas 2014), en su artículo “Habilidades espaciales y competencias en Ingeniería Química”, dice que el ingeniero químico se encarga del diseño, la construcción, la operación, el control y la administración de plantas químicas que permiten la transformación física y /o química de materias primas para la obtención de productos y servicios útiles al hombre, de una manera económica.

La importancia de desarrollar un tanque de mezclado con calentamiento como herramienta didáctica, radica en el éxito de muchas operaciones industriales, pues dependen de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. En la actualidad las industrias utilizan diversas formas para el proceso de agitación de minerales, pulpas, fluidos, entre otros compuestos que se producen a nivel mundial teniendo gran auge el proceso de agitación, debido a la capacidad que tienen los equipos de agitación o agitadores para la elaboración de las mezclas. A su vez, el crecimiento y perfeccionamiento de los procesos productivos están ligados con las mejoras de los equipos de agitación y con un mejor conocimiento de su funcionamiento y explotación (Osoria Claro 2018, p. 1).

Los tanques de mezclado, han sido utilizados históricamente en la industria alimenticia, la química y la biotecnología, constituyendo el tipo de reactor utilizado por excelencia. Estos equipos por lo general, necesitan un sistema de transferencia de calor para alcanzar la temperatura deseada en su interior y así obtener una correcta homogeneización de los componentes que vaya a procesar. Este hecho constituye la causa fundamental para que en la actualidad se continúen las investigaciones básicas sobre la hidrodinámica en este tipo de reactor (García Méndez y Guzmán Cortes 2013, p. 5).

La modelación de equipos y fenómenos es de suma importancia en la Ingeniería Química por las ventajas en la exploración de sistemas, las herramientas de programación por lo general incluyen funciones que permiten realizar en un corto tiempo procesos de cálculo que normalmente demandarían un tiempo largo para ser resueltos o bien realizar operaciones matemáticas repetitivas, acortando así esfuerzos, economizando recursos, presentando los resultados de manera rápida y facilitando el análisis por parte del usuario (Ramírez et al. 2020, p. 7).

Una de las ventajas que posee la simulación dinámica, es que puede servir para implantar y evaluar estrategias de control de procesos

1.3. Justificación del proyecto.

Ante la creciente aparición de recursos tecnológicos cada vez más avanzados, es importante que tanto docentes y estudiantes se abran camino ante nuevas metodologías educativas que permitan fortalecer el aprendizaje.

Para los estudiantes universitarios, en particular aquellos que por su naturaleza necesitan involucrarse en procesos industriales como áreas de Ingeniería Química, es necesario que los centros de educación superior brinden el acceso al equipamiento y a la tecnología necesaria a fin de desarrollar habilidades prácticas que permitan su correcto desenvolvimiento en el ámbito profesional para una industria cada vez más competitiva.

Al momento la carrera de Ingeniería Química no cuenta con equipos para ciertas prácticas, debido a que el empleo de estos implica una fuerte inversión económica, además que no todos los estudiantes pueden acceder a estos equipos por la complejidad que presentan, siendo así la enseñanza teoría en la pizarra y la investigación en fuentes de Internet el único medio de aprendizaje en lo que concierne a la asignatura de control automático de procesos. Por esta razón, los estudiantes no poseen las habilidades necesarias que cumplan con el perfil de formación adecuado que debe tener un ingeniero químico, debido a la falta de práctica en equipos que simulen un proceso industrial que ayuden a cimentar los conocimientos adquiridos de forma teórica.

Es un reto contar con laboratorios que cumplan con las exigencias tecnológicas que demanda una formación académica completa en cuanto a los avances tecnológicos en el campo de la Ingeniería Química donde los estudiantes estén relacionados con los procedimientos modernos y se pueda realizar futuras investigaciones de alto impacto (Barker et al. 2019, p. 2).

Por ello se propone el desarrollo de una herramienta digital que permita la simulación de procesos imposibles de realizar en forma real debido a los altos costos que esto implica y a la infraestructura que se necesita. Los simuladores deben convertirse en una ayuda pedagógica de la educación profesional en ingeniería química, permitiendo que los estudiantes aprendan la teoría no únicamente de forma inductiva, sino también de forma deductiva, al experimentar con el simulador.

Este trabajo de simulación estará basado en la práctica de laboratorio correspondiente a la asignatura "Control automático de Procesos", este simulador podrá ser utilizado para diversas tareas relacionadas con la asignatura, además permitirá variar valores de temperatura, volumen y así comparar los resultados en los diferentes parámetros y condiciones a las que se le someta a la sustancia.

Las principales ventajas de realizar prácticas en una herramienta virtual es brindar a los estudiantes un entorno sencillo y práctico de experimentación, en el cual se logre entender de mejor manera los conocimientos teóricos adquiridos en el salón de clase.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo General*

- Modelar y simular un tanque de mezclado con calentamiento como herramienta didáctica para el control de procesos.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Comparar diferentes softwares a fin de identificar el más idóneo que permita realizar la simulación del proceso.
- Modelar mediante software el control (PID/ON-OFF) de nivel y la temperatura de un tanque de mezclado.
- Desarrollar una interfaz gráfica en base al modelo que sirva como herramienta didáctica para control de procesos.
- Realizar un manual de uso de la herramienta y validar la modelación programada.

1.5. Alcance

En este trabajo se pretende modelar y simular con la ayuda del software MATLAB – SIMULINK un tanque de mezclado con calentamiento, tomando como base el balance de masa y energía del sistema, para posteriormente encontrar las ecuaciones de transferencia y con ellas poder realizar la simulación del comportamiento que tendrá el dispositivo en un rango de tiempo específico, efectuándose el control de nivel y temperatura del equipo. Se emplea la aplicación de Matlab denominada App Designer, la cual permite el diseño y creación de una interfaz didáctica para la asignatura de control automático de procesos.

De esta forma los usuarios tendrán una esta herramienta didáctica donde sea posible la solución de problemas relacionados con la asignatura de control de procesos para mayor comprensión y entendimiento de la materia, logrando un aprendizaje significativo y de razonamiento.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado de Arte

2.1.1. *Tanque de mezcla con calentamiento*

En las últimas décadas, la competencia de los mercados internacionales está imponiendo a las industrias exigencias crecientes de calidad, y a su vez obligándolas a esfuerzos de ahorro de energía, por ello, la complejidad de los procesos de producción aumenta y por lo tanto demanda de un mayor esfuerzo por parte de los ingenieros en el diseño de las unidades de procesamiento, como en el diseño de los sistemas de control, según lo menciona (Moreno Ortiz y Ruiz Horta 2003, p. 5).

El proceso de mezclado es el proceso más antiguo de la humanidad, permiten la combinación de varios materiales diferentes junto con una aportación de energía, lo menciona (Mera Granja y Checa Garzón 2010), en vista de que la mayoría de los alimentos, productos de higiene personal y los medicamentos son el resultado de un proceso de mezcla.

Según (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 254)., dice que el termino agitación y mezcla se les confunde, pero al parecer no son sinónimos, pues en su libro comenta que la mezcla consiste en una distribución aleatoria, dentro y a través de otra sustancia, ya sea que estén en dos o más fases inicialmente separadas.

De acuerdo con (Laín et al. 2011, p. 6)., en su artículo dice que los tanques de almacenamiento se comportan como reactores y pueden implicar riesgos en la salud de los usuarios, ya que se asocian a diversos problemas como decaimiento del desinfectante, contaminación química, formación de subproductos, etc. Todos estos problemas vienen ocasionados por patrones de flujo que afectan los tiempos de retención hidráulica. Aquí también hace mención a los dos tipos ideales de régimen de mezcla, en los cuales el agua puede fluir a través del tanque, ya sea completamente mezclada (CM) o flujo pistón (FP).

Existen dos tipos de tanques, que se clasifican de acuerdo al modo en el que operan las líneas de alimentación y descarga, siendo los siguientes:

- Tanque discontinuo, llamado también Batch o por lotes, su peculiaridad es que mientras se esté desarrollando el proceso, no puede existir el ingreso de ningún tipo de material.
- Tanque discontinuo, el cual se usa generalmente para manejar grandes cantidades de sustancias y cuando la velocidad de reacción aumenta (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 11).

(Rodríguez Umaña 2013, p. 1), dice que para aquellos procesos de producción que requieren del suministro de algún líquido como materia prima, es imprescindible la revisión paulatina del nivel del líquido dentro del depósito, de igual manera el caudal que ingresa y sale del depósito, pues para lograr controlar un proceso lo que recomienda es tratarlo como un sistema continuo en el tiempo, en el cual cada una de sus partes cumpla una función y se interrelacione con las demás.

2.1.2. Modelado

Para dimensionar y calcular las características de un sistema de control se requiere normalmente de desarrollos teóricos y de simulaciones dinámicas que deben basarse en un modelo matemático del proceso a controlar, esto dice Mera Granja (2010).

Considerando que un modelo matemático es una aproximación de un proceso real, dicho modelo debe representar el comportamiento dinámico de las principales variables de interés usualmente llamadas variables de estado.

(Rodríguez Umaña 2013, p. 1) enuncia que todo sistema continuo en el tiempo puede ser representado a través de una función de transferencia, la que se considera una expresión matemática del modelo del sistema formada por el cociente de dos polinomios, expresados en transformada de Laplace. Además, dice que, para el control de nivel de un líquido, requiere de una serie de subsistemas, quienes reciben y entregan las variables del proceso las cuales son suministradas por los sensores, con el fin de conocer su evolución para tomar decisiones de como manipular las variables de control.

Los modelos matemáticos surgen al formular los balances de materia y energía de la planta y pueden ser expresados como un grupo de ecuaciones lineales o no lineales, ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, funciones de transferencia, etc.

La técnica de modelado con bloques funcionales para obtener la función de transferencia del proceso del control de nivel y caudal de un líquido en general, con el fin de modelar su comportamiento usando la herramienta Simulink de Matlab, facilitando así poder manipular las variables involucradas en el proceso y observar su comportamiento frente a las diferentes modificaciones, lo cual nos permitirá elegir las características más convenientes para cualquier proceso que requiera contar con el suministro de un líquido como materia prima (Rodríguez Umaña 2013, p. 2).

El ingeniero que diseña el sistema de control debe asegurarse que las acciones que se realicen tengan su efecto en la variable controlada, es decir, que la acción emprendida repercuta en el valor que se mide; de lo contrario el sistema no controla y puede ocasionar más perjuicio que beneficio, esto enuncia (Smith, Carlos A; Corripio 1991, p. 6).

2.1.3. Equipos virtuales

El empleo de equipos virtuales en la educación trae muchas ventajas, además que ofrece una forma práctica de enseñanza para los estudiantes, tal y como lo menciona (Trentsios, Wolf y Frerich 2020) en su artículo, pues aquí hace mención de los experimentos de laboratorios que se pueden controlar y monitorear desde una forma distante, pues los equipos virtuales ofrecen un sinnúmero de ventajas y una de ellas es que se puede suministrar a una gran cantidad de estudiantes, a diferencia de un equipo físico, que limita el acceso a todos los estudiantes o personas que quieran hacer uso del equipo, lo mismo que pueden llegar a suplantar la necesidad de un equipo físico, aminorando así gastos.

Además según (Nájera, Hugo y Estrada 2007, p. 3). representa una opción creativa, moderna y económica para instituciones universitarias, tanto a distancia como presenciales, que requieran laboratorios dentro de sus procesos de formación.

La necesidad de nuevos productos, así como la cultura del cuidado del medio ambiente, del ahorro y optimización de los recursos energéticos, el uso racionalizado de combustibles, etc., hace necesario que la ingeniería química busque alternativas económicas y factibles para la solución de estos nuevos retos. La simulación de procesos son una herramienta eficaz y efectiva para el análisis, la síntesis y la optimización de proceso lo que ayuda a preponer las diferentes alternativas para resolver estos retos modernos.

Incluir recursos tecnológicos presenta beneficios para los estudiantes, docentes y toda la comunidad educativa, pues en el caso de los docentes, al emplear tecnologías pone a su disposición varios recursos digitales como son los softwares, los mismos que facilitan la participación y apoyan el trabajo en proyectos colaborativos, en el caso de los estudiantes les permite aprender de manera significativa y poder solucionar problemas cotidianos, tener una mejor perspectiva de lo que van a enfrentar en su vida laboral, y a la comunidad educativa le favorece en la formación de redes de aprendizaje, las mismas que logran impactar no solo en los aspectos tecnológicos sino que incide en las personas que aprenden (Pérez Cervantes y Saker Barros 2013, p. 17).

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Proceso de Mezclado

Para que varias operaciones industriales sean exitosas dependerán mucho de la efectividad de la mezcla de fluidos de trabajo. Entendiéndose por mezcla a la distribución aleatoria, dentro y a través una de otra, de dos o más fases inicialmente separadas, un material homogéneo simple no

puede ser mezclado, para que exista el proceso de mezcla se le debe añadir algún otro material (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 259).

2.2.2. *Equipo utilizado en la mezcla de fluidos*

Los tanques mezcladores son equipos donde se realiza una mezcla de componentes, son generalmente de forma cilíndrica y pueden operar por lotes o de forma continua. Están provistos de un eje vertical. La parte superior del tanque puede estar abierta al aire o estar cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. Sin embargo, en muchas situaciones se utiliza un diseño estandarizado (Ortiz Tari 2020). Se diseñan tanques cilíndricos con fondos redondeados con la finalidad de prevenir que los elementos de las esquinas del recipiente queden sin mezclarse, este procedimiento surge de la necesidad de forzar a un fluido por medios mecánicos para que se mezclen con otras sustancias, para estas funciones. Estos equipos consisten en sistemas abiertos o cerrados que tienen un agitador mecánico, el cual está montado en un eje y accionado por un motor. Las dimensiones de un tanque están sujetas a las necesidades de cada industria no existe un tamaño estándar puesto que depende del diseño del proceso lo cual suele ser propio de la industria y de la actividad productiva que se vaya a desarrollar dentro del equipo (Benavides Bravo 2014, p. 44).

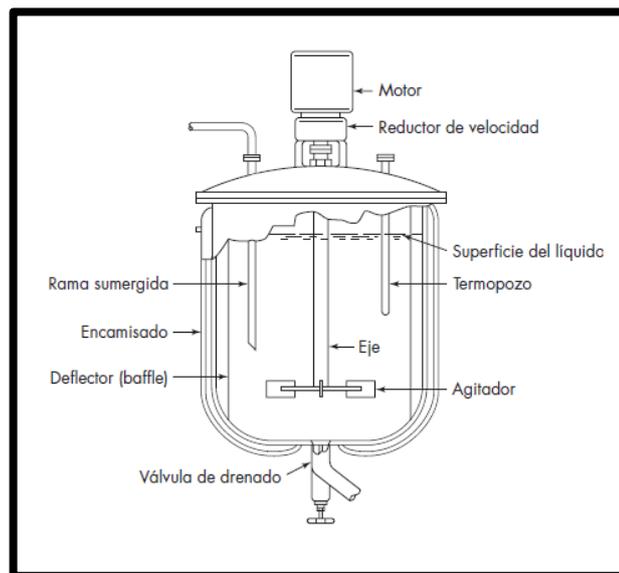


Figura 1-2. Tanque típico del proceso con agitación

Fuente: (McCabe, Smith y Harriott 2007).

2.2.2.1. Tipos de tanques

A los tanques se los puede clasificar de acuerdo al modo de operación de las líneas de alimentación y descarga, como:

- **Tanque Discontinuo:** También llamado Batch o Tanque por lotes, debido a que opera por ciclos. Tiene como característica que las sustancias ingresan al comienzo del proceso, una vez ingresadas son llevadas a condiciones de temperatura o presión requeridas y al alcanzarlas se procede a la descarga del producto, su peculiaridad es que durante la transformación de los componentes no puede existir ingreso de ningún tipo de material (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 6).

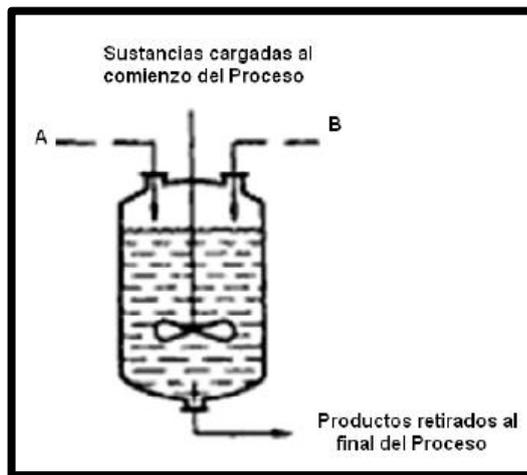


Figura 2-2. Tanque discontinuo

Fuente:(Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 7).

- **Tanque Continuo:** Consiste en un tanque donde se puede alimentar y liberar el producto constantemente. Por lo general el tanque continuo está provisto de un agitador mecánico y un intercambiador de calor. Estos tanques operan normalmente en estado estable y se usan en procesos industriales con agitación para facilitar la mezcla de los productos en su interior y así obtener una mezcla perfecta (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 6).

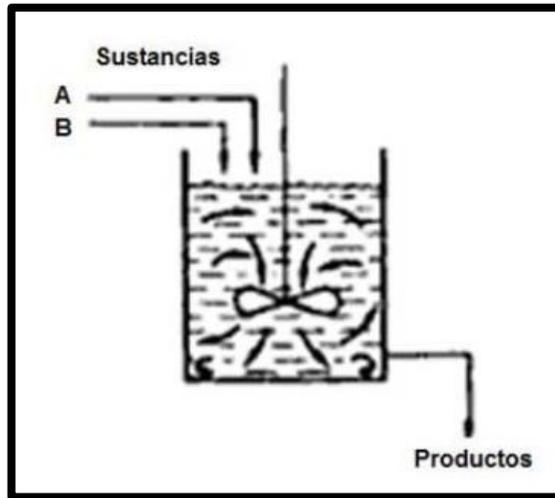


Figura 3-2. Tanque continuo

Fuente:(Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 7).

2.2.2.2. Agitadores

El agitador hace que el líquido circule a través del tanque, van instalados sobre un eje sostenido, el impulsor o rodete se divide en dos clases. Los que generan corrientes paralelas al eje del impulsor se llaman impulsores de flujo axial; y aquellos que generan corrientes en dirección radial o tangencial se llaman impulsores de flujo radial (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 261).

2.2.2.3. Tipos de agitadores

Los tres principales tipos de impulsores para líquidos de baja a moderada viscosidad son las hélices, turbinas e impulsores de alta eficiencia. Para líquidos muy viscosos, los impulsores más adecuados son los de hélice y agitadores de anclaje (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 261).

Hélices (propulsor). Una hélice es un propulsor de flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las palas de la hélice cotan o cizallan vigorosamente el líquido, debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces en tanques muy grandes (McCabe, Smith y Harriott 2007).

Agitadores de Paleta. También conocidos como agitadores de ancla, giran a velocidades bajas sobre un eje ubicado en el centro del tanque, no son buenos mezcladores, pero son útiles para evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transferencia de calor, como en un tanque con chaqueta térmica. Dadas sus características, por lo general trabaja en conjunto con un agitador de paleta de otro tipo, el cual se mueve con velocidad elevada y gira en sentido opuesto (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 9).

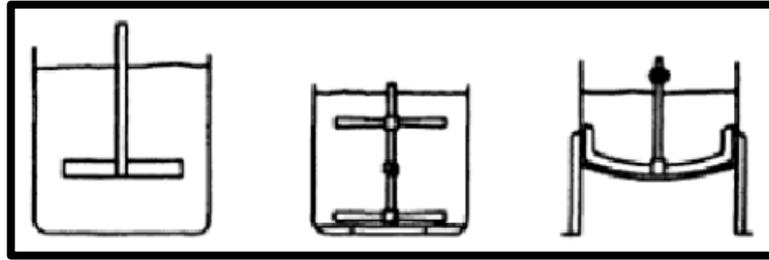


Figura 4-2. Agitador de paletas

Fuente: (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 9).

Turbinas. Existen cuatro tipos de agitadores de turbina. Está la turbina sencilla de palas rectas, que empuja al líquido en forma radial y tangencial, provocando dentro del fluido corrientes que se desplazan hacia fuera, hasta la pared del tanque. En los tanques del proceso, los agitadores industriales típicos son los de paletas que giran a velocidades entre 20 y 150 rpm. Por otro lado, la turbina de disco, con palas múltiples rectas instaladas en un disco horizontal, crea zonas de alta velocidad de corte. Esta turbina es especialmente útil para la dispersión de un gas en un líquido (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 261).

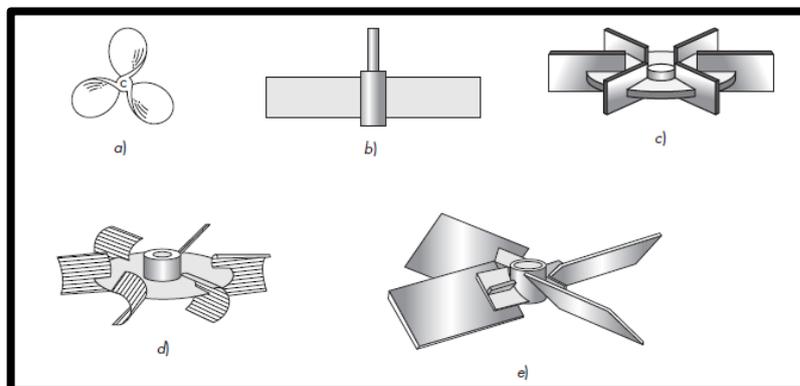


Figura 5-2. Agitadores para líquidos de viscosidad moderada

Fuente: (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 262).

- a) agitador marino de tres palas;
- b) turbina simple de pala recta;
- c) turbina de disco;
- d) agitador de pala cóncava;
- e) turbina de pala inclinada.

Diseño “estándar” de turbina.

El diseñador de un tanque agitado dispone de un gran e inusual número de elecciones sobre el tipo y localización del agitador, las proporciones del tanque, el número y las proporciones de los

deflectores y otros factores. Cada una de estas decisiones afecta la velocidad de circulación del líquido, los patrones de velocidad y el consumo de potencia (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 262).

Impulsores de alta eficiencia. En las turbinas de aspas inclinadas se han desarrollado cambios con la finalidad de lograr proporcionar un flujo axial más uniforme y un mejor mezclado, además de reducir la potencia requerida para determinado flujo (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 263).

Agitadores para líquidos altamente viscosos. Es recomendable los sistemas agitadores de turbina para líquidos muy viscosos. Sin embargo, para viscosidades superiores a $20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, es mucho más efectivo el agitador de cinta helicoidal. El diámetro de la hélice es muy cercano al diámetro interior del tanque, lo que garantiza el movimiento del líquido en todas las direcciones a la pared del tanque aun con materiales muy viscosos. Las cintas helicoidales se han utilizado con éxito con viscosidades de hasta $25\,000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 263).

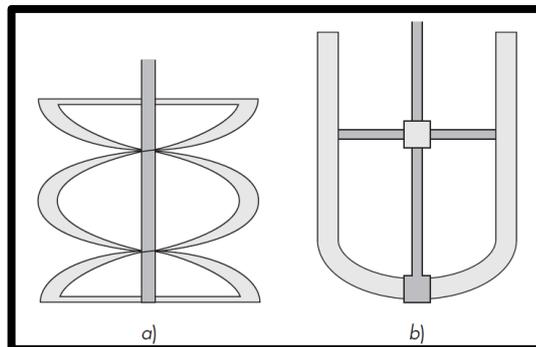


Figura 6-2. Agitadores para líquidos altamente viscosos

Fuente: (McCabe, Smith y Harriott 2007, p. 263).

- a) Agitador de cinta de doble trayectoria helicoidal
- b) Agitador de ancla

2.2.3. *Propiedades del fluido*

En ingeniería química se estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento, a eso se lo conoce como “Mecánica de los Fluidos”. En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad importante, mientras que, en el flujo de fluidos, la densidad y la viscosidad son las que predominan. Cuando tiene lugar una compresibilidad apreciable es necesario considerar los principios de la termodinámica. Al intervenir presiones manométricas negativas, la tensión de vapor adquiere importancia y la tensión superficial afecta a la estática o cinemática de los fluidos cuando las secciones de paso son pequeñas (Osoria Claro 2018, p. 14).

Quienes se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen son los fluidos, estos pueden dividirse en líquidos y gases, cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma. Los líquidos son prácticamente incompresibles, ocupan un volumen definido y tiene superficies libres (Osoria Claro 2018, p. 14).

2.2.4. Intercambiadores de calor

La mayoría de los procesos industriales utilizan intercambiadores de calor en operaciones tales como: esterilización, refrigeración, pasteurización, precalentamiento, entre otros. También tienen varias aplicaciones domésticas, radiadores de automóviles, evaporadores, condensadores, termostatos, etc. Estos son ampliamente utilizados en la industria manufacturera ya que son de vital importancia para incrementar la eficiencia de todo el proceso de producción. (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 13).

2.2.4.1. Definición de Intercambiador de calor.

Un intercambiador de calor es un dispositivo creado para transferir energía térmica entre dos o más fluidos en contacto directo o separados por una barrera. Por lo general, la transferencia de calor sucede entre dos fluidos que están a diferente temperatura y en contacto térmico (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 14).

Un intercambiador de calor consiste en un núcleo o matriz que contiene la superficie de transferencia de calor y elementos que distribuyen el fluido tales como tanques, tubos de entrada y salida, etc. El área de transferencia de calor se encuentra en contacto directo con fluidos a través de los cuales el calor se transfiere por conducción (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 15).

2.2.4.2. Mecanismos de transmisión de calor.

Calor es energía que fluye desde un objeto a otro debido a la diferencia de temperatura entre ellos. La dirección natural del flujo de calor es siempre desde el objeto de temperatura más alta al objeto de temperatura más baja. Existen tres mecanismos básicos por los que el calor fluye espontáneamente desde una región de temperatura alta a otra de temperatura baja: conducción, convección y radiación (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 13).

Transmisión de calor por Conducción: Se refiere a la transmisión de calor de un cuerpo por contacto directo. Para que se produzca la conducción se necesita un medio material continuo y

no vacío, se da generalmente en los sólidos y por lo tanto el caudal de transmisión depende de la naturaleza del material y las diferencias de temperatura (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 14).

Transmisión de calor por Convección: La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural, producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire con un ventilador. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio (Quispe Ruiz 2013, p. 6).

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado *ley de enfriamiento de Newton*, es la siguiente:

$$H = h A (T_A - T) \quad (1)$$

Donde h se llama coeficiente de convección, en $W/(m^2K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , como se muestra en el esquema de la Figura 7-2.

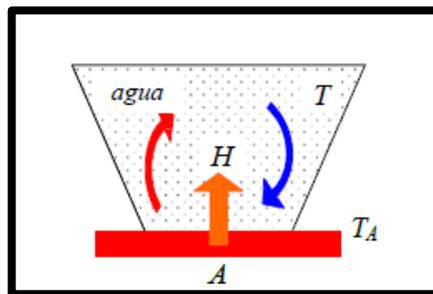


Figura 7-2. Proceso de convección

Fuente: (Quispe Ruiz 2013, p. 7).

El flujo de calor por convección es positivo ($H > 0$), si el calor se transfiere desde la superficie del área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$) (Quispe Ruiz 2013, p. 7).

Tabla 1-2. Valores típicos de coeficiente de convección.

Proceso	$h(W/m^2K)$
Convección libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000

Fuente: (Quispe Ruiz 2013, p. 7).

Transmisión de calor por Radiación: La transmisión de calor por radiación se realiza por medio de ondas electromagnéticas. En el caso de que estas se transmitan en el vacío no se transforma en calor o en otra forma de energía, caso contrario, al incidir en un medio material, se transforma en calor o energía que podría producir reacciones. La radiación puede ser transmitida, reflejada o absorbida (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 14).

2.2.4.3. Tipos de Intercambiador de Calor.

Los **intercambiadores de calor** pueden clasificarse en función de criterios como la forma de contacto entre los fluidos, número y características de éstos, tipo de construcción, servicio etc. Unos y otros se hallan en sistemas mecánicos, químicos, nucleares, de producción energética, climatización, **calefacción** o **refrigeración** y, en general, en mecanismos donde se precisa transferir calor entre dos fluidos (TSolucionaria 2020, p. 2).

Intercambiador de calor directo, donde ambos medios están en contacto directo entre sí. Se da por sentado que los medios no se mezclan.

Intercambiador de calor indirecto, donde ambos medios están separados por una pared a través de la cual se transfiere el calor (Alfa Laval 2015, p. 3).

2.2.4.4. Chaqueta de vapor

En el presente proyecto, para modelar el comportamiento dinámico del proceso, se va a utilizar una chaqueta térmica que cubre las paredes laterales y la base interior de tanque. Este tipo de equipos a vapor utiliza un sistema de calentamiento muy frecuente en la industria alimenticia, consiste fundamentalmente en una cámara de calentamiento conocida como camisa o chaqueta de vapor, que abraza el recipiente donde se coloca el producto que se desea calentar (Chacaguasay Lobato y Picho Barrionuevo 2016, p. 8).

2.2.5. Control de procesos

El control de procesos tiene como finalidad mantener las variables del proceso como temperatura presión, flujo, nivel, etc. en un valor determinado. Los procesos tienen un comportamiento dinámico donde permanentemente ocurren cambios y al no tomar acciones apropiadas como respuesta a dichos cambios las variables del proceso no cumplirán con las condiciones de diseño (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 20).

El objetivo del sistema de control automático de proceso es utilizar la variable manipulada para mantener a la variable controlada en el punto de control a pesar de las perturbaciones (Smith, Carlos A; Corripio 1991, p. 20).

Para comprender de mejor manera el control de procesos es necesario conocer ciertas definiciones.

Planta: puede ser el equipo, parte de equipo o grupo de elementos de una máquina funcionando conjuntamente, cuyo objetivo es realizar una operación determinada.

Sistema: es una combinación de elementos organizados y relacionados que actúan en conjunto para lograr un objetivo determinado, los sistemas reciben entradas y proveen salidas (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 21).

Un sistema de control está formado por cuatro componentes básicos:

1. *Sensor:* conocido como elemento primario.
2. *Transmisor:* llamado elemento secundario.
3. *Controlador:* es el “cerebro” del sistema del control.
4. *Elemento final de Control:* dispositivo encargado de controlar directamente las variables manipuladas dentro del lazo de control.

Para ejecutar el control automático de un proceso se debe diseñar e implementar un **sistema de control**, como el que se muestra en la Figura 8-2. con sus respectivos componentes básicos.

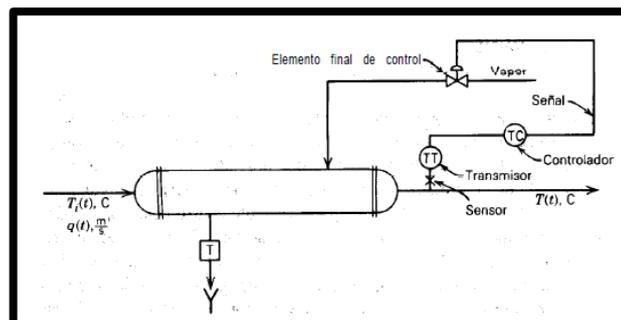


Figura 8-2. Sistema de control de un intercambiador de calor

Fuente: (Smith, Carlos A; Corripio 1991, p. 19).

Se realizan tres operaciones básicas en todo el sistema de control, como:

1. *Medición:* se hace comúnmente a través de la combinación de sensor y transmisor, de la variable a ser controlada
2. *Decisión:* se basa en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable controlada en el valor deseado.
3. *Acción:* es el resultado de la decisión del controlador, generalmente está realizada por el elemento final de control (actuador).

En un intercambiado de calor las operaciones básicas de control funcionan de la siguiente manera: primero se realiza la medición de la temperatura de salida de la corriente del proceso, a través de un sensor, este se conecta físicamente al *transmisor*, el cual capta la salida del sensor y la convierte en una señal lo suficientemente intensa para transmitirla *al controlador*, quien a su vez recibe la señal, que está en relación con la temperatura, la compara con el valor que se desea y dependiendo del resultado de la comparación, decide qué hacer para mantener la temperatura en el valor deseado y basándose en la decisión, el controlador envía otra señal al *elemento final de control*, quien es responsable del manejo del flujo de vapor (Smith, Carlos A; Corripio 1991, p. 18).

La medición, decisión y acción son obligatorias para todo sistema de control. Respecto a la medición se toma una decisión y en base en la decisión se ejecuta una acción. La acción realizada debe tener un efecto sobre la variable controlada, por lo tanto ésta repercute en el valor medido, caso contrario no es posible controlar el sistema (Smith, Carlos A; Corripio 1991, p. 19).

En el control de procesos se emplean ciertos instrumentos que tienen su propia terminología, que definen las características de la instrumentación utilizada siendo los siguientes:

Rango: también llamado campo de medida, es el conjunto de valores comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la variable medida (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 21).

Alcance: es la diferencia entre valor superior e inferior del campo de medida del instrumento.

Error: es el valor resultante de la diferencia entre el valor real de la variable y el valor leído por el instrumento. **Punto de referencia:** también conocido como “set point”, es la variable que fija el valor de la variable controlada esta entra al controlador (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 21).

2.2.5.1. *Sistemas de control.*

El sistema de control son el conjunto de elementos interconectados entre sí que actúan para lograr un objetivo de control, cuya finalidad es conseguir mediante la manipulación de las variables de control un dominio sobre las variables de salida de modo que estas alcancen los valores de referencia (Medina 2020, p. 3).

Los sistemas de control pueden ser clasificados como sistemas de control en lazo abierto y sistemas de control en lazo cerrado, según sea su diseño y su funcionalidad requerida.

Sistema de control en lazo abierto

Es el tipo de sistema de control en el cual la salida no afecta la acción de control, en otras palabras no mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada, por lo que no requiere de retroalimentación de la salida para que el control a gestionar funcione correctamente. La exactitud de un sistema de lazo abierto depende de la calibración del elemento de control y de la

ausencia de perturbaciones externas ya que ante la presencia de estas el sistema de control no realiza la tarea deseada (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 67).

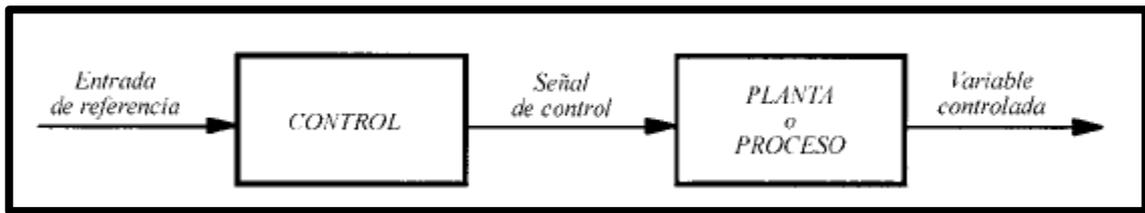


Figura 9-2. Sistema de lazo abierto

Fuente: (Antoni et al. 2005, p. 200).

Este sistema de control consta de dos componentes, el controlador y el proceso controlado, comúnmente se usa en dispositivos con control secuencial, donde no existen regulación de variables.

Sistema de control en lazo cerrado

También llamado sistema de control realimentado, son aquellos en los que la variable controlada tiene efecto directo sobre la variable de control. La acción de control se calcula en función del error medido entre la variable controlada y el valor de referencia deseado, estos sistemas de control se crearon con la intención de minimizar los errores, a fin de conseguir los mejores resultados (Medina 2020, p. 2).

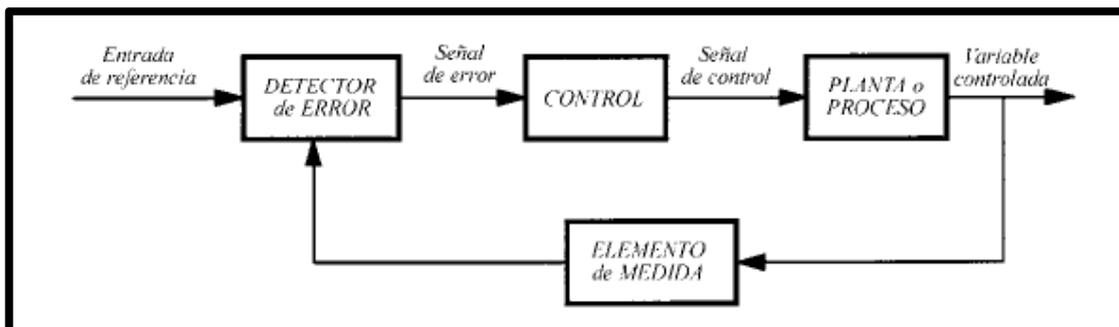


Figura 10-2. Sistema de lazo cerrado

Fuente: (Antoni et al. 2005, p. 201).

La mayoría de los sistemas de control que se desarrollan actualmente son en lazo cerrado, estos pueden ser de dos tipos:

Manuales: donde el control y supervisión son realizados por un operador

Automático: su control se lo realiza mediante dispositivos electrónicos (Antoni et al. 2005, p. 201).

2.2.5.2. Variables que intervienen en el control de procesos.

En un proceso existen tres tipos de variables, estas son:

Variable controlada, ésta es la variable que se mide y se controla dentro de algún valor deseado. Generalmente esta variable es la salida del sistema y una característica del medio controlado. En este proyecto las variables controladas son el nivel y la temperatura (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 23).

Variable manipulada es la variable de la planta empleada para mantener a la variable controlada en el punto de control deseado (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 23).

Variable de perturbación o trastorno; es la variable que afecta a la variable controlada, haciendo que ésta se desvíe del objetivo de control propuesto, en la mayoría de los procesos existe una cantidad de perturbaciones diferentes que no puede ser modificada por la variable manipulada (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 23).

Es importante comprender que en la industria de procesos, estas perturbaciones son la causa más común de que se requiera el control automático de proceso; si no hubiera alteraciones prevalecerían las condiciones de operación del diseño y no se necesitaría supervisar continuamente el proceso (Smith, Carlos A; Corripio 1991, p. 20).

2.2.5.3. Elementos para el control de procesos.

La automatización industrial hace uso de múltiples instrumentos de medición y control, los cuales ayudan a asegurar el control de procesos. Gracias a la instrumentación, es posible implementar seguridad a elementos complejos como: Cargas o tensiones eléctricas, temperaturas en equipos, velocidad y peso en procesos, presión y fuerza (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 24).

Existen muchos instrumentos de control y medición que son utilizados en la industria como, por ejemplo:

Sensores

Un sensor es un dispositivo que recibe energía de un sistema, por ejemplo, una cantidad física como: luz, movimiento, calor, presión, energía eléctrica y magnética o cualquier otro tipo de energía para obtener como respuesta una señal eléctrica. Generalmente transforman la señal que reciben en una eléctrica o neumática, que es más sencilla de medir o transmitir. Los sensores pueden dividirse en pasivo, activo y digital (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 24).

Transmisores

Este instrumento tiene una tarea muy compleja, debe captar la variable medida a través de un sensor y convertirla en una señal estándar lo suficientemente fuerte para poder transmitirla. Las

señales de salida del transmisor pueden ser eléctricas, digitales, neumáticas, hidráulicas y telemétricas (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 26).

Controladores

Son los responsables de regular la variable controlada y la comparan con un valor predeterminado. De inmediato ajustan la salida de acuerdo con la diferencia o resultado de la comparación. Con esta comparación se realizan las correspondientes acciones correctivas (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 26).

Convertidores

Estos dispositivos están diseñados para cambiar de una señal estándar a otro tipo de señal. Los convertidores pueden ser de dos tipos:

Tipo P/I para convertir señales de entrada neumática a señales eléctricas

Tipo I/P para convertir señales eléctricas en neumáticas

2.2.6. Elementos finales de control

Este es un dispositivo que controla directamente los valores de la variable manipulada en un lazo de control, comúnmente recibe la señal del controlador y modifica el agente de control. El elemento final de control puede ser una válvula de control, variadores de frecuencia y motores eléctricos (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 28).

El elemento final de control consta de dos partes:

- **Actuador o motor:** son mecanismos capaces de generar una fuerza en respuesta a una señal de entrada proveniente del controlador, activa el movimiento del vástago y por consecuencia el obturador, puede ser eléctrica, mecánica, neumática o hidráulica, siendo los neumáticos y eléctricos los más empleados debido a que son los más simples y de acción rápida (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 29).
- **El cuerpo:** es un dispositivo que sirve para ajustar la variable manipulada, está formado por un tapón, que es el que se encarga del control del paso del fluido (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 29).

La válvula de control es el elemento final de control más utilizado a nivel industrial, este dispositivo varía el flujo de materia o energía dentro de un proceso, ajustando una abertura a través de la cual fluye la materia (Villajulca 2010, p. 2).

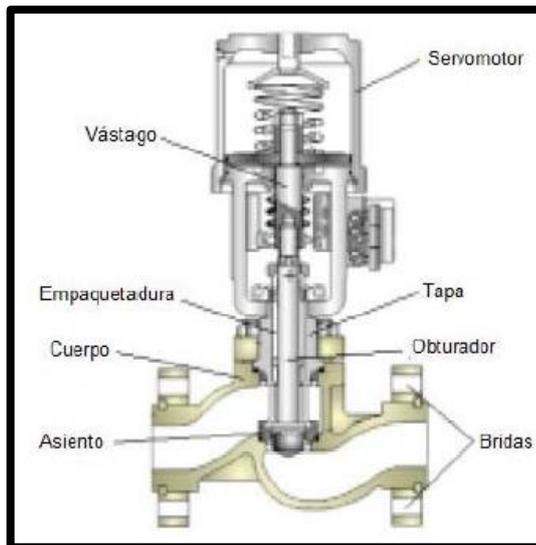


Figura 11-2. Partes de una válvula de control

Fuente: (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 29).

Estos dispositivos de control pueden ser manuales o automáticos, para que la válvula se comporte de manera adecuada, debe ser suficientemente rápida para que pueda corregir las perturbaciones presentes en el sistema (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 28).

Existen distintos tipos de válvulas que se emplean en los procesos industriales controlados automáticamente. El correcto funcionamiento de las plantas se basa en la adecuada selección del tipo de válvula y su dimensionamiento. Es importante elegir válvulas de tamaño correcto ya que una válvula demasiado grande puede aumentar los requerimientos de mantenimiento y son difíciles de controlar, en cambio una válvula de tamaño reducido produciría una mala operación en el lazo de control y una pérdida en la producción (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 37).

Un aspecto importante en la selección adecuada de una válvula son sus características que relacionan el flujo a través de la válvula con su posición.

El obturador es el que define el comportamiento de la válvula y tiene las siguientes características:

Apertura rápida: El caudal es máximo cuando el recorrido del vástago de la válvula es mínimo. Se utiliza principalmente para servicio on-off o en válvulas auto reguladas, donde el flujo debe establecerse rápidamente cuando la válvula comienza abrirse. Incluso son útiles en sistemas con caídas constantes de presión (Villajulca 2010, p. 3).

Apertura Lineal: esta produce un flujo directamente proporcional a la apertura de válvula. Esta relación produce una pendiente constante, de tal modo que cada cambio incremental de la posición del tapón produce un cambio similar en el flujo de válvula, si la caída de presión es constante. Se usan generalmente en control de nivel de líquidos y en aplicaciones en donde se

requiere una ganancia constante y cuando la máxima capacidad de la válvula debe obtenerse de manera rápida (Villajulca 2010, p. 3).

Igual Porcentaje: El caudal es proporcional al recorrido de la válvula y al caudal de paso que existía antes del incremento del recorrido, es decir, cuando el flujo es pequeño, el cambio en el mismo (para un cambio incremental) es pequeño; cuando el flujo es grande, el cambio es siempre proporcional a la cantidad que fluye antes del cambio. Se usan en aplicaciones de control de presión en donde un pequeño porcentaje de la caída del sistema permite el control de la válvula, también se usa en procesos rápidos o en los cuales la dinámica del sistema no es bien conocida (Villajulca 2010, p. 3).

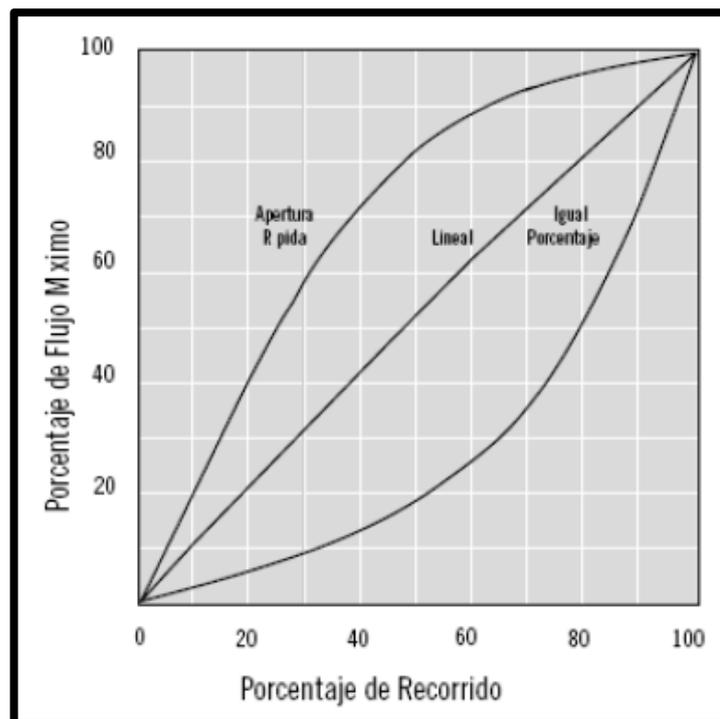


Figura 12-2. Sistema de control de un intercambiador de calor

Fuente: (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 39).

2.2.7. Controladores Industriales

2.2.7.1. Tipos de controladores

El control es el elemento encargado de “procesar” la señal de error y “generar” una señal encargada de disminuir el valor de la señal mencionada con el objetivo de alcanzar la máxima precisión posible del sistema de control. El procedimiento mediante el cual el controlador

genera la señal de control se llama acción de control (Antoni et al. 2005, p. 216). Los controladores típicos en los sistemas de control son:

- Control proporcional (P)
- Control proporcional derivativo (PD)
- Control proporcional integral (PI)
- Control proporcional integral derivativo (PID)

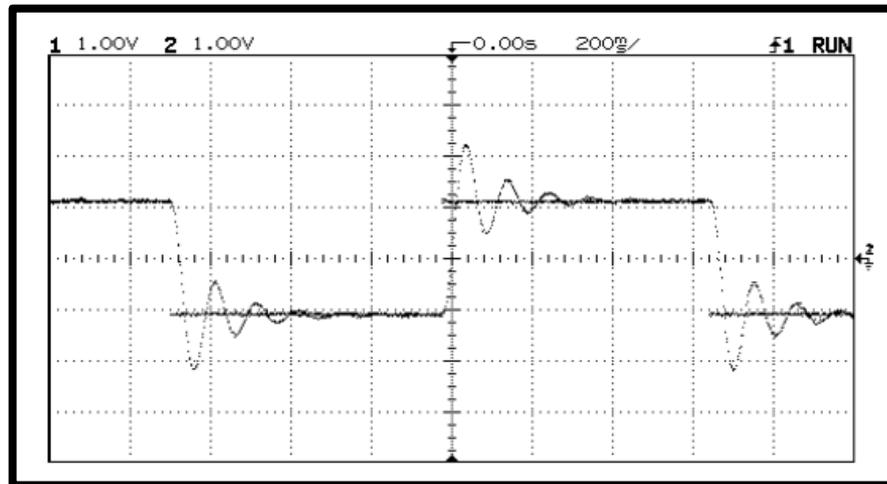


Figura 13-2. Señal de con control PID

Fuente: (Antoni et al. 2005, p. 216).

Control Proporcional

El controlador proporcional crea una señal de control a la salida que es igual a la señal de error. Es decir, $m(t) = k \cdot e(t)$

Donde k: sensibilidad proporcional o ganancia proporcional

Cuanto más grande es la ganancia del control proporcional mayor es la señal de control generada para un mismo valor de señal de error, en conclusión, el aumento de la ganancia del control proporcional permite reducir el error en estado estacionario (Antoni et al. 2005, p. 218).

Tiene que observarse la necesidad de tener una señal de error diferente de cero para obtener una señal de control diferente de cero, es decir:

$$e(t) = 0 \rightarrow m(t) = 0; e(t) \neq 0 \rightarrow m(t) \neq 0$$

Un error estacionario no puede ser eliminado por el control proporcional, ya que para poder eliminar este tipo de error es necesario que la función de transferencia en lazo abierto contenga algún elemento integrador de modo que el control proporcional no añada al sistema ningún elemento integrador (Antoni et al. 2005, p. 218).

En sistemas donde existe una diferencia entre el grado del denominador y el numerador de su función de transferencia mayor que dos, que son en su gran mayoría, el aumento de la ganancia

del control proporcional ocasiona un empeoramiento de la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado (Antoni et al. 2005, p. 218), por ejemplo:

- Aumento del sobre impulso
- Disminución del tiempo de pico.
- Aumento del tiempo de establecimiento.

Es decir, puede llevarse al sistema a una inestabilidad, si existe un aumento excesivo de la ganancia del control proporcional.

Control Proporcional Derivativo

Acción de control derivativa: Genera una señal de control proporcional derivativa de la señal de error

$$m(t) = kd * \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

La acción de control derivativa añade sensibilidad al sistema y tiene un efecto de aumento de estabilidad relativa, lo que permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error sea demasiado grande. Sin embargo, el control derivativo no puede ser utilizado en solitario porque es incapaz de responder a una señal de error constante, con un control derivativo un sistema no alcanzaría nunca el estado estacionario y siempre tiene que utilizarse en combinación con otros controles por su influencia estabilizadora mediante la acción de anticipación (Antoni et al. 2005, p. 219).

La acción de control se representa de la siguiente manera:

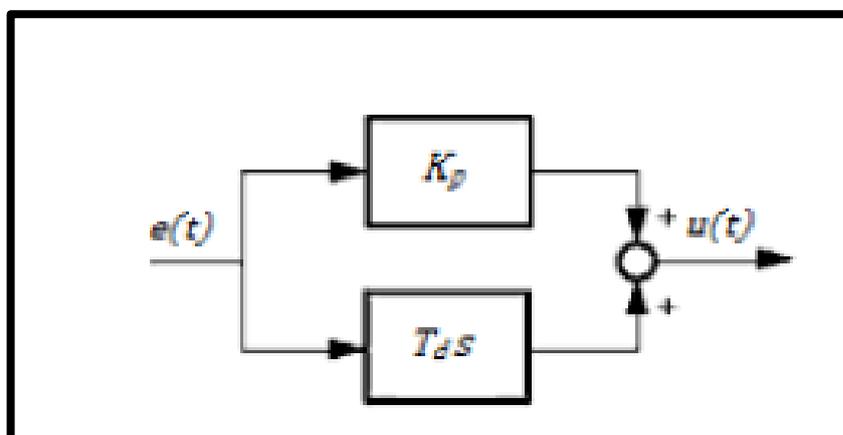


Figura 14-2. Diagrama de bloques del control Proporcional Derivativo

Fuente: (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 71).

Control proporcional derivativo, proporciona en el sistema una mayor estabilidad relativa que se traduce en una respuesta transitoria con menor sobre impulso, sin embargo, cuando la influencia del control proporcional derivativo es muy grande, le sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta (Antoni et al. 2005, p. 219).

Control proporcional integral (PI)

Este control combina las ventajas de la acción proporcional y de la acción integral, la principal característica de este tipo de control es que la acción correctora se efectúa mediante la integral del error, mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que añade la introducción de la acción integral, este controlador es apropiado para los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden (Antoni et al. 2005, p. 219).

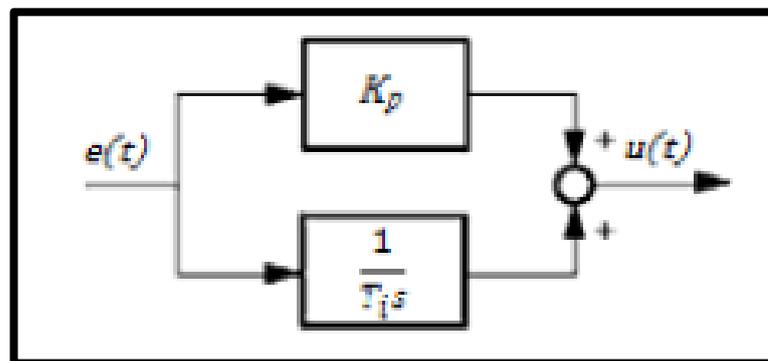


Figura 15-2. Diagrama de bloques de Control Proporcional Integral

Fuente: (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 71).

Control Proporcional Integral Derivativo (PID).

El error en estado estacionario puede ser eliminado a través de la acción del control PID a fin de conseguir una buena estabilidad relativa del sistema de control, lo que implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y de máximo sobre impulso pequeños (Antoni et al. 2005, p. 220).

La acción proporcional actúa sobre el error presente, la acción integral actúa sobre el promedio de los errores pasados y la acción derivativa se interpreta como una predicción de los futuros errores basados en extrapolación lineal. La calibración este tipo de control consiste en encontrar una combinación de K_p , K_i Y K_d que optimice la respuesta del proceso a una perturbación, se debe tener mucho cuidado al ajustar estos parámetros, porque cualquier exceso en los valores puede deteriorar la respuesta del sistema en lugar de mejorarla (Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 72).

2.2.8. Simulación

La simulación es una herramienta importante para la ayuda de toma de decisiones en el diseño, operación y optimización de procesos químicos.

En ingeniería química es la solución de las ecuaciones de balance de materia y energía para procesos químicos en estado estacionario o dinámico. Así como del dimensionamiento y la obtención de costos de los equipos involucrados en un proceso. Por último, el efectuar la evaluación preliminar del proceso (Elena, 2017).

Es sabido que en la simulación convergen diversas corrientes del saber, como es el análisis de los métodos numéricos para la simulación de ecuaciones tanto algebraicas como diferenciales, el modelado de proceso, operaciones unitarias y fenómenos de transporte, estimación de propiedades fisicoquímicas, etc. (Elena, 2017).

2.2.9. Softwares de simulación

En cuanto a simuladores de procesos comerciales existe una gran variedad, algunos de las cuales son poderosas herramientas de cálculo, con inmensos bancos de datos que contienen las propiedades físicas de miles de compuestos y sustancias químicas, selección de modelos termodinámicos, cálculos de equipos (teórico y real), análisis de costo, estado de agregación y condiciones de operación, que le dan al simulador la ventaja de una gran versatilidad (Ramírez et al. 2020, p. 6)

FREECAD

Aplicación de diseño asistido por computadora en tres dimensiones. Utiliza técnicas de modelado paramétrico y está diseñado como un software modular, donde se pueden agregar en forma sencilla más funcionalidades (módulos) (Milla, 2016). Compatible con Windows, Linux/Unix y Mac OSX, de licencia libre.

HYSYS

Es un programa interactivo que se puede utilizar para solucionar toda clase de problemas relacionados con procesos químicos, está enfocado a la ingeniería de procesos y la simulación. Este simulador cuenta con una interfaz amigable para el usuario, además de permitir la utilización de operadores lógicos y herramientas que facilitan la simulación de diversos procesos. Es un simulador bidireccional, ya que el flujo de información va en dos direcciones de esta forma, puede calcular las condiciones de una corriente de entrada a una operación a partir de las correspondientes a la corriente de salida sin necesidad de cálculos iterativos. Posee un entorno de simulación modular tanto para estado estacionario como para régimen dinámico. Es un software para la simulación de plantas petroquímicas y afines (Ramírez et al. 2020, p. 168).

ASPEN PLUS

(ASPEN), Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos es un programa básicamente de simulación de procesos químicos, donde además de simulaciones de diagramas de flujo, se puede realizar: estimación de propiedades de compuestos, análisis de sensibilidad de variables de proceso, obtener especificaciones de diseño de proceso, y, síntesis y análisis de procesos químicos, entre otras tareas del diseño de procesos y equipos. Compatible con Windows XP y Windows 7. Es necesario 1 GB RAM en XP o 2 GB RAM en Windows 7, y un espacio en disco de 5GB (Milla, 2016).

SCILAB

Por último, existe un software llamado Scilab, también orientado al cálculo científico. Es un lenguaje de programación de alto nivel con acceso a cientos de funciones matemáticas, estructuras de datos avanzadas y funciones gráficas en 2D y 3D (Scodelaro, 2012).

El programa está concebido como un software abierto, es decir, que el usuario puede ampliarlo añadiendo sus propias primitivas o modificando las existentes. Este software tiene una extraordinaria versatilidad y capacidad para resolver problemas de matemática aplicada, física, ingeniería, procesamiento de señales y otras muchas aplicaciones. Su base la constituye un sofisticado intérprete formado por cientos de rutinas de cálculo matricial, análisis numérico y visualización gráfica. (Colombia, 2012).

MATLAB

La plataforma MATLAB está optimizado para la solución de problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje MATLAB basado en la matriz, es la forma natural de la mayor parte del mundo para expresar matemática computacional. Gráficos integrados hacen que sea fácil de visualizar y obtener información a partir de datos. Una vasta biblioteca de cajas de herramientas prediseñados le permite comenzar de inmediato con algoritmos esenciales a su dominio. El entorno de escritorio invita a la experimentación, la exploración y el descubrimiento. Estas herramientas y capacidades de MATLAB están rigurosamente probados y diseñados para trabajar juntos. Se utiliza para el aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión por ordenador, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica, entre otros. (Buelvas y Alvear 2012, p. 218).

SIMULINK

Simulink es posible entender y analizar sistemas complejos a través de sistemas complejos mediante la simulación de diagramas de bloques, esta viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos, ofrece un entorno de programación visual, que funciona sobre el medio de programación Matlab (Buelvas y Alvear 2012, p. 218).

2.3. Marco Legal

2.3.1. Software en Ecuador

Tabla 2-2. Marco Legal del uso de Software en Ecuador

NORMATIVA	OBSERVACIÓN
<p>Código orgánico de la economía social de los conocimientos creatividad e Innovación No. 899 (2016)</p>	<p>Tiene como uno de sus fines incentivar la desagregación y transferencia tecnológica a través de mecanismos que permitan la generación de investigación desarrollo de tecnología e Innovación</p>
<p>Código orgánico de la economía social de los conocimientos creatividad e Innovación (2016)</p>	<p style="text-align: center;">Apartado Segundo</p> <p style="text-align: center;">De las tecnologías libres y formatos abiertos</p> <p>Artículo 142.- Tecnologías libres: Se entiende por software de código abierto al software en cuya licencia el titular garantiza al usuario el acceso al código fuente y lo faculta a usar dicho software con cualquier propósito. Especialmente otorga a los usuarios, entre otras, las siguientes libertades esenciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La libertad de ejecutar el software para cualquier propósito; • La libertad de estudiar cómo funciona el software, y modificarlo para adaptarlo a cualquier necesidad para ello; • La libertad de redistribuir copias; y, • La libertad de distribuir copias de sus versiones modificadas a terceros. <p>Artículo 151.- Libre elección de software: Los usuarios tienen derecho a la libre elección del software en dispositivos que admitan más de un sistema operativo.</p>
<p>Plan Nacional del Buen Vivir (PNBV)</p>	<p>Como parte de la Planificación Nacional, el PNBV contempla las “Tecnologías, innovación y conocimiento” como parte de sus estrategias, y además plantea 12 objetivos con sus políticas que sirven de guía. El Objetivo 10, se refiere a “Impulsar la transformación de la matriz productiva” y su política 10.3 reviste especial importancia que puede aplicarse en la</p>

	generación de una industria local de software libre, con ayuda de inversión pública
Plan Nacional de Gobierno electrónico (PNGE)	<p>“Principio de adecuación tecnológica: Garantiza que las administraciones elegirán las tecnologías más adecuadas para satisfacer sus necesidades, por lo que se recomienda el uso de estándares abiertos y de software libre en razón de la seguridad, sostenibilidad a largo plazo y la socialización del conocimiento.”</p>

Fuente: (Silva 2015; Asamblea Nacional del Ecuador 2016; Asamblea Nacional 2015; Correa 2017).

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo busca crear una herramienta didáctica que simule y controle un tanque de mezcla con calentamiento, basado en su modelo matemático, en el que sea posible una interacción del usuario a través de la modificación de los parámetros y variables que se empleen en el sistema, de tal modo que sirva para observar, analizar y comprender el comportamiento del equipo bajo ciertas condiciones de operación.

3.1. Etapas de la metodología

Partiendo de una amplia revisión bibliográfica realizada en el capítulo anterior, la metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo de titulación se divide en las siguientes etapas:

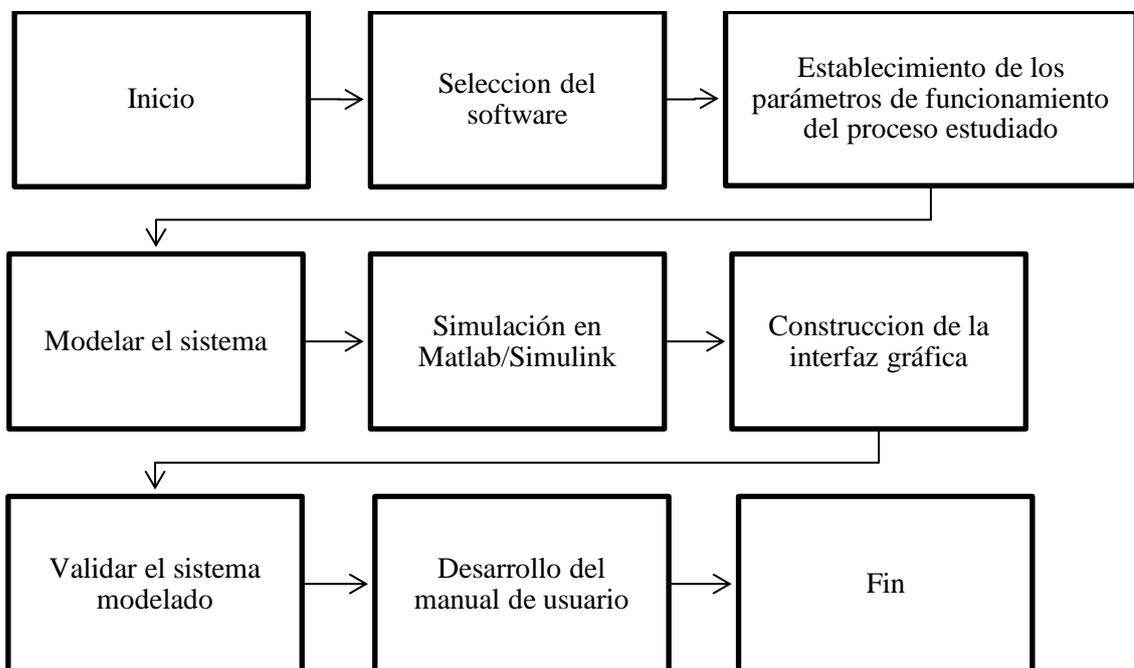


Gráfico 1-3. Metodología de desarrollo del trabajo de titulación

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

El presente trabajo adoptará un enfoque aplicativo, pues lo que se pretende es representar el funcionamiento de los controles PID/ON-OFF a través de un tanque de mezclado con calentamiento capaz de controlar las perturbaciones que se presenten durante el proceso.

Toda la información recopilada para la literatura y desarrollo del presente proyecto proviene de:

Fuente Primaria:

Libro de Corripio

Texto de simulación con Matlab de un reactor tipo tanque agitado de Remberto Jaime cuadro Alvear y Teddy Cañavera Buelvas

Fuente Secundaria:

- Artículos científicos publicados en revistas indexadas y no indexadas, con la temática acorde al tema desarrollado en este trabajo, principalmente de grado Q1 y Q2.
- Libros relacionados con el tema de este trabajo
- Trabajos de titulación que traten con los temas de este proyecto.
- Bibliotecas digitales asociadas a la ESPOCH.
- Páginas de internet con información relacionada a los temas expuestos en este trabajo.
- Manuales de funcionamiento del software a emplear en el desarrollo del trabajo

3.2. Selección de software

En base a las características mostradas en el Capítulo II se selecciona el software Matlab R2020a, como herramienta para el desarrollo de este trabajo por proporcionar el instrumento denominado Simulink, mismo que sirve para la elaboración de los diagramas de bloques de un modelo matemático y facilita la interpretación del proceso, además ofrece la herramienta App Designer la cual contiene todos los elementos básicos que se necesitan para la construcción y desarrollo de la interfaz gráfica, siendo didáctica y no utiliza un lenguaje de programación muy complejo. Posee una librería con bloques de operaciones matemáticas básicas, conectores, elementos de simulación y control.

3.3. Establecimiento de los parámetros de funcionamiento

Para el desarrollo de este trabajo de titulación se tomó como referencia varios trabajos con contenido similar, uno de ellos es el trabajo de titulación denominado *Modelamiento, simulación y diseño de controladores para un tanque continuamente agitado presurizado con intercambio de calor*, elaborado por Cristina Mena Granja y Clara Janet Checa Garzón (2010) en el laboratorio de control automático de procesos de la Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.

3.3.1. Generalidades del proceso

El proceso simulado consta de dos sistemas de control, uno para el control de nivel y otro para el control de temperatura dentro del mismo proceso.

Para el control de nivel se tiene 2 válvulas, una de alimentación y otra de desfogue o salida del fluido de trabajo, la línea de alimentación está ubicada en la parte superior del tanque de mezcla, esta línea consta de una válvula de control la misma que será responsable del paso del fluido a través de ella, hasta alcanzar la altura de set Point previamente establecida por el usuario

Una vez alcanzada la altura deseada se procede a calentar el fluido de trabajo, el proceso para calentar el sistema se realiza a través de una chaqueta de vapor, la cual consta de una válvula de control en la línea de alimentación misma que permitirá el paso del vapor necesario para calentar el fluido de trabajo hasta alcanzar la temperatura que el usuario considere conveniente.

Las condiciones iniciales y parámetros de operación del tanque se obtuvieron de manera que se logre un buen modelo y un sistema robusto que se aproxime al comportamiento real.

Tabla 1-3. Parámetros estructurales del sistema para el control de nivel.

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Área transversal	8	m ²
Coefficiente de flujo para la válvula 1	398.765	m ³ /h*bar ^{0.5}
Coefficiente de flujo para la válvula 2	127.155	m ³ /h*bar ^{0.5}

Realizado por: Legña, Pamela, 2021

Tabla 2-3. Condiciones operativas iniciales del sistema para el control de Nivel.

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Apertura de la válvula 1	0.4	fracción
Apertura de la válvula 2	0.1	fracción
Nivel inicial	1.05	m

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Tabla 3-3. Parámetros estructurales del sistema para el control de temperatura

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Temperatura de ingreso del fluido al tanque	25	°C
Temperatura deseada	60	°C
Flujo de entrada a la chaqueta	1.25	kg/s
Temperatura de ingreso del vapor a la chaqueta	60	°C
Coefficiente global de	2500	W/m ² °C

transferencia de calor		
Volumen del tanque	4.6	m ³
Área de transferencia de calor	1.500	m ²
Volumen de la chaqueta	1.23	m ³
Capacidad calorífica del vapor	1.89	KJ/ Kg°C
Capacidad calorífica del fluido	4.1851	KJ/ Kg°C
Densidad del fluido	994.23	Kg/ m ³
Densidad de vapor	0.0130	Kg/ m ³
Calor latente de evaporación a 90°	2260	KJ/Kg

Fuente:(Mera Granja y Checa Garzón 2010, p. 53)

3.4. Modelado matemático del sistema

Para esta sección se emplean las condiciones de funcionamiento especificadas en la sección anterior como base para la simulación del sistema. Se asume que el tanque está perfectamente mezclado por lo tanto la temperatura es igual en cualquier punto del tanque; se desprecia la variación de las propiedades del fluido debido a la temperatura y se toma en cuenta las pérdidas de calor hacia el exterior y la dinámica del vapor generado es despreciada ya que en relación a la cantidad de líquido dentro del tanque es mínima.

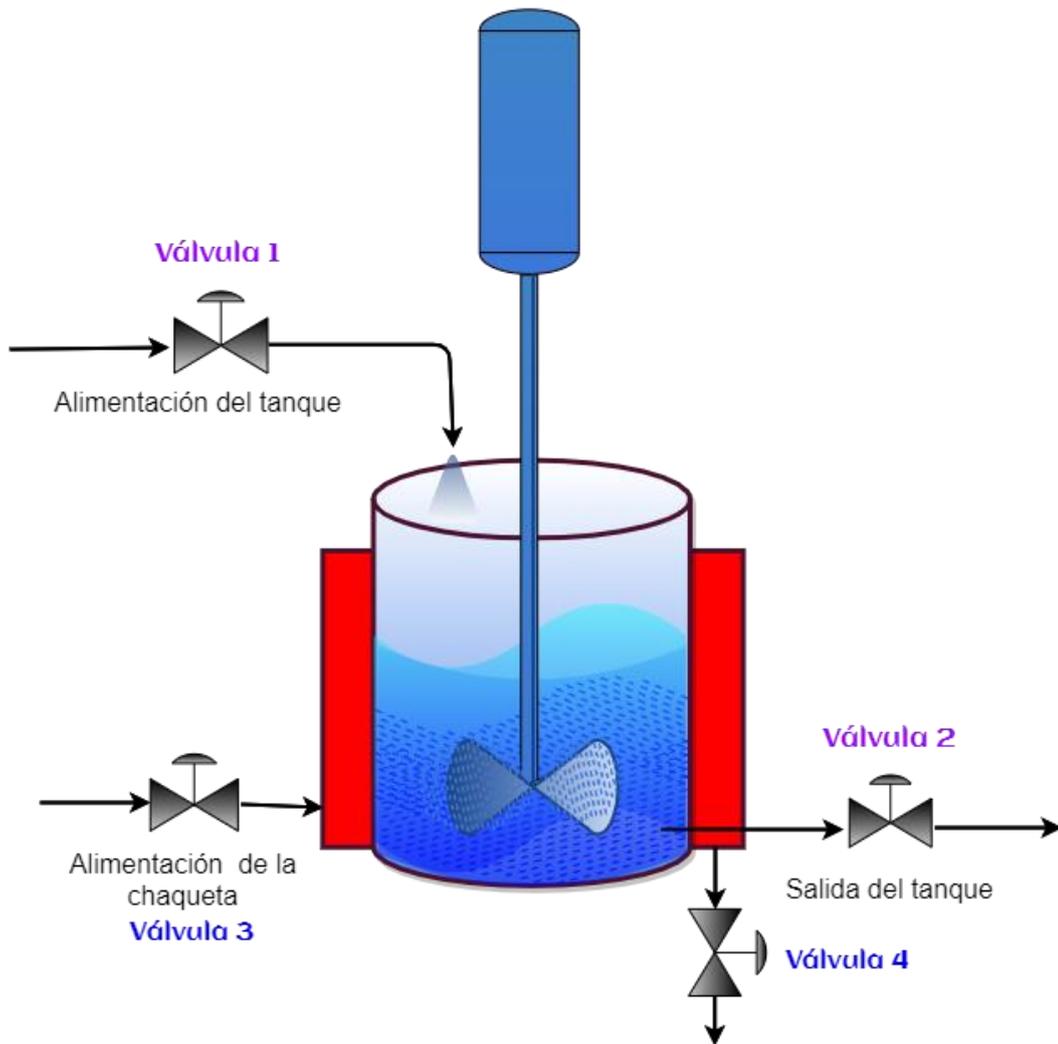


Figura 16-3. Esquema del tanque de mezcla con calentamiento

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

3.4.1. Control de nivel

Balace de masa del tanque

Consideraciones

- Densidad constante
- No hay reacción química
- Tanque cilíndrico

$$A = E - S + G - C \quad (3)$$

$$A = E - S \quad (4)$$

Donde:

A: Acumulación

E: Entada
S: Salida
G: Generación
C: Consumo

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (5)$$

Donde

m: Masa del fluido dentro del tanque.

\dot{m}_e y \dot{m}_s : Flujo másico de entrada y salida del tanque respectivamente.

$$m = \rho V \quad (6)$$

$$\dot{m}_e = \rho Q_e \quad (7)$$

Donde

ρ : Densidad del fluido

V: Volumen

Q_e : Caudal de entrada

Reemplazando la ecuación (6) y (7) en la ecuación (8) se obtiene

$$\frac{d\rho V}{dt} = \rho Q_e - \dot{m}_s \quad (8)$$

$$\dot{m}_s = \rho Av \quad (9)$$

Donde

A: Área de salida del tanque

v: Velocidad de salida del tanque

Reemplazando la ecuación (9) se obtiene

$$\frac{d\rho V}{dt} = \rho Q_e - \rho Av \quad (10)$$

Considerando que la densidad es contante se tiene que

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho(Q_e - Av) \quad (11)$$

$$\frac{dV}{dt} = (Q_e - Av) \quad (12)$$

Donde

$$V = A_T * h \quad (13)$$

A_T : Área del tanque

h : Altura

Reemplazando la ecuación (13) se obtiene:

$$\frac{dA_T * h}{dt} = (Q_e - Av) \quad (14)$$

Sacando la constante

$$A_T \frac{dh}{dt} = (Q_e - Av) \quad (15)$$

Para calcular la velocidad de salida (v) se aplica el principio de Bernoulli en la superficie y salida del tanque

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (16)$$

Si

$$P_1 = P_2 = P_{atmosférica}$$

$$v_1 = 0$$

$$h_1 - h_2 = h$$

Entonces se tiene

$$h = \frac{v_2^2}{2g} \quad (17)$$

Donde se despeja v_2 de la ecuación (16) para obtener

$$\sqrt{2gh} = v_2 \quad (18)$$

Reemplazando la ecuación(18) en la ecuación (9) se tiene el caudal de salida para una sección transversal va a ser igual a

$$\dot{m}_s = \rho A \sqrt{2gh} \quad (19)$$

Entonces en la ecuación (15) se tiene

$$A_T \frac{dh}{dt} = (Q_e - A \sqrt{2gh}) \quad (20)$$

Ecuaciones de las válvulas

$$Q_v = K_v A \sqrt{\Delta P} \quad (21)$$

Donde

Q_v : Flujo a través de la válvula

K_v : Es una constante

A: Área de paso

ΔP : P1-P2

Debido a la ecuación (21) se puede concluir que, el flujo que pasa por la válvula va a ser proporcional al grado de apertura; $Q_v \approx A$.

Si suponemos que Q_v va a tener una aproximación lineal a la apertura de la válvula, decimos que:

$$\dot{m}_s = Q_s = K_{v2} a_2 \sqrt{2gh} \quad (22)$$

$$Q_e = K_{v1} a_1 \quad (23)$$

Donde

Q_s : Caudal de salida

K_{v1} y K_{v2} : corresponden a las constantes de las válvulas de entrada y de salida respectivamente.

a_1 y a_2 : Apertura de las válvulas

Modelado matemático del nivel de un tanque

Del balance de materia realizado en el tanque se tiene que la variación de la altura del tanque respecto al tiempo va a ser igual a la ecuación (23) menos la ecuación (22),

$$A_T \frac{dh}{dt} = Q_e - Q_s \quad (24)$$

$$A_T \frac{dh}{dt} = K_{v1} a_1 - K_{v2} a_2 \sqrt{2gh} \quad (25)$$

Encontrar el punto de equilibrio de la ecuación diferencial, para ello se pone toda la ecuación en estado estacionario, es decir iguala a cero los valores diferenciales

$$0 = K_{v1} a_1 - K_{v2} a_2 \sqrt{2gh_o} \quad (26)$$

$$K_{v1}a_1 = K_{v2}a_2\sqrt{2gh_o} \quad (27)$$

Mediante la ecuación (27), se quiere decir que todo lo que le entra al tanque será igual a todo lo que sale del tanque.

Donde:

h_o : Altura en estado de equilibrio

a_1 y a_2 : Apertura de la válvula en estado de equilibrio

Se despeja h_o de la ecuación (26), valor de la altura en estado estacionario o de equilibrio obteniéndose

$$h_o = \left(\frac{K_{v1}\bar{a}_1}{K_{v2}\bar{a}_2\sqrt{2g}} \right)^2 \quad (28)$$

Linealizar la ecuación (25), con relación a la válvula de entrada y a la válvula de salida como una constante, debido a que la variable (h) está dentro de una raíz cuadrada utilizando las series de Taylor

$$f(a_1, a_2, h) \approx f(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{h}) + \frac{\partial f}{\partial a_1} \Delta a_1 \Big|_{\bar{a}_1} + \frac{\partial f}{\partial a_2} \Delta a_2 \Big|_{\bar{a}_2} + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \Big|_{\bar{h}} \quad (29)$$

$$A_T \frac{dh}{dt} \approx A_T \frac{dh}{dt} \Big|_{\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{h}} + K_{v1}(a_1 - \bar{a}_1) - K_{v2}\sqrt{2g\bar{h}}(a_2 - \bar{a}_2) - \frac{K_{v2}\bar{a}_2\sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}(h - \bar{h}) \quad (30)$$

Variables de desviación. Donde

$$A_{1(t)} = a_1 - \bar{a}_1$$

$$A_{2(t)} = a_2 - \bar{a}_2$$

$$H(t) = h - \bar{h}$$

$$A_T \frac{dh}{dt} - A_T \frac{dh}{dt} \Big|_{\bar{a}_1, \bar{h}} \approx K_{v1}A_{1(t)} - K_{v2}\sqrt{2g\bar{h}}A_{2(t)} - \frac{K_{v2}\bar{a}_2\sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}H(t) \quad (31)$$

$$A_T \frac{dH(t)}{dt} - \approx K_{v1}A_{1(t)} - K_{v2}\sqrt{2g\bar{h}}A_{2(t)} - \frac{K_{v2}\bar{a}_2\sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}}H(t) \quad (32)$$

Aplicar transformada de Laplace

$$A_T s H(s) = K_{v1} A_{1(s)} - K_{v2} \sqrt{2g\bar{h}} A_{2(s)} - \frac{K_{v2} \bar{a}_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} H(s) \quad (33)$$

Despejar el término $H(s)$

$$A_T s H(s) + \frac{K_{v2} \bar{a}_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{h}}} H(s) = K_{v1} A_{1(s)} - K_{v2} \sqrt{2g\bar{h}} A_{2(s)} \quad (34)$$

Aplicando artificios matemáticos, se logra obtener

$$\frac{2\sqrt{\bar{h}} A_T}{K_{v2} \bar{a}_2 \sqrt{2g}} s H(s) + H(s) = \frac{2\sqrt{\bar{h}} K_{v1}}{K_{v2} \bar{a}_2 \sqrt{2g}} A_{1(s)} - \frac{2\bar{h}}{\bar{a}_2} A_{2(s)} \quad (35)$$

Cambio de variables

$$\tau_1 = \frac{2\sqrt{\bar{h}} A_T}{K_{v2} \bar{a}_2 \sqrt{2g}}$$

$$K_1 = \frac{2\sqrt{\bar{h}} K_{v1}}{K_{v2} \bar{a}_2 \sqrt{2g}}$$

$$K_2 = \frac{2\bar{h}}{\bar{a}_2}$$

Reemplazando términos

$$\tau_1 s H(s) + H(s) = K_1 A_{1(s)} - K_2 A_{2(s)} \quad (36)$$

Ecuación de transferencia

$$H(s) = \frac{K_1}{(\tau_1 s + 1)} A_{1(s)} - \frac{K_2}{(\tau_1 s + 1)} A_{2(s)} \quad (37)$$

3.4.2. Balance de energía

Para el desarrollo del control de temperatura del tanque de mezcla, se considera que el flujo de entrada va a ser igual que el flujo de salida, logrando mantener el volumen constante dentro del tanque.

Balance de energía en el tanque

Consideraciones

- Chaqueta aislada

- Las paredes del tanque son de acero inoxidable y delgadas, por lo que la resistencia en este punto es despreciable

Aquí se considera el calor que es adicionado al tanque por la chaqueta

$$A = E - S \quad (38)$$

$$\frac{d(\rho_f V C_{p_f} T)}{dt} = F_i C_{p_f} T_i - F C_{p_f} T + Q \quad (39)$$

$$V \rho_f C_{p_f} \frac{dT}{dt} = F_i C_{p_f} T_i - F C_{p_f} T + Q \quad (40)$$

Donde

ρ_f : Densidad del fluido

V : Volumen del tanque

C_{p_f} : Capacidad calorífica del fluido

T : Temperatura del tanque

Si se considera que $F_i = F$, entonces se tiene:

$$V \rho_f C_{p_f} \frac{dT}{dt} = F C_{p_f} (T_i - T) + Q \quad (41)$$

Sabiendo que

$$Q = U A_{TC} (T_j - T) \quad (42)$$

$$Q_p = \varepsilon Q \quad (43)$$

Donde

T_j : Temperatura de la chaqueta.

T_i : Temperatura de ingreso al tanque.

T : Temperatura del tanque.

A_{TC} : Área de transferencia de calor.

Q_p : Calor perdido.

ε : Factor de pérdida

$$Q - Q_p = Q - \varepsilon Q = Q(1 - \varepsilon) \quad (44)$$

Donde $(1 - \varepsilon) = \beta$.

Reemplazando la ecuación (44) en la ecuación (41) se obtiene

$$V \rho_f C_{p_f} \frac{dT}{dt} = F C_{p_f} (T_i - T) + \beta Q \quad (45)$$

$$V\rho_f C_{p_f} \frac{dT}{dt} = FC_{p_f}(T_i - T) + \beta UA_{TC}(T_j - T) \quad (46)$$

$$V\rho_f C_{p_f} \frac{dT}{dt} = FC_{p_f}T_i - FC_{p_f}T + \beta UA_{TC}T_j - \beta UA_{TC}T \quad (47)$$

Ecuación en estado estacionario

$$0 = FC_{p_f}\bar{T}_i - FC_{p_f}\bar{T} + \beta UA_{TC}\bar{T}_j - \beta UA_{TC}\bar{T} \quad (48)$$

Estado dinámico (47) menos estado estacionario (48).

$$\begin{aligned} V\rho_f C_{p_f} \frac{d(T - \bar{T})}{dt} \\ = FC_{p_f}(T_i - \bar{T}_i) + \beta UA_{TC}(T_j - \bar{T}_j) - (FC_{p_f} + \beta UA_{TC})(T - \bar{T}) \end{aligned} \quad (49)$$

Se encuentra las variables de desviación

$$\Gamma_{j(t)} = T_j - \bar{T}_j$$

$$\Gamma_{(t)} = T - \bar{T}$$

$$\Gamma_{i(t)} = T_i - \bar{T}_i$$

$$V\rho_f C_{p_f} \frac{d\Gamma_{(t)}}{dt} = FC_{p_f}\Gamma_{i(t)} + \beta UA_{TC}\Gamma_{j(t)} - (FC_{p_f} + \beta UA_{TC})\Gamma_{(t)} \quad (50)$$

Separando términos

$$V\rho_f C_{p_f} \frac{d\Gamma_{(t)}}{dt} + (FC_{p_f} + \beta UA_{TC})\Gamma_{(t)} = FC_{p_f}\Gamma_{i(t)} + \beta UA_{TC}\Gamma_{j(t)} \quad (51)$$

Con artificios matemáticos se logra obtener

$$\frac{V\rho_f C_{p_f}}{FC_{p_f} + \beta UA_{TC}} \frac{d\Gamma_{(t)}}{dt} + \Gamma_{(t)} = \frac{FC_{p_f}}{FC_{p_f} + \beta UA_{TC}} \Gamma_{i(t)} + \frac{\beta UA_{TC}}{FC_{p_f} + \beta UA_{TC}} \Gamma_{j(t)} \quad (52)$$

Se hace un cambio de variables

$$\tau_2 = \frac{V\rho_f C_{p_f}}{FC_{p_f} + \beta UA_{TC}} \quad ; \quad k_3 = \frac{FC_{p_f}}{FC_{p_f} + \beta UA_{TC}} \quad ; \quad k_4 = \frac{\beta UA_{TC}}{FC_{p_f} + \beta UA_{TC}}$$

Logrando obtener

$$\tau_2 \frac{d\Gamma_{(t)}}{dt} + \Gamma_{(t)} = k_3 \Gamma_{i(t)} + k_4 \Gamma_{j(t)} \quad (53)$$

Aplicado la transformada de Laplace

$$\tau_2 S \Gamma_{(s)} + \Gamma_{(s)} = k_3 \Gamma_{i(s)} + k_4 \Gamma_{j(s)} \quad (54)$$

Sacando factor común

$$\Gamma_{(s)}(\tau_2 S + 1) = k_3 \Gamma_{i(s)} + k_4 \Gamma_{j(s)} \quad (55)$$

Despejando $\Gamma_{(s)}$ se obtiene la siguiente ecuación de transferencia:

$$\Gamma_{(s)} = \frac{k_3}{\tau_2 S + 1} \Gamma_{i(s)} + \frac{k_4}{\tau_2 S + 1} \Gamma_{j(s)} \quad (56)$$

3.4.3. Balance de energía en la chaqueta

Suponiendo que el vapor sede su calor latente de vaporización

$$A=E-S \quad (57)$$

$$\rho_v V_j \frac{d\hat{h}_j}{dt} = F_{ve} \rho_v \hat{h}_{ve} - F_{vs} \rho_L \hat{h}_{LS} - UA_T (T_j - T) \quad (58)$$

Donde

$$\hat{h}_j = C_{pv} T_j$$

$$F_{ve} \rho_v = F_{vs} \rho_L = \omega = F k_v a \rho$$

ω ; flujo másico de vapor

$$\hat{h}_{ve} - \hat{h}_{LS} = \lambda$$

λ : calor latente de vaporización

$$\rho_v V_j \frac{dC_{pv} T_j}{dt} = \omega \lambda - UA_{TC} (T_j - T) \quad (59)$$

Es necesario convertir el flujo masico en flujo volumétrico, para ello se hace el análisis dentro de una válvula de comportamiento lineal:

$$\omega_T = k_v a \rho \quad (60)$$

Donde

k_v : Factor de flujo

a : Apertura de la válvula

ρ : Densidad

Se multiplica por la densidad, para obtener el resultado con unidades de masa

$$\rho_v V_j C_{pv} \frac{dT_j}{dt} = \lambda \rho k_v a - UA_{TC} (T_j - T) \quad (61)$$

$$\rho_v V_j C_{pv} \frac{dT_j}{dt} = \lambda \rho k_v a - UA_{TC} T_j + UA_{TC} T \quad (62)$$

Ecuación en estado estacionario

$$\rho_v V_j C_{pv} \frac{dT_j}{dt} = \lambda \rho k_v \bar{a} - UA_{TC} \bar{T}_j + UA_{TC} \bar{T} \quad (63)$$

$$\rho_v V_j C_{pv} \frac{d(T_j - \bar{T}_j)}{dt} = \lambda \rho k_v (a - \bar{a}) - UA_{TC} (T_j - \bar{T}_j) + UA_{TC} (T - \bar{T}) \quad (64)$$

Variables de desviación

$$A_{(t)} = a - \bar{a}$$

$$\Gamma_{j(t)} = T_j - \bar{T}_j$$

$$\Gamma_{(t)} = T - \bar{T}$$

$$\rho_v V_j C p_v \frac{d\Gamma_{j(t)}}{dt} = \lambda \rho k_v A_{(t)} - U A_{TC} \Gamma_{j(t)} + U A_{TC} \Gamma_{(t)} \quad (65)$$

Se despeja $\Gamma_{j(t)}$

$$\rho_v V_j C p_v \frac{d\Gamma_{j(t)}}{dt} + U A_{TC} \Gamma_{j(t)} = \lambda \rho k_v A_{(t)} + U A_{TC} \Gamma_{(t)} \quad (66)$$

$$\frac{\rho_v V_j C p_v}{U A_{TC}} \frac{d\Gamma_{j(t)}}{dt} + \Gamma_{j(t)} = \frac{\lambda \rho k_v}{U A_{TC}} A_{(t)} + \Gamma_{(t)} \quad (67)$$

Se hace un cambio de variable, donde

$$\tau_3 = \frac{\rho_v V_j C p_v}{U A_{TC}}$$

$$k_5 = \frac{\lambda \rho k_v}{U A_{TC}}$$

Reemplazando se tiene

$$\tau_3 \frac{d\Gamma_{j(t)}}{dt} + \Gamma_{j(t)} = k_5 A_{(t)} + \Gamma_{(t)} \quad (68)$$

Aplicando la transformada de Laplace

$$\tau_3 S \Gamma_{j(s)} + \Gamma_{j(s)} = k_5 A_{(s)} + \Gamma_{(s)} \quad (69)$$

Despejando $\Gamma_{j(s)}$, se obtiene:

$$\Gamma_{j(s)} (\tau_3 S + 1) = K_5 A_{(s)} + \Gamma_{(s)} \quad (70)$$

$$\Gamma_{j(s)} = \frac{K_5}{\tau_3 S + 1} A_{(s)} + \frac{1}{\tau_3 S + 1} \Gamma_{(s)} \quad (71)$$

3.4.4. Diagrama de bloques del sistema

3.4.4.1. Control de nivel

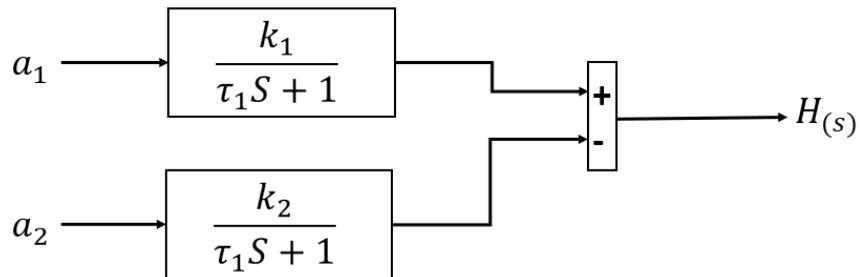


Figura 2-3. Diagrama de bloques para el control de nivel
Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

3.4.4.2. Control de temperatura

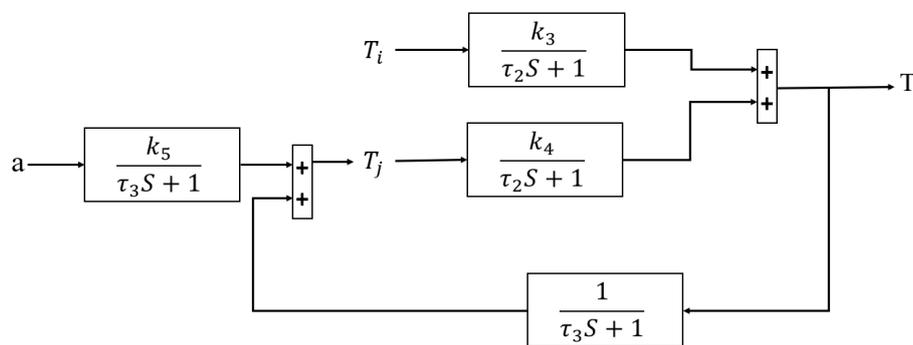


Figura 3-3. Diagrama de bloques para el control de temperatura
Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

3.5. Simulación en Matlab/Simulink

Para realizar la simulación en simulink, se toma como referencia los diagramas de bloques realizados anteriormente además se consideraron varias formas de efectuar un sistema de control.

3.5.1. Control de nivel

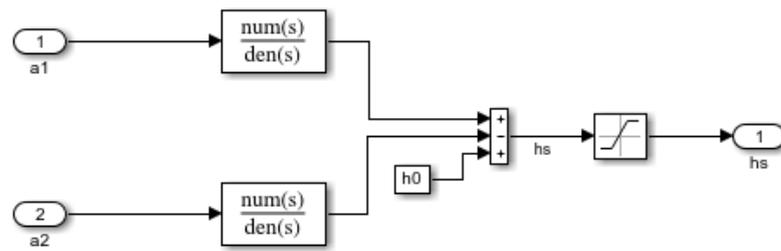


Figura 4-3. Diagrama de bloques realizado en simulink

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Simulink al ser un recurso didáctico de programación visual muestra el entorno del diagrama de bloques, que sirve para interpretar el comportamiento del sistema dinámico, siendo de mucha ayuda ya que permite explorar un amplio espacio de diseño mediante el modelado del sistema al momento de desarrollar el proyecto.

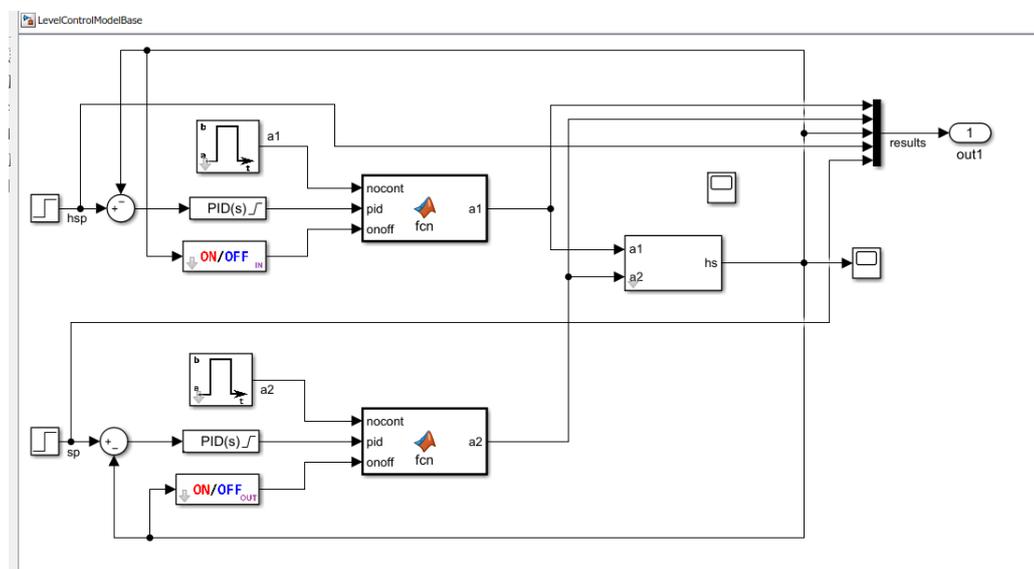


Figura 5-3. Diagrama del sistema para el control de nivel

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.



Figura 6-3. Bloque Matlab función

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En la Figura 4-3, se observa el sistema de control de nivel, en cuya estructura consta de diferentes formas de control, como el control PID, ON/OFF y el sistema sin control, correspondiente para cada una de las válvulas, además este sistema de control tiene dos bloques S-function de Matlab, el cual permite extender las funciones que ofrece simulink.

Los diagramas que se muestran están basados en las ecuaciones de transferencia que se obtuvieron en el punto anterior y en los diagramas de bloques de la misma.

```

1  function a1 = fcn(nocont, pid, onoff, VA1)
2
3  a1 = 0;
4
5  switch VA1
6  case 1
7      a1 = nocont;
8  case 2
9      a1 = pid;
10 case 3
11     a1 = onoff;
12 end
13

```

Figura 7-3. Contenido de bloque Matlab Function, VA1.

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Este es el código del bloque de funciones de Matlab, es el puente de conexión entre las señales de entrada y el modelo del tanque. Dependiendo del valor de la variable VA1 que puede ser 1,2 y 3 permite el paso de la señal. Por ejemplo:

VA1 = 1; % Válvula 1 sin control, se activa la entrada pulso

VA1 = 2; % Válvula 1 control PID, su entrada será la apertura desde el controlador PID

VA1 = 3; % Válvula 1 control ONOFF, entra 1 valor de apertura desde el controlador ONOFF

```

Editor - Block: LevelControlModelBase/MATLAB Function1
main.m x dev2.m x MATLAB Function1 x +
1 function a2 = fcn(nocont, pid, onoff, VA2)
2
3 a2 = 0;
4
5 switch VA2
6     case 1
7         a2 = nocont;
8     case 2
9         a2 = pid;
10    case 3
11        a2 = onoff;
12 end
13

```

Figura 8-3. Contenido de bloque Matlab Function, VA2

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Su funcionamiento es igual que el bloque anterior, es decir:

VA2 = 1; % Válvula 2 sin control, tendrá entrada pulso

VA2 = 2; % Válvula 2 control PID, entrada apertura desde el PID

VA2 = 3; % Válvula 2 control ONOFF, entrada apertura desde el controlador ONOFF

Por consiguiente, si se quiere el modelo NOCONT, ambas válvulas deben tener el valor 1. Es decir, VA1 = 1 y VA2 = 1

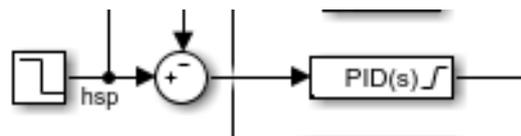


Figura 9-3. Bloque de controlador PID

Realizado por: Legña, Pamela, 2021

En este diagrama se observa que el sistema de control PID se efectúa en la válvula a1, por lo que la válvula a2 se debe presentar como una perturbación, sujeta a el efecto pulso, para observar el comportamiento del controlador. Caso contrario si se desea que el sistema de control esté sobre la válvula a2, es decir a la salida del sistema, la alimentación debe presentarse como perturbación.



Figura 10-3. Bloque de control ON/OFF

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En este gráfico se observa el bloque controlador on-off y como está representado en el diagrama del sistema, este se presenta para la válvula de alimentación y la de desfogue.

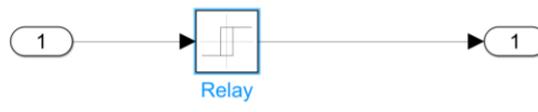


Figura 11-3. Interior del bloque ON/OFF

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En la figura anterior, se observa el interior del bloque de control ON/OFF, para simular este comportamiento se utiliza el bloque Relay de matlab.

3.5.2. Control de temperatura

En el desarrollo de los diagramas en simulink para el control de temperatura se tomó de base el diagrama de bloques de las funciones de transferencia, teniendo así tres formas de control, el control PID, el control on-off, y el modelo sin control.

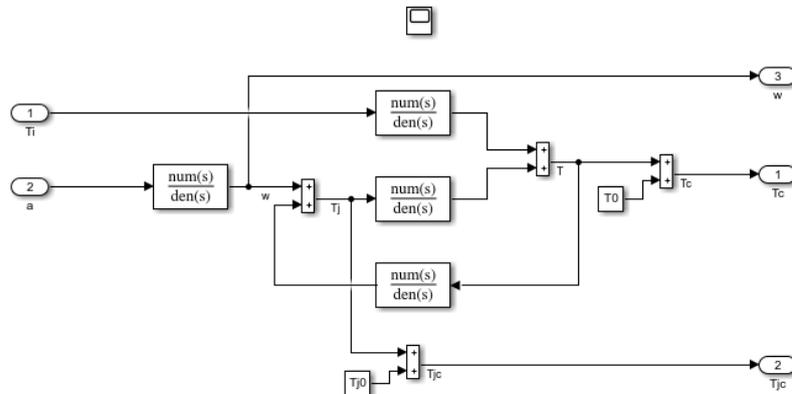


Figura 12-3. Diagrama de bloques realizado en simulink

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En la Figura 12-3 se observa el esquema que se desarrolló en simulink, basado en el diagrama de bloques obtenido en base a las funciones de transferencia de temperatura.

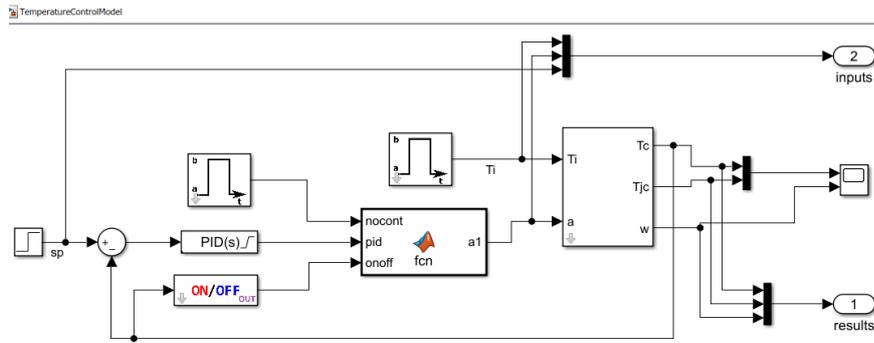


Figura 13-3. Diagrama del sistema de control de temperatura
 Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En la Figura 13-3, se observa el diagrama control del sistema térmico desarrollado en simulink, el cual permite entender el comportamiento dinámico del sistema. Se observa también las formas de control PID, ON-OFF y sin control, que tendrán su efecto sobre la válvula de alimentación de la chaqueta de vapor. También existe una máscara de subsistema que contiene la Figura 12-3 y representan las funciones de transferencia del sistema.

De igual manera se observa el bloque de funciones de Matlab, el cual contiene en su interior las señales de entrada al sistema, cumple la misma función que en el control de nivel.

```

main.m x dev2.m x MATLAB Function x +
1 function a1 = fcn(nocont, pid, onoff, VA3)
2
3     a1 = 0;
4
5     switch VA3
6         case 3
7             a1 = nocont;
8         case 1
9             a1 = pid;
10        case 2
11            a1 = onoff;
12    end
13

```

Figura 14-3. Bloque de funciones, Matlab para el control de temperatura
 Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En el diagrama de la Figura 15-3, se representa la temperatura de ingreso de fluido al tanque como una perturbación, con la finalidad de observar el comportamiento de cada forma de control.

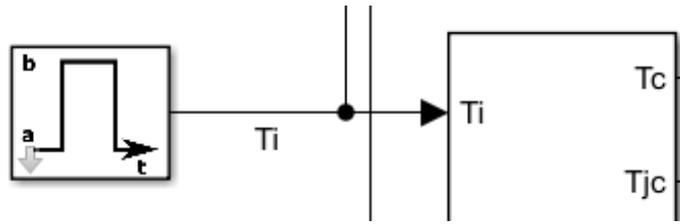


Figura 15-3. Perturbación de la válvula de alimentación del tanque

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

3.6. Construcción de la interfaz gráfica

La interfaz gráfica se realiza en la aplicación de Matlab denominada App Designer, pues posee todas las herramientas para generar un entorno virtual amigable para el usuario.

3.6.1. Interfaz gráfica para el control de nivel

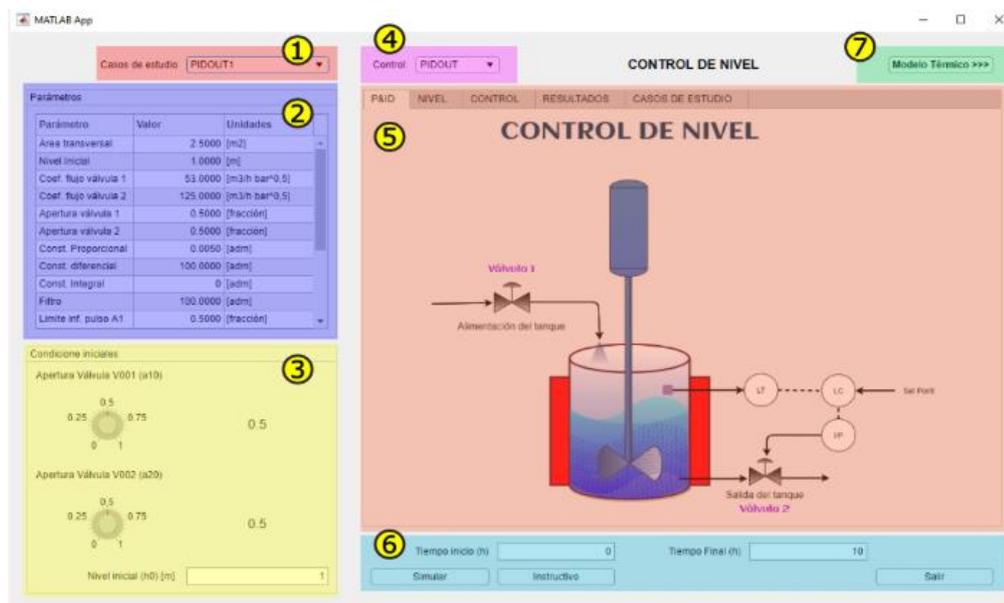


Figura 16-3. Interfaz gráfica para el control de nivel

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

La interfaz gráfica se realizó en Matlab, en App Designer ya que posee todas las herramientas para el desarrollo del proyecto, mismo que está distribuido de la siguiente manera:

1. En este punto se encuentra un cuadro de opciones (Drop Down), con los casos de estudio que están almacenados en la aplicación.
2. En esta sección está una tabla de datos que contiene tres columnas en la primera está el nombre de los diferentes parámetros, en la segunda columna está el valor numérico y en la tercera están las unidades en el sistema internacional.

3. En esta sección están las condiciones iniciales del sistema, por ejemplo, la apertura de la válvula de alimentación, la apertura de la válvula de salida del tanque y el nivel inicial del fluido dentro del tanque.
4. En este punto se encuentra un cuadro de opciones que contiene las distintas formas de control, está el control PID para válvula de salida y alimentación del tanque, el control on-off para las dos válvulas de igual manera a la entrada y salida del tanque, y el sistema sin control.
5. En esta sección de la interfaz gráfica se encuentra un tab group que contiene el diagrama P&ID que corresponde a cada caso de control, la gráfica de nivel, la gráfica del sistema de control, esta una tabla de resultados que se obtiene después de la simulación y finalmente los casos de estudio.
6. En esta parte de la aplicación están los botones para simular, que es del que da inicio al proceso, el botón de instructivo, el mismo que muestra el manual del programa y el botón de salir, también se observa que existe el tiempo de inicio y el tiempo final de la simulación.
7. Este botón da pasó al sistema térmico siempre y cuando se haya ejecutado la simulación del nivel, caso contrario arrojará un error por falta de datos para el control de temperatura.

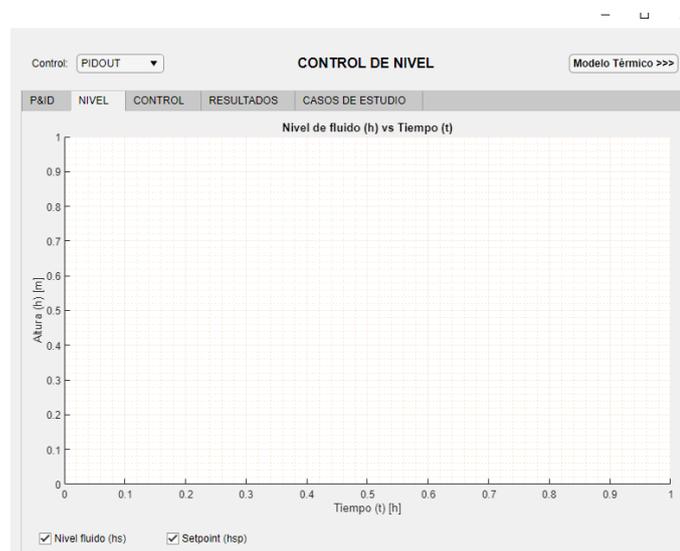


Figura 17-3. Pantalla para la gráfica de control de nivel.
Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

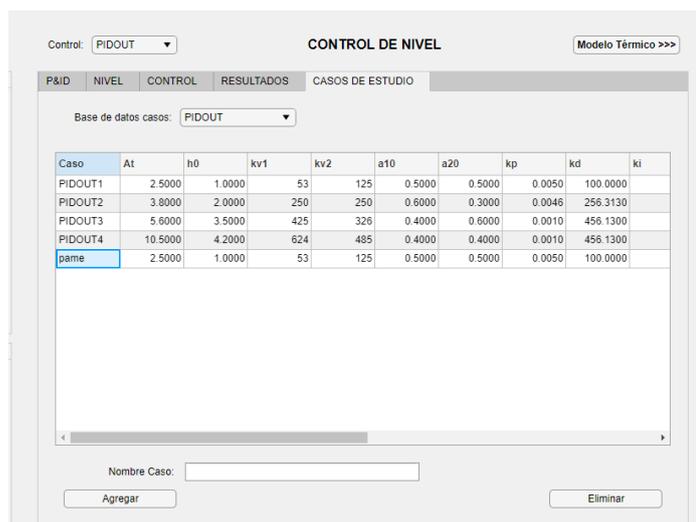


Figura 18-3. Pantalla con los casos de estudio, almacenados
Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

3.6.2. Interfaz gráfica para el control de temperatura.

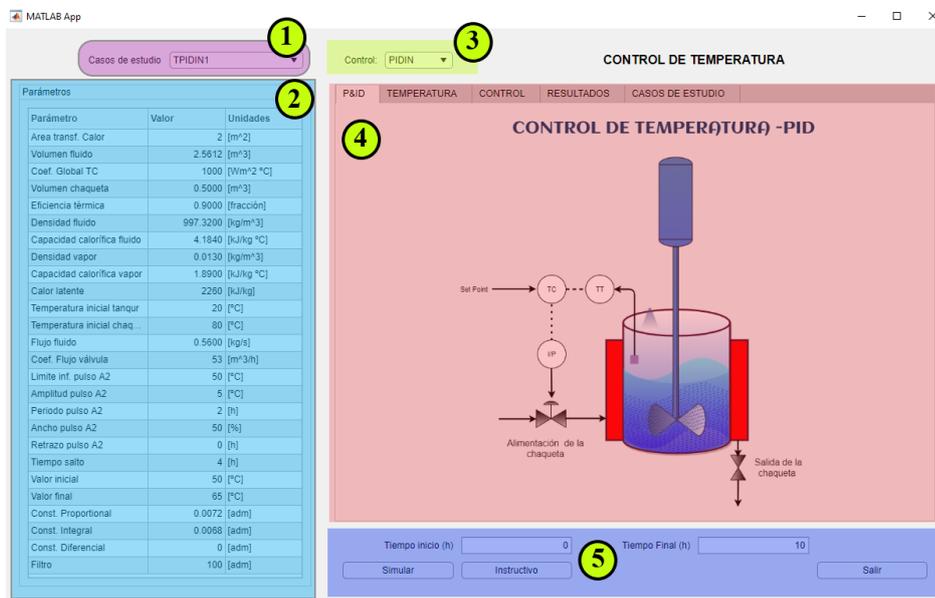


Figura 19-3. Interfaz gráfica para el control de temperatura
Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

La interfaz gráfica se realizó en Matlab, en App Designer de forma similar a la aplicación del control de nivel y está distribuido de la siguiente manera:

1. En este punto se encuentra un cuadro de opciones (Drop Down), con los casos de estudio que están almacenados en la aplicación.

2. En esta sección está una tabla de datos que contiene tres columnas en la primera está el nombre de los diferentes parámetros, en la segunda columna está el valor numérico y en la tercera están las unidades en el sistema internacional.
3. En este punto se encuentra un cuadro de opciones que contiene las distintas formas de control, está el control PID, el control on-off para la válvula de alimentación de la y el sistema térmico sin control.
4. En esta sección de la interfaz gráfica se encuentra un tab group que contiene el diagrama P&ID que corresponde a cada caso de control, la gráfica de temperatura, la gráfica del sistema de control, está la tabla de resultados y finalmente los casos de estudio.
5. En esta parte de la aplicación están los botones para simular, que es del que da inicio al proceso, el botón de instructivo, el mismo que muestra el manual del programa y el botón de salir, también se observa que existe el tiempo de inicio y el tiempo final de la simulación.

3.7. Validación el sistema modelado

Los resultados provenientes del modelado matemático del sistema como: funciones de transferencia, la temperatura, capacidades caloríficas, densidades, etc. se comparan con los valores definidos en bibliografía a fin de validar el sistema propuesto y asegurar su confiabilidad, otra forma de validar el modelo matemático propuestos es realizando el análisis dimensional de las ecuaciones encontradas.

3.7.1. Análisis dimensional de la función de transferencia del control de nivel

$$\tau_1 = \frac{2\sqrt{h[m]}A_T[m^2]}{K_{v2} \left[\frac{m^3}{hbar^{0.5}} \right] \bar{a}_2 \sqrt{2g \left[\frac{m}{s^2} \right]}} \quad (72)$$

Thau, tiene unidades de tiempo y para llegar a esto se recurre al análisis de caída de presión, donde se llega a:

$$\frac{\sqrt{\Delta P}}{\sqrt{h}} = \sqrt{2g} \quad (73)$$

Reemplazando la ecuación (73) en la ecuación (72).

$$\tau_1 = \frac{2\sqrt{h[m]}A_T[m^2]}{K_{v2} \left[\frac{m^3}{hbar^{0.5}} \right] \bar{a}_2 \frac{\sqrt{\Delta P[bar]}}{\sqrt{h[m]}}} \quad (74)$$

Obteniendo finalmente τ_1 , en unidades de tiempo.

$$\tau_1 = \frac{[m^2][m][h]}{[m^3]} = [h] \quad (75)$$

Los K_1 y K_2 , son ganancias y sus unidades dependen de lo que salga de la ecuación diferencial

$$K_1 = \frac{2\sqrt{\bar{h}[m]}K_{v1}\left[\frac{m^3}{h}\right]}{K_{v2}\left[\frac{m^3}{hbar^{0.5}}\right]a_2\sqrt{\Delta P[bar]}} = [m] \quad (76)$$

$$K_2 = \frac{2\bar{h}[m]}{a_2[adimensional]} = [m] \quad (77)$$

3.7.2. Análisis dimensional de la función de transferencia del control de temperatura

$$\tau_2 = \frac{V[m^3]\rho_f\left[\frac{kg}{m^3}\right]C_{p_f}\left[\frac{Kj}{kg^\circ C}\right]}{F\left[\frac{kg}{s}\right]C_{p_f}\left[\frac{Kj}{kg^\circ C}\right] + \beta U\left[\frac{W}{m^2^\circ C}\right]A_{TC}[m^2]} = [h] \quad (78)$$

Sabiendo que 1Watt=3.6kj/h

$$k_3 = \frac{F\left[\frac{kg}{s}\right]C_{p_f}\left[\frac{Kj}{kg^\circ C}\right]}{F\left[\frac{kg}{s}\right]C_{p_f}\left[\frac{Kj}{kg^\circ C}\right] + \beta U\left[\frac{W}{m^2^\circ C}\right]A_{TC}[m^2]} = [1] \quad (79)$$

$$\tau_3 = \frac{\rho_v\left[\frac{kg}{m^3}\right]V_j[m^3]C_{p_v}\left[\frac{Kj}{kg^\circ C}\right]}{U\left[\frac{W}{m^2^\circ C}\right]A_{TC}[m^2]} = [h] \quad (80)$$

$$k_5 = \frac{\lambda\left[\frac{Kj}{kg}\right]\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right]k_v\left[\frac{m^3}{h}\right]}{U\left[\frac{W}{m^2^\circ C}\right]A_{TC}[m^2]} = [^\circ C] \quad (81)$$

Para validar la funcionalidad de la interfaz gráfica es necesario comprobar que las conexiones entre el diagrama de simulink correspondan con las de la app de modo que arrojen resultados apropiados y similares.

El proceso de validación o comprobación se lo realiza una vez culminado el diseño y el proceso de enlace de los botones de acción, al igual que las gráficas de la a interfaz. El proceso de validación debe hacerse para cada forma de control tanto para el control de nivel como para el de temperatura, a fin de evitar complicaciones al momento de compilar el sistema, como una aplicación independiente de Matlab.

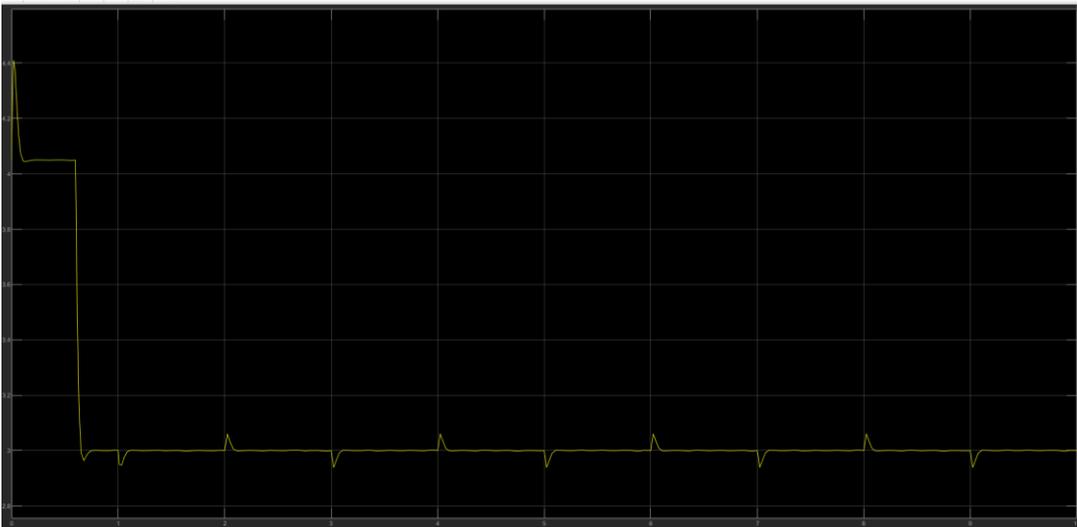


Figura 20-3. Gráfica obtenida desde simulink, para el control PID-out

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

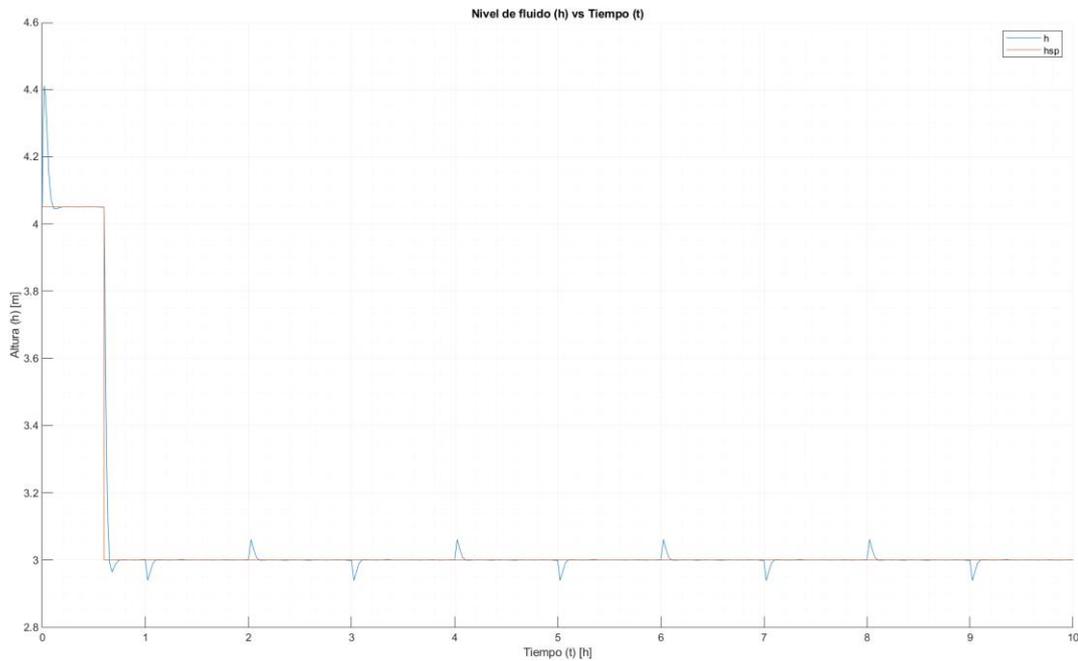


Figura 21-3. Gráfica obtenida desde App Designer.

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En las figuras anteriores se puede comprobar que el comportamiento de la interfaz gráfica es correcto, pues arroja los mismos resultados que simulink, por consiguiente, se procede al proceso de compilación.

3.8. Desarrollo del manual del usuario

Se creó un manual de usuario, para una mejor comprensión del modo de uso de la herramienta didáctica desarrollada, donde se explique paso a paso el proceso instalación con el código fuente de la aplicación para usarlo con el software MATLAB.

Se puede acceder al manual desde la aplicación a través del siguiente botón.



Figura 22-3. Botón para acceder al instructivo

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Para construir la documentación se utilizó HTML, que sirve para dar la estructura de la página web, usa etiquetas que permiten definir donde esta una barra de navegación, una sección de información, párrafos, títulos, imágenes, links etc. y CSS, para darle un estilo, sirve para darles color de fondo, estilo de fuente, tamaño de fuente y posición de los distintos elementos.

En el manual de usuario se explica de forma resumida la funcionalidad del sistema, además muestra los casos de estudio que se encuentran almacenados en su base de datos y como interpretar los resultados que se obtengan. El manual estará dividido en dos partes, el control de nivel y el control de temperatura, donde muestra los parámetros editables dentro de la aplicación, su definición y las unidades en las que se encuentra a fin de evitar errores al momento de simular.

El manual de usuario servirá para potenciar el desempeño de la aplicación, haciéndolo comprensible para los usuarios y aumentando su utilidad.

CAPÍTULO IV

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1. Presupuesto

Tabla 1-4. Presupuesto del proyecto de titulación.

PRESUPUESTO			
ACTIVIDAD	MONTO	FUENTE DE FINANCIAMIENTO	
		INTERNA	EXTERNA
Curso de programación	\$250	X	
Investigación	\$60		
Empastados	\$60	X	
Imprevistos	\$100	X	
TOTAL		\$470	

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

4.2. Recursos y Materiales.

El presente proyecto de titulación se desarrolla mediante el uso de los siguientes softwares:

- *MATLAB (versión R2020a)*: diseño y simulación de la aplicación
- *VISUAL PARADIGM ONLINE*: diseño del diagrama para la app.

A su vez todos los procedimientos mencionados se realizaron en un ordenador con procesador Intel(R) Core (TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz 2.60 GHz, con 12,0 GB de memoria RAM, sistema operativo de 64 bits, procesador x64 y Windows 10 Home.

4.4. Discusión y análisis de resultados

4.4.1. Informe de resultados del modelado e interfaz gráfica

En la Figura 1-4, se muestra el diagrama de bloques empleado en el desarrollo de la aplicación para el control de nivel, que resultó del modelado del tanque de mezcla. Este cuenta con varias formas de control del sistema, mismas que tienen efecto sobre la válvula de alimentación del tanque, como en la válvula de salida. Además, se utilizó el efecto pulso para representar al comportamiento de una perturbación y así poder observar de mejor manera el comportamiento de los controladores.

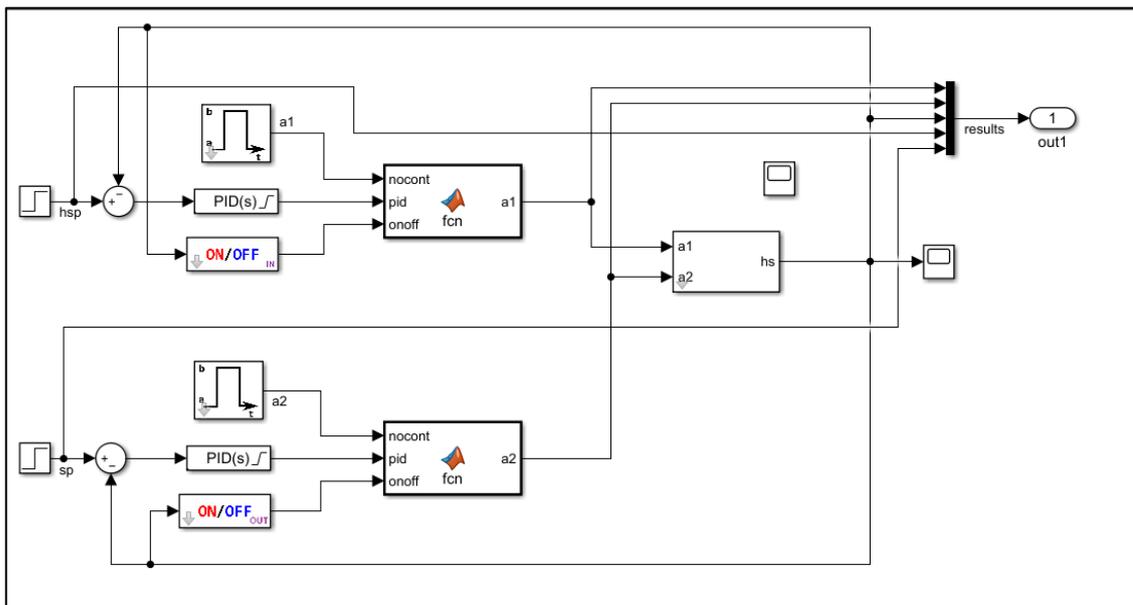


Figura 1-4. Diagrama del sistema para el control de nivel

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

La Figura 2-4, muestra el diagrama final desarrollado en simulink, que fue empleado para el control de temperatura del tanque de mezcla con calentamiento, muestra las formas de control que se efectuaran sobre la válvula de alimentación de la chaqueta de vapor. También se presenta la alimentación del tanque como una perturbación.

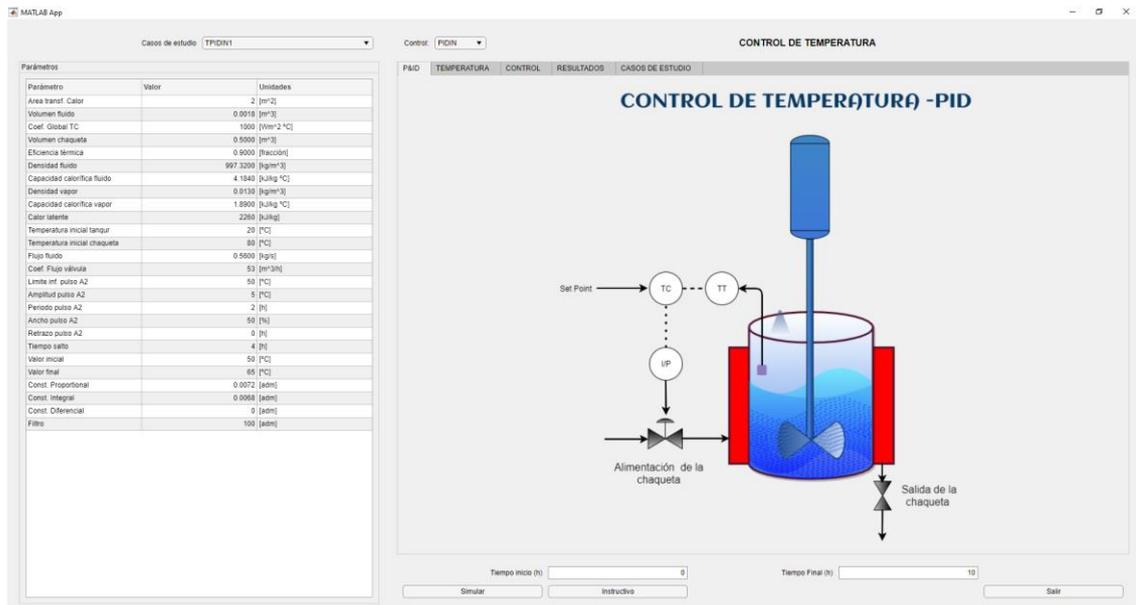


Figura 4-4. Pantalla secundaria de la aplicación.

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

4.4.2. Resultados para el control de nivel

4.4.2.1. Proceso sin control

Con los parámetros estructurales expresados en la Tabla 1-2 y bajo las condiciones iniciales de la Tabla 2-2, se simula un proceso enunciado en el caso 1 del sistema sin control, donde un tanque cilíndrico tiene 2 válvulas una de alimentación (Va1) y otra de desfogue (Va2). El tanque funciona correctamente hasta que un fallo en la válvula de entrada genera una perturbación, que lo saca del estado estacionario. Tiempo de simulación 12h y altura del tanque 8 metros.

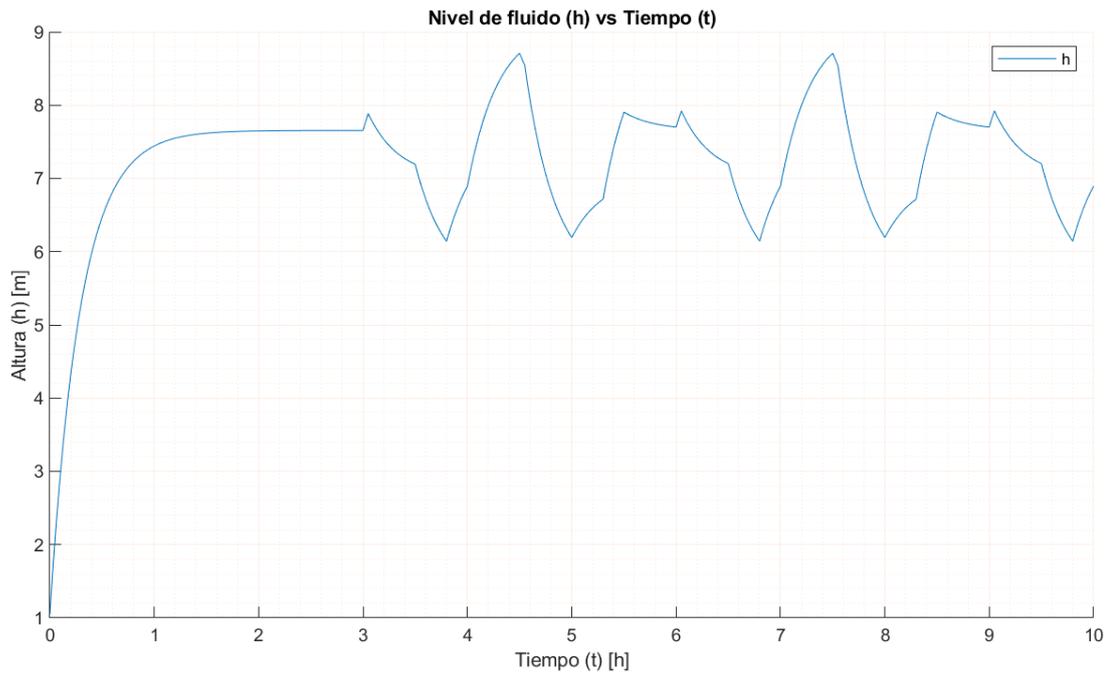


Figura 5-4. Proceso sin control

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Como enuncia el problema, aquí se puede observar el comportamiento del tanque, que al inicio del proceso estaba ajustado manualmente a fin de mantener el flujo constante, pero en la hora 3, se presenta una perturbación que lo saca del estado estacionario y al no tener un sistema de control, el nivel se eleva a tal punto de que en las 4.6 y 7.8 horas hay desbordamiento.

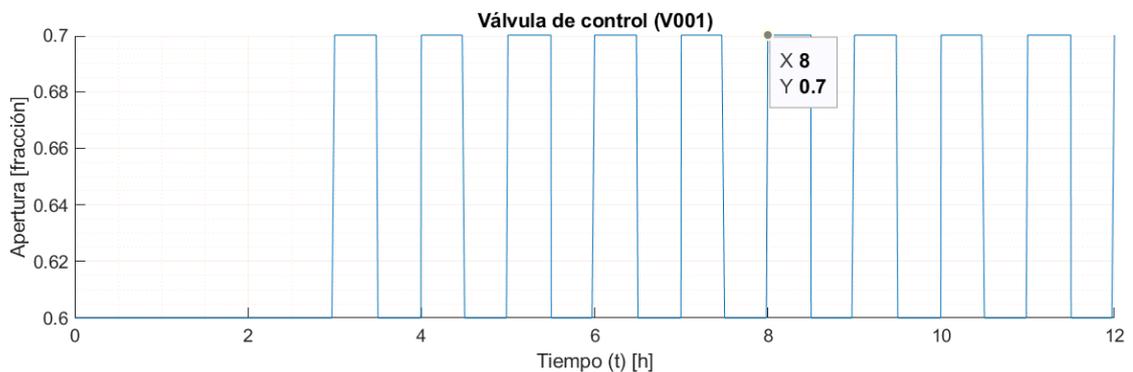


Figura 6-4. Perturbación en la Va1

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Tabla 3-4. Parámetros para la función pulso del proceso sin control Va1

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Límite inferior del pulso A1	0.6	fracción
Amplitud del pulso A1	0.1	fracción

Periodo del pulso A1	1	h
Ancho del pulso A1	50	%
Retraso del pulso A1	3	h

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

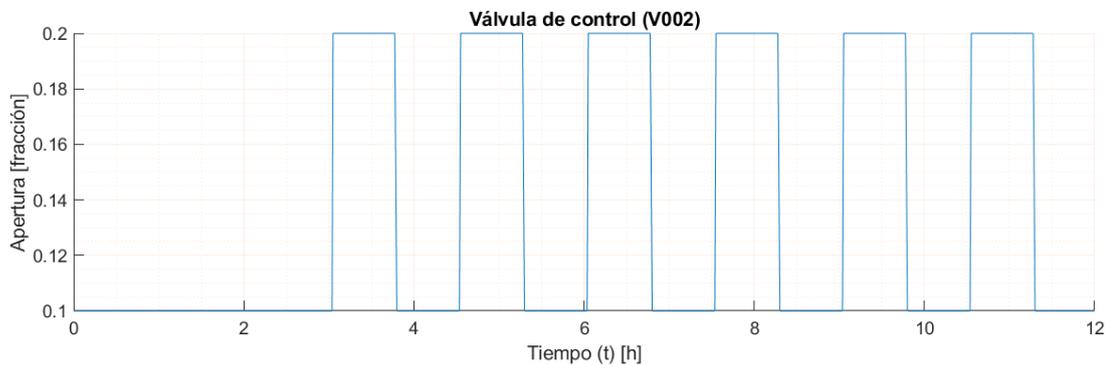


Figura 7-4. Acción de control manual Va2

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En esta gráfica se observa que, a consecuencia de la perturbación en la válvula de alimentación, un operador intenta controlar el nivel de fluido de forma manual, pero a pesar de sus esfuerzos existe desbordamiento.

Tabla 4-4. Parámetros para la función pulso del proceso sin control Va2

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Límite inferior del pulso A2	0.1	fracción
Amplitud del pulso A2	0.1	fracción
Periodo del pulso A2	1.5	h
Ancho del pulso A2	50	%
Retraso del pulso A1	3.05	h

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

4.4.2.2. Control PID

PID Out

Como consecuencia del fallo en el control de nivel del tanque en el caso anterior, se decide instalar un sistema de control PID, con acción de control sobre la válvula de salida del tanque.

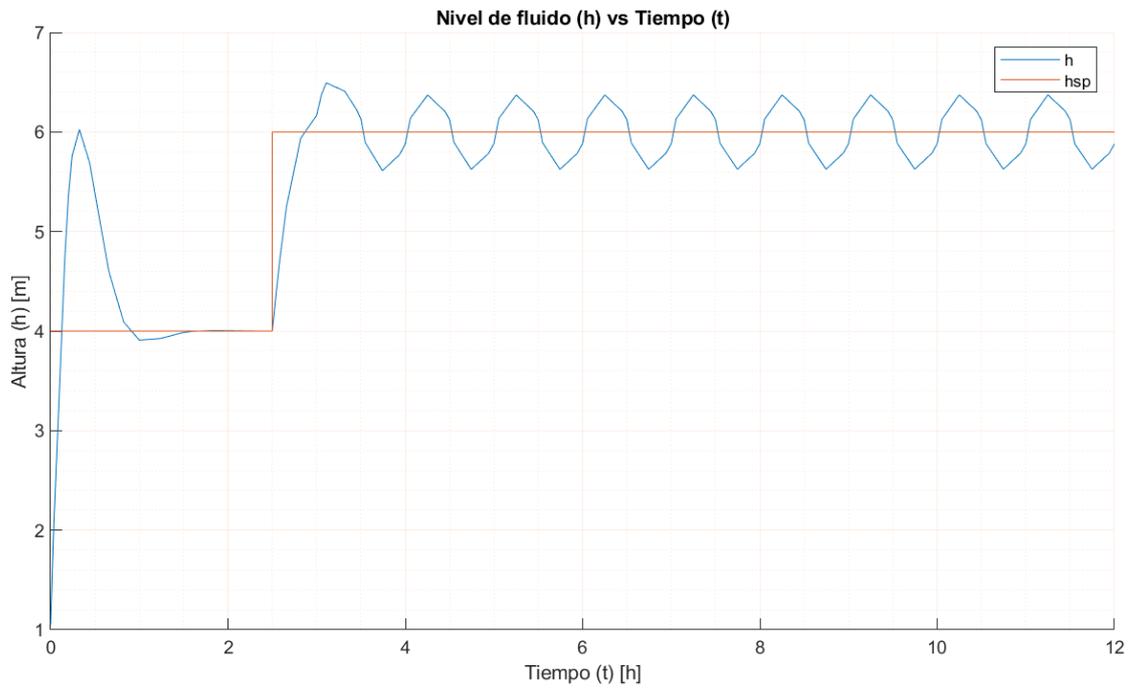


Figura 8-4. Sistema PID para el control de nivel

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En vista de lo suscitado con el proceso sin control, se decide colocar a la válvula de desfogue del sistema sobre el efecto de un controlador PID. La válvula que permite el flujo del agua hacia el tanque permanece abierta, pero se le coloca el efecto pulso para que simule el comportamiento de una perturbación. Se pone un Set Point de nivel inicial de 4m y a las 3h hay un salto con un incremento de 2m colocándose un Set Point de 6m de altura, por la gráfica se puede decir que el controlador cumple su función al tratar de estabilizar el nivel frente a las perturbaciones.

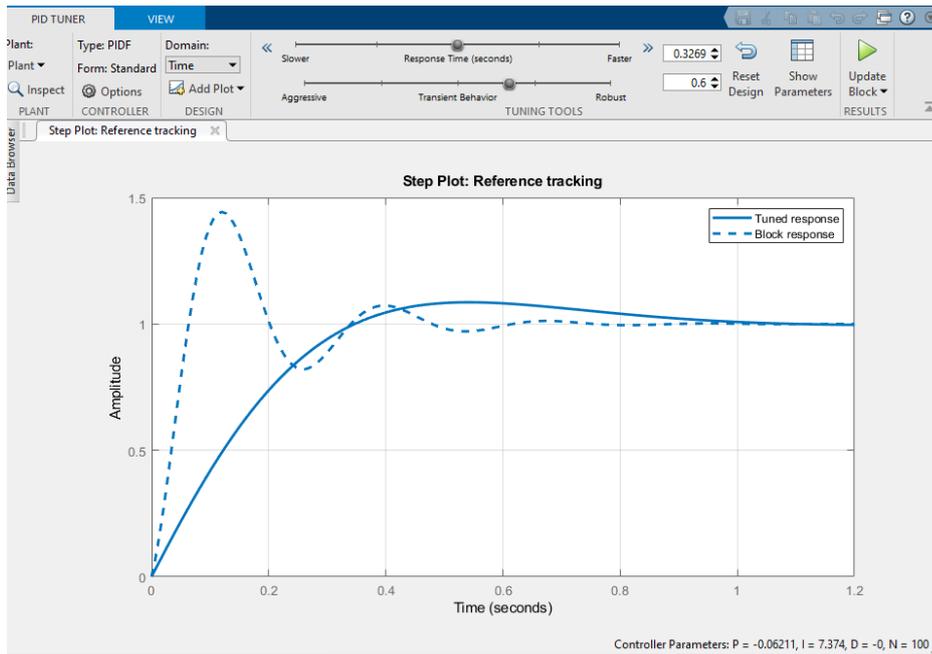


Figura 9-4. Linealización de la planta con PID Tuner

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

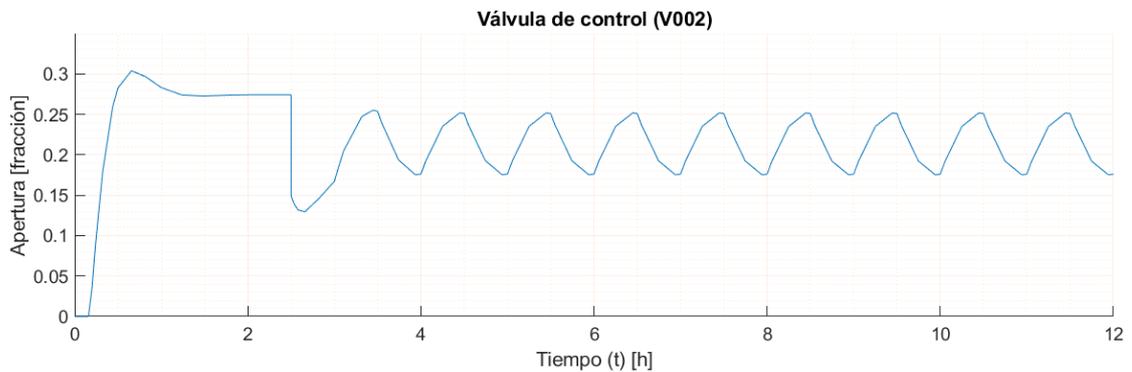


Figura 10-4. Control PID en la válvula Va2

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En la Figura -4, se observa el comportamiento del controlador sobre la válvula de desfogue del tanque, que al iniciar el proceso esta permanece cerrada hasta que el nivel del agua dentro del tanque se eleve para ir abriéndose poco a poco evitando el desbordamiento, alcanza finalmente una altura de 6.7m, con 0.41 grados de apertura, cuando inicia el Set Point de 4m la válvula controlada se abre para bajar el nivel el agua hasta alcanzar el nivel de Set Point. Una vez alcanzado el nivel establecido el comportamiento de válvula se mantiene, hasta que a la tercera hora, existe un salto elevando 2m el nivel de Set Point, como respuesta a este cambio la válvula se cierra 0.13 grados, a fin de eleva el nivel a 6m. Al igual que en el caso anterior, se genera una

perturbación a las 3 horas, pero se observa que el controlador maneja esta perturbación haciendo que no se aleje el nivel del tanque del nivel de Set Point

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-0.062106	-0.1332
I	7.3743	58
D	0	0
N	100	85.21
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.253 seconds	0.0482 seconds
Settling time	0.908 seconds	0.574 seconds
Overshoot	8.57 %	44.3 %
Peak	1.09	1.44
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	69 deg @ 6.12 rad/s	30.9 deg @ 24.5 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Figura 11-4. Control PID en la Válvula de salida

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Los valores para K_d , K_i , y K_p se obtuvieron en la sintonización del controlador PID, mediante la herramienta “PID TUNER”, pues esta herramienta permite manipular los tiempos de establecimiento, máximo sobresalto y error en estado estable.

Tabla 5-4. Valores resultantes de las constantes para en control PID de Va2

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Constante Proporcional	-0.062106	adimensional
Constante Diferencial	0	adimensional
Constante Integral	7.3743	adimensional
Filtro (N)	100	adimensional

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

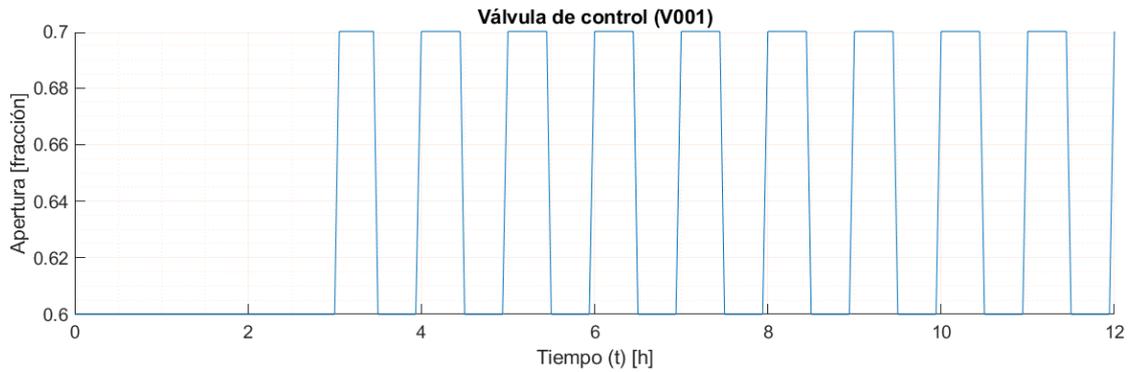


Figura 12-4. Perturbación del control PID

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Se pone a la válvula de alimentación como una perturbación, a fin de evaluar el comportamiento del controlador bajo estas condiciones. Esto ayudo a evaluar el comportamiento del controlador, dando resultados favorables.

Tabla 6-4. Parámetros de la función pulso Val

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Límite inferior del pulso A1	0.6	fracción
Amplitud del pulso A1	0.1	fracción
Periodo del pulso A1	1	h
Ancho del pulso A1	50	%
Retraso del pulso A1	3	h

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Tabla 7-4. Valores de la función escalón Set Point

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Tiempo de salto	2.5	h
Valor inicial	4	m
Valor final	6	m

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

PID IN

Se decide probar el controlador PID, pero esta vez para la válvula de alimentación, conservando los mismos parámetros.

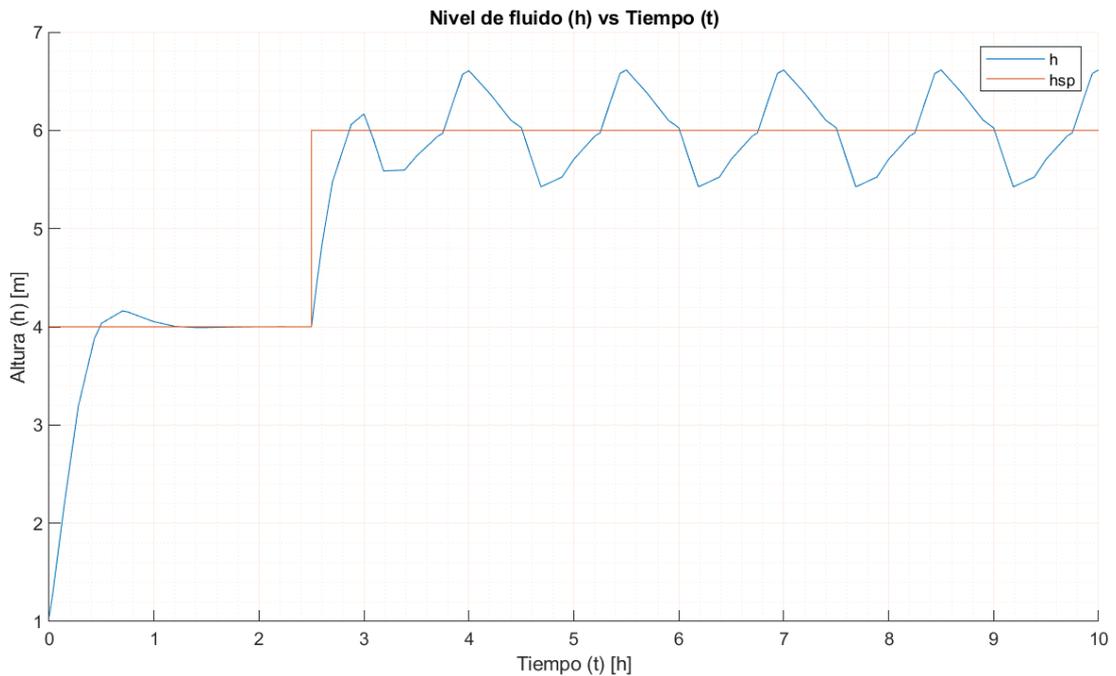


Figura 13-4. Sistema PID para control de nivel en Va1

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

En la Figura 13, se observa la variación del nivel respecto al tiempo de simulación, donde se puede deducir que el comportamiento del controlador PID sobre la válvula de alimentación es muy bueno, pues no tiene un sobre impulso elevado, y alcanza el nivel de Set Point rápidamente. En 1 caso de no haber perturbaciones el nivel se mantendría constante sin problema. Al igual que en las simulaciones anteriores, se asume una perturbación en el sistema y esta vez es en la válvula de desfogue.

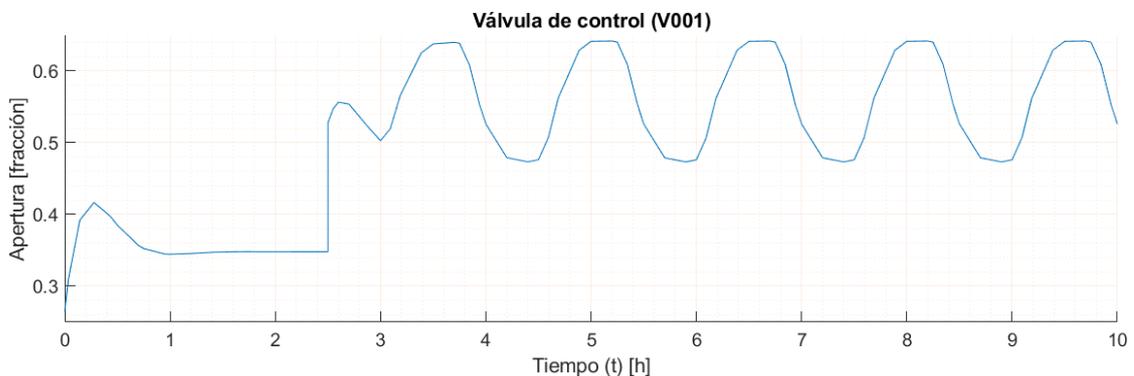


Figura 14-4. Control PID en la Va1

Realizado por: Legña, Pamela, 2021

Esta gráfica muestra el comportamiento del controlador PID en la válvula de alimentación, se puede observar que la válvula se abre para llenar el tanque y alcanzar el nivel de 4m, pero antes de la primera hora del proceso, se va cerrando poco a poco, debido a que va alcanzando en nivel

deseado, también se observa que a las 2.5 horas de haber iniciado el proceso la válvula se abre pasando de 0.35 a 0.55 grados de apertura, permitiendo un mayor paso de flujo de alimentación hacia el tanque, concordando con los valores establecidos en el Set Point. A partir de la tercera hora se observa ciertas oscilaciones respecto al grado de apertura correspondiente al efecto de respuesta del controlador frente a la perturbación ocasionada por la válvula de desfogue. Para encontrar las constantes K_p y K_i , se empleó PID Tuner. Dando los siguientes resultados.

Tabla 8-4. Valores resultantes de las constantes para en control PID de Va1

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Constante Proporcional	0.089887	adimensional
Constante Diferencial	0	adimensional
Constante Integral	7.3743	adimensional
Filtro (N)	100	adimensional

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

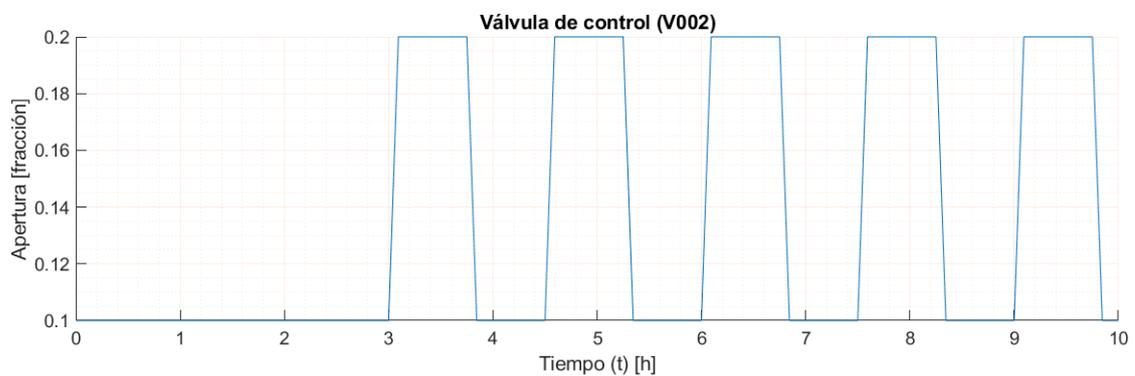


Figura 15-4. Perturbación en Va2

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Control ON/OFF

Se realiza también un control on/off para el nivel, en el mismo tanque, a fin de observar el comportamiento de este tipo de controladores

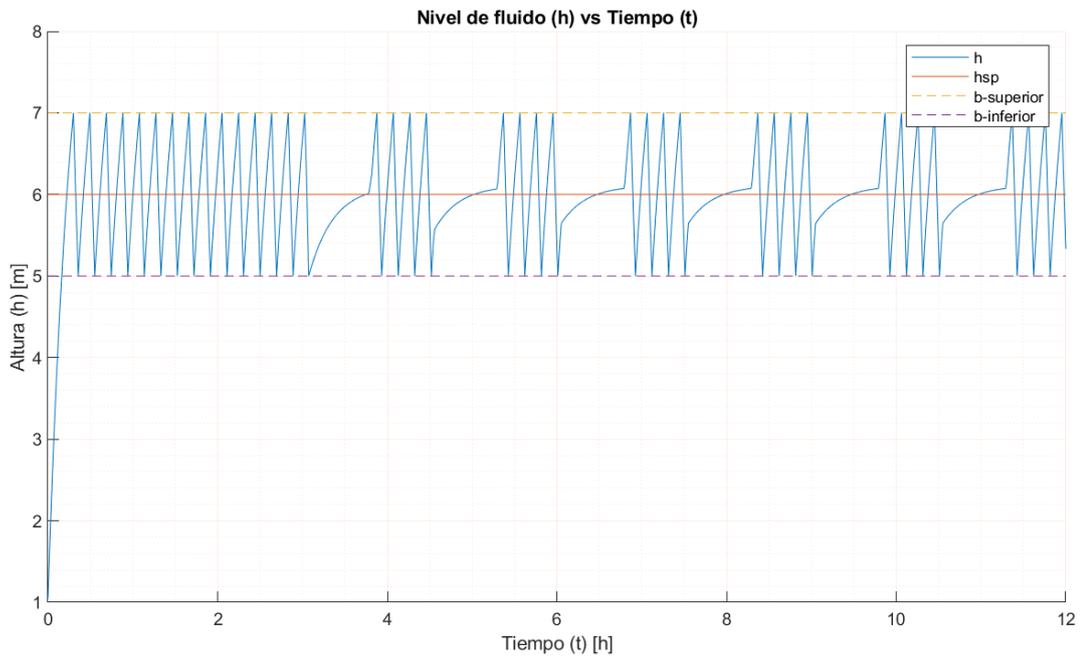


Figura 16-4. Control de Nivel ON-OFF

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

El comportamiento de este controlador cuando no existe una variación de Set Point durante el proceso, es aceptable, esta forma de control maneja un rango de tolerancia o un margen de error para este caso se ha estimado de 1m, a fin de que se observe la variación del nivel. Como respuesta a la perturbación en la válvula de desfogue, se observa el cambio en la forma de control.

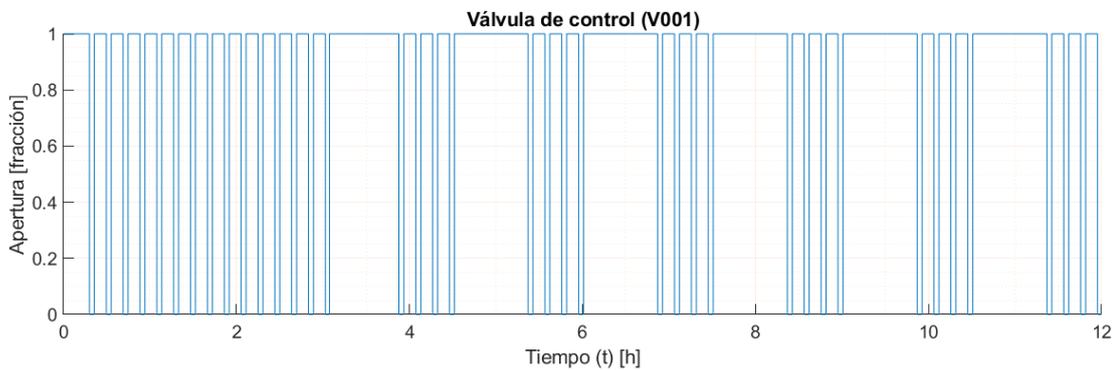


Figura 17-4. Control ON-OFF en la válvula Va1

Realizado por: Legña, Pamela, 2021

Aquí se observa cómo se abre y cierra la válvula a fin de cumplir con los parámetros de control, a diferencia de los controladores PID que existe una variación en el grado de apertura según crea conveniente. El sistema de control se ve afectado por la perturbación que presenta este sistema, ocasionando que existan periodos más prolongados en los que la válvula de

alimentación se mantenga totalmente abierta, con la finalidad de compensar la pérdida del fluido de trabajo como consecuencia de la apertura de la válvula de salida.

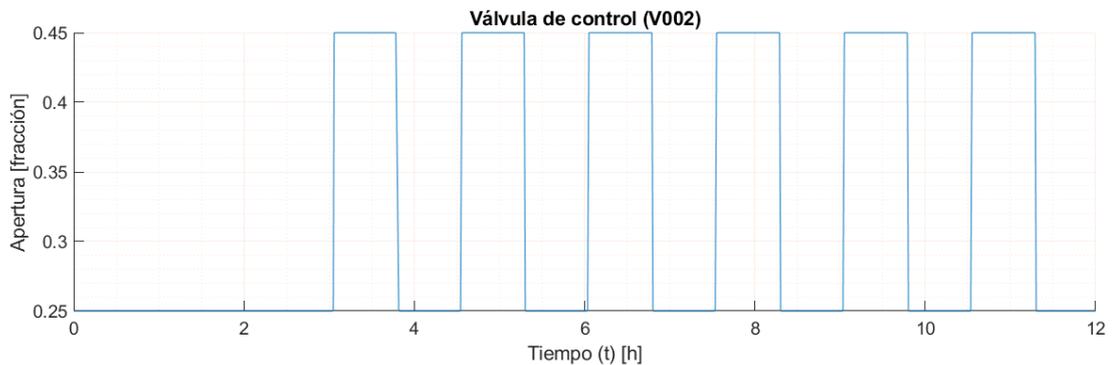


Figura 18-4 Perturbación en la Va2

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Control de temperatura

Para evaluar el comportamiento de los simuladores en el control de temperatura, se realizaron ejercicios bajo ciertos parámetros, dando como resultado lo siguiente.

Sin Control

Un tanque de 3.5 metros cuadrado de sección transversal con una capacidad útil del 92%, tiene que calentar una solución desde una temperatura inicial de 25°C a 80°C. La temperatura del flujo de entrada al proceso varía con el tiempo en forma de un pulso con los siguientes parámetros:

El operador con el fin de mantener la temperatura del tanque en 80°C, manipula la válvula de entrada de vapor a la chaqueta formando de igual manera un pulso con los siguientes parámetros:

Tabla 9-4. Parámetros de la función pulso para la válvula de alimentación.

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Límite inferior del pulso A3	0.15	°C
Amplitud del pulso A3	0.05	°C
Periodo del pulso A3	1200	s
Ancho del pulso A3	50	%
Retraso del pulso A3	0	s

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

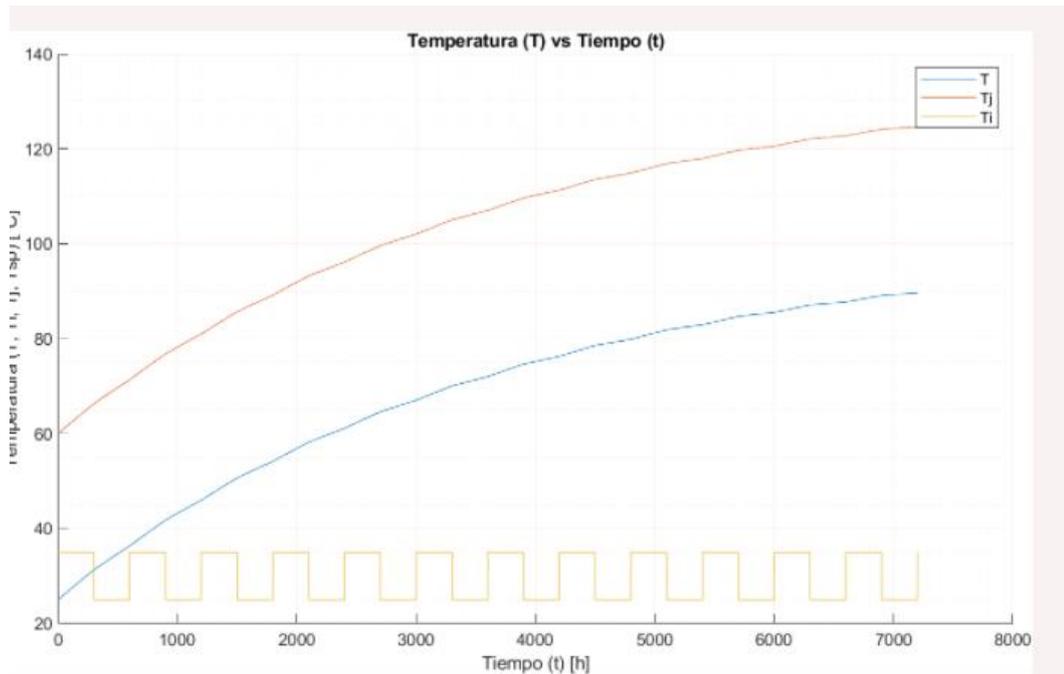


Figura 19-4. Diagrama del proceso sin control

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

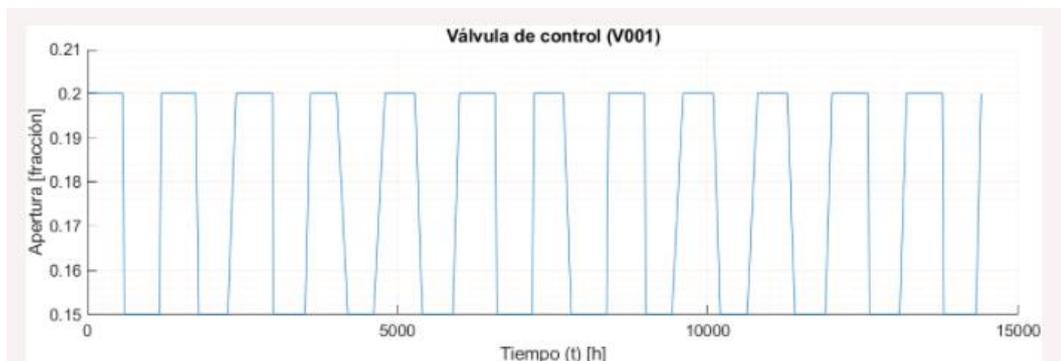


Figura 20-4. Comportamiento de la válvula de alimentación de vapor

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

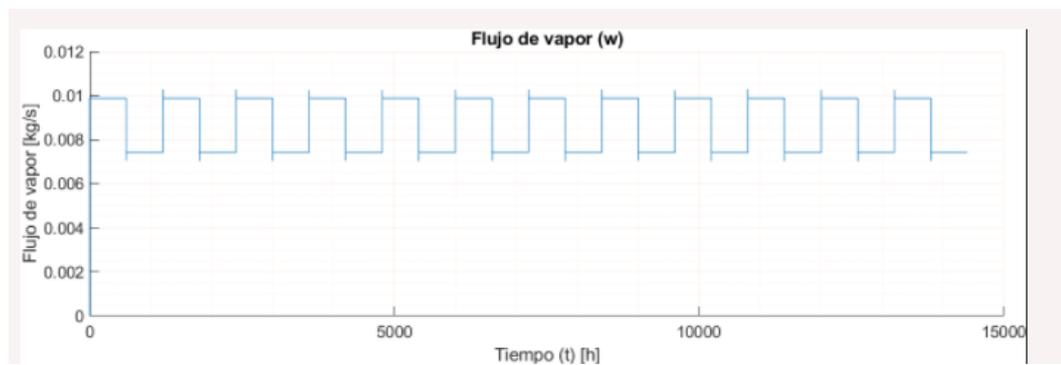


Figura 21-4. Flujo de vapor

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

La acción realizada por el operario no es lo suficientemente efectiva para mantener la temperatura en el valor de 80°C, por lo tanto, no es oportuna su respuesta. Además, se observa que dadas las condiciones del proceso tiene poco efecto sobre la temperatura del fluido dentro del tanque.

Control PID

Un tanque almacena una solución con propiedades similares a las del agua, se desea calentar hasta una temperatura de 65°C, como paso previo a su mezclado con otras sustancias dentro de un reactor. El calentamiento de la solución se realiza mediante vapor a través de una chaqueta. La solución de entrada al tanque está a temperatura normal (25°C) y flujo masico de 1.25 kg/s. Aparte la capacidad del tanque es de 11.31 m³ con una altura total de 15m, y una capacidad efectiva de 87% del volumen total.

El sistema de control que tiene el tanque es un PID colocado en la válvula de entrada del tanque. La válvula de entrada a la chaqueta es una válvula de mariposa accionada por un servomotor y un coeficiente de flujo de 72 m³/h bar. Por otra parte, la válvula de alimentación del tanque es una válvula de compuerta manual.

Tabla 10-4. Parámetros de la función pulso para la válvula de alimentación.

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Límite inferior del pulso A3	25	°C
Amplitud del pulso A3	10	°C
Periodo del pulso A3	600	s
Ancho del pulso A3	50	%
Retraso del pulso A3	0	s

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

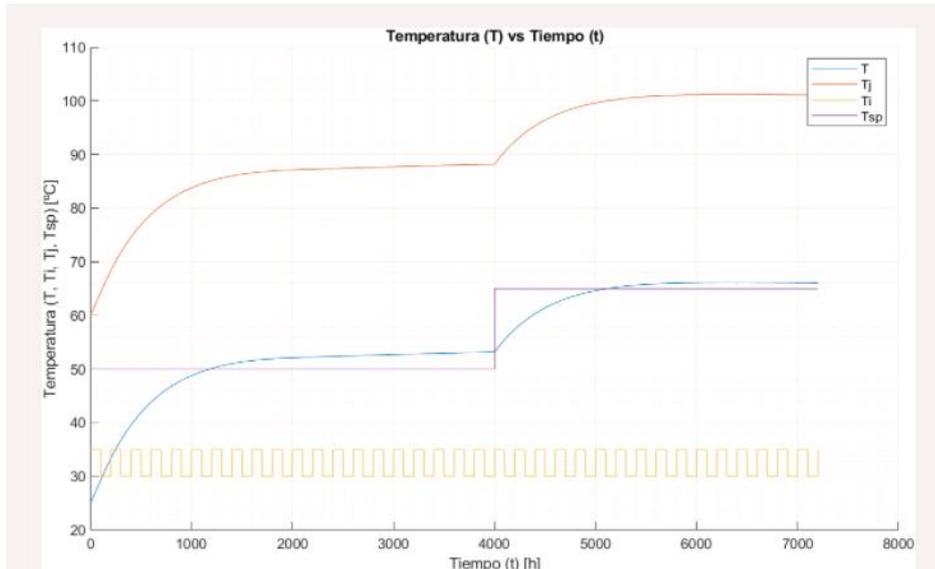


Figura 22-4. Control PID de Temperatura

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

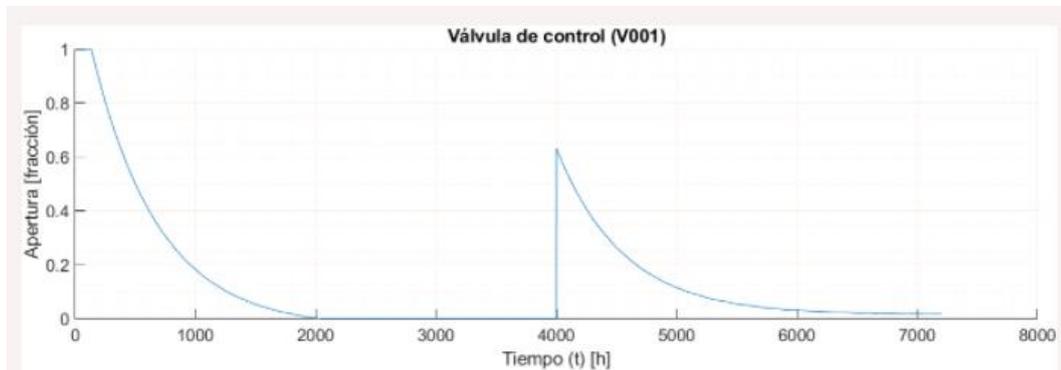


Figura 23-4. Válvula controlada

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

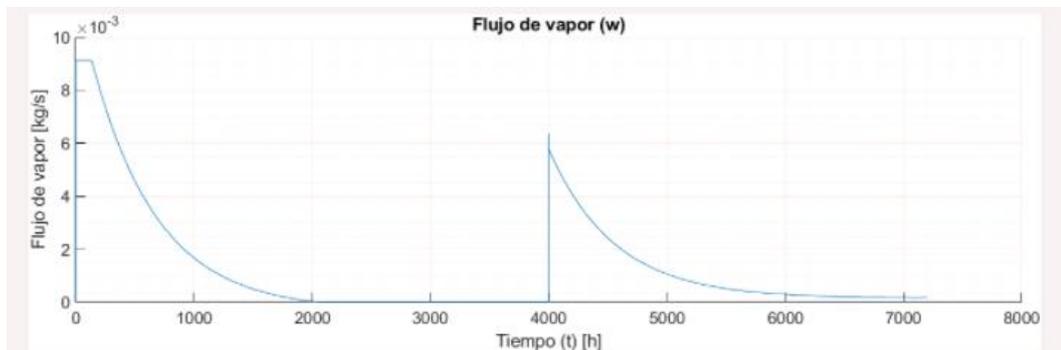


Figura 24-4. Flujo de vapor

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

El sistema de control muestra ser efectivo en el control de la temperatura del fluido, manteniéndola cerca del punto de consigna. La temperatura final del proceso es 65°C, con una

perturbación tipo pulso en la temperatura de entrada. La válvula de control de entrada a la chaqueta muestra ser un factor que permite controlar la temperatura del proceso. Como se observa en las gráficas existe un pequeño error de corrección en la temperatura. Esto es el resultado de la configuración del controlador PID y el tamaño de la válvula de control. La válvula de control de entrada a la chaqueta responde a los cambios de setpoint abriendo o cerrando su apertura de forma proporcional. Esto se puede notar de mejor manera en el cambio de setpoint, donde hay una apertura de casi el 60%, con el objetivo de subir la temperatura del fluido.

Control ON-OFF

Una empresa de alimentos desea realizar un estudio de control de un tanque de calentamiento para una solución de trabajo importante para su proceso de manufactura. Este tanque proviene de XEquipmentSupplier S.A. y sus datos técnicos son los siguientes:

Uno de los requerimientos hechos por la empresa XGreatFoodCompany S.A, es que los tanques tengan un control de nivel de líquido mediante un controlador ON/OFF conectado a la válvula de entrada de vapor. Este controlador debe permitir ingresar un setpoint y una tolerancia.

La empresa también proporciona ciertos datos operativos como:

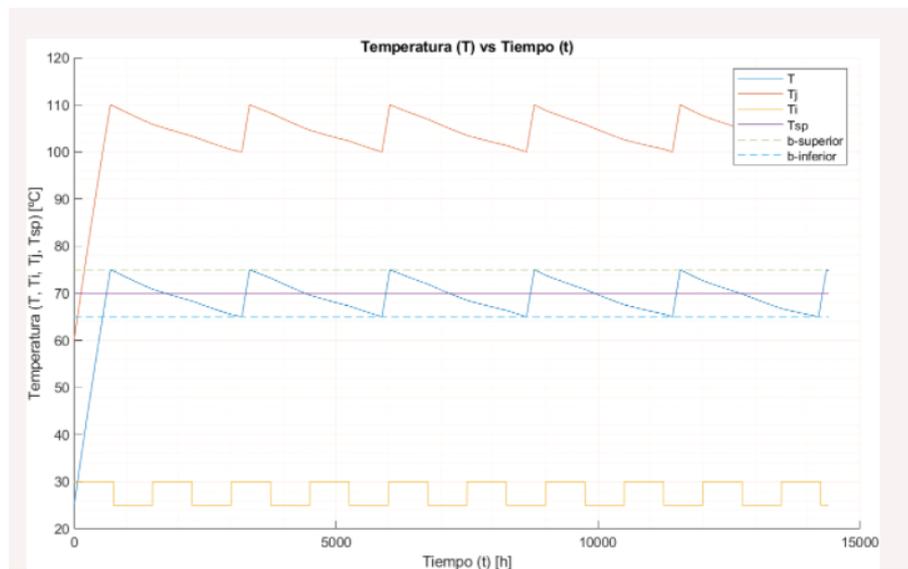


Figura 25-4. Control on-off de Temperatura

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

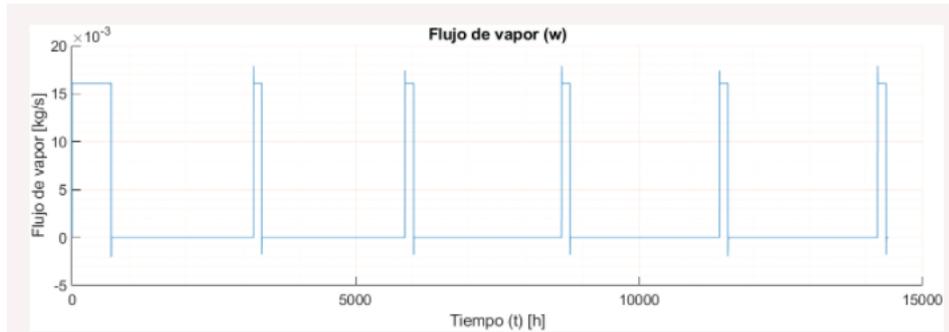


Figura 26-4. Flujo de vapor con el controlador on-off

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Tabla 11-4. Valores para el control On-off

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura del flujo de entrada al tanque	25	°C
Temperatura operativa del tanque	70	°C
Margen de error deseado para el control	+/-5	°C
Capacidad útil del tanque mínima	25400	L
Margen mínimo de volumen en el tanque	12	%

Realizado por: Legña, Pamela, 2021.

Los resultados muestran que el sistema de control es adecuado para mantener la temperatura del tanque dentro del rango de control de $70 \pm 5^\circ\text{C}$. Por tanto, es factible para la empresa adquirir este equipo al proveedor mencionado.

CONCLUSIONES

- Se modeló y simuló un tanque de mezclado con calentamiento basado en las funciones de transferencia obtenidas de su balance de masa y energía en el software de Matlab, donde se obtuvo como resultado una herramienta didáctica que será empleada en la asignatura de control automático de procesos.
- Después de una revisión bibliográfica, donde se compararon varios softwares empleados en la simulación de procesos, se eligió trabajar con Matlab, al ser la plataforma más idónea para el desarrollo del trabajo, debido a varios aspectos, por ejemplo: usa un lenguaje de programación sencillo, Matlab-Simulink es de fácil utilización con el desarrollo de los diagramas de bloques que permiten interpretar de forma clara el comportamiento dinámico del sistema, además la herramienta que ofrece este software llamada App Designer es de mucha utilidad al momento de desarrollar la interfaz gráfica gracias a los elementos didácticos que tiene disposición del usuario.
- Para llevar a cabo este proyecto se modeló el sistema a partir de las funciones de transferencia que se obtuvieron de los balances de masa y energía, para representarlos en forma de diagrama de bloques y posteriormente desarrollarlos en el software Simulink con los controladores PID y ONOFF, tanto para el control de nivel como para el de temperatura para un tanque de mezclado con calentamiento.
- Mediante la utilización de la herramienta App Designer que ofrece Matlab, se desarrolló la interfaz gráfica basada en el modelo matemático del proceso de estudio, en cuya estructura se encuentran todos los elementos necesarios para la correcta interpretación del proceso simulado, de tal modo que sea de fácil comprensión ofreciendo a los usuarios un entorno virtual amigable, interesante y didáctico, haciendo de esta una herramienta didáctica de fácil empleo.
- Se realizó un manual de uso de la herramienta didáctica elaborada, en la que se explica de forma detallada el proceso de instalación y el funcionamiento de la aplicación, también se encuentra descrito un caso de uso práctico con su respectiva interpretación, con el fin de despejar cualquier duda que presenten los usuarios.
- Se validaron los resultados de la modelación a través de un análisis dimensional de las funciones de transferencia, además se compara los valores resultantes de la simulación con el resultado que se obtiene resolviendo el mismo problema de forma manual.

RECOMENDACIONES

- Utilizar una válvula de comportamiento dinámico para la alimentación del tanque en el sistema de control de nivel, a fin de observar su comportamiento y obtener resultados con los cuales comparar.
- Utilizar ecuaciones diferenciales para simular el control de nivel y temperatura, a fin de poder evaluar el comportamiento de los controladores y determinar con cual se desarrollan mejor.
- Una forma de mejorar este sistema, sería aumentar los tanques que se vayan a controlar, haciendo pequeños cambios en el código fuente y reevaluando los balances de masa y energía.
- Realizar los diagramas de bloques con las funciones de transferencia a fin de comprender el funcionamiento global del sistema para luego simular en Simulink

GLOSARIO

Diagrama P&ID: Un P&ID es lo que se define como un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) también conocido del idioma inglés como piping and instrumentation diagram/drawing (P&ID) y es un diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental (Pirobloc 2017) .

Control PID: Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa (NOVUS 2019).

Emular: Hacer funcionar un programa o dispositivo, de la misma manera que otro, procurando igualarla o incluso mejorarla (RAE 2014).

Habilidades espaciales: La percepción espacial es la capacidad que tiene el ser humano de ser consciente de su relación con el entorno en el espacio que nos rodea y de nosotros mismos (Ruiz y Peñalba 2016).

Hidrodinámica: estudia el comportamiento de los líquidos en movimiento, además de

la presión, la velocidad, gasto del líquido y flujo. En el estudio de la hidrodinámica, el teorema de Bernoulli, es de suma importancia (RAE 2018).

Tiempo de Retención Hidráulica: es el tiempo que una unidad de fluido permanece en un recipiente, es decir, el tiempo que el líquido que entra en tu recipiente tarda en salir del mismo (De la Vega Manzano 2020).

Variables de Estado: son la representación moderna que se tiene para describir el comportamiento de los sistemas dinámicos empleados en diferentes áreas de la ingeniería, como ingeniería electrónica, mecánica, química, mecatrónica o control (Castaño 2006).

Simulación: simulación computacional de sistemas, o apenas simulación, consiste en la utilización de ciertas técnicas matemáticas, empleadas en computadores, las cuales permiten imitar el funcionamiento de prácticamente cualquier tipo de operación o proceso del mundo real, es decir, es el estudio del comportamiento de sistemas reales a través del ejercicio de modelos (Campoverde y Guayasamín 2018) .

BIBLIOGRAFÍA

ALFA LAVAL. *Intercambiador de calor: ¿Qué es y cómo funciona?* [blog]. 2015. [Consulta: 11 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-definicion-funcionamiento-tipos-y-aplicaciones/>.

ANTONI, M., BIEL, D., OLIVÉ, J., PRAT, J. y FRANCESC J, S. *Instrumentación Virtual* [en línea]. Barcelona-España: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2005. [Consulta: 31 mayo 2021]. Disponible en: <http://depiitn.edu.mx/wp-content/uploads/2016/02/Tema-6-Instrumentacion-Virtual.pdf>.

ASAMBLEA NACIONAL. *Ley Orgánica De Telecomunicaciones. Registro Oficial Órgano N° 439 del Gobierno del Ecuador* [en línea]. Quito-Ecuador. 2015. [Consulta: 13 julio 2021]. Disponible en: <http://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/Ley-Orgánica-de-Telecomunicaciones.pdf>.

ASAMBLEA NACIONAL DEL ECUADOR. *Código Orgánico De La Economía Social De Los Conocimientos, Creatividad E Innovación. Registro Oficial* [en línea]. Quito-Ecuador. 2016. [Consulta: 13 julio 2021]. Disponible en: <http://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/ec/ec075es.pdf>.

BARKER, M., OLABARRIAGA, S.D., WILKINS-DIEHR, N., GESING, S., KATZ, D.S., SHAHAND, S., HENWOOD, S., GLATARD, T., JEFFERY, K., CORRIE, B., TRELOAR, A., GLAVES, H., WYBORN, L., HONG, N.P.C. y COSTA, A. "The global impact of science gateways, virtual research environments and virtual laboratories". *Future Generation Computer Systems* [en línea], 2019, vol. 95, pp. 240-248. [Consulta: 19 febrero 2021]. ISSN 0167739X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.12.026>.

BENAVIDES BRAVO, P.A. *Diseño de un sistema de tanques de mezcla para fluidos de perforación petrolera en base al estudio de arcillas del Pozo SE01 (Trabajo de titulación).* Universidad San Francisco de Quito, Quito-Ecuador. 2014. pp. 44-45.

BUELVAS, T.C. y ALVEAR, R.C. *Simulación Con Matlab Y Scilab De Un Reactor Tipo Tanque Agitado (Trabajo de titulación).* Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena-Colombia. 2012. pp. 20-22.

CAMPOVERDE, M.G. y GUAYASAMÍN, R. Diseño, simulación y comparación de tres controladores predictivos: Control Predictivo Generalizado, Control por Matriz Dinámica y Predictor de Smith Robusto, aplicados a un reactor de agitación continua y un tanque de mezclado con retardo (Trabajo de titulación). [en línea]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, Ecuador. 2018. pp. 12-15. [Consulta: 2021-02-19]. Disponible en: file:///C:/Users/HOGAR/Downloads/CD-2042.pdf.

CASTAÑO, S. *Variables de Estado o Espacio de Estados*. [blog]. 2016. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-dinamicos-lineales/variables-de-estado-espacio-de-estados/>.

CHACAGUASAY LOBATO, E.M. y PICHO BARRIONUEVO, C.E. Diseño y construcción de una marmita cilíndrica con agitador y fondo esférico con rango de temperatura de 70°C a 80°C para producción de 50 litros de aderezos (Trabajo de titulación). [en línea]. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador. 2016. pp. 10-15. [Consulta: 2021-08-11]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.

CORREA, R. *Decreto_1425-Reglamento-para-la-adquisición-de-software-por-parte-de-las-entidades-contratantes-del-sector-público..pdf*. 2017.

DE LA VEGA MANZANO, P.M. *Tiempo de retención hidráulico*. [blog]. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tus-consultas/definiciones-vDQkW>.

GARCIA MÉNDEZ, J.M. y GUZMAN CORTES, L.A. Diseño de un tanque homogeneizador de chocolate con aislamiento térmico tipo chaqueta de hoyuelos (Trabajo de titulación). Instituto Politécnico Nacional. México D.F- México. 2013. pp. 8-12.

LAÍN, S., CRUZ VÉLEZ, C., VALENCIA, Y., TORRES LOZADA, P. y MONTOYA MESA, C. "Determinación del tiempo de mezcla en un tanque de almacenamiento para agua potable mediante dinámica de fluidos computacionales -CFD-". *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 10, n° 19(2011), (Colombia) pp. 55-66.

MANS TEIXIDÓ, C., TEJERO SALVADOR, J., LÓPEZ SANTÍN, J., FONT SEGURA, X., IRIBARREN LACO, J.I., CAÑAVATE ÁVILA, J., VILLAESCUSA GIL, I., FARRIOL ROIGÉS, X., GASSIOT MATAS, M. y PRADES NEBOT, A. *Guía para el diseño de un perfil de formación Ingeniería química*. Barcelona-España: Agència per a la Qualitat del Sistema Universitari de Catalunya, 2006, pp. 22-24.

MCCABE, W.L., SMITH, J.C. y HARRIOTT, P. *Operaciones unitarias en ingeniería química* [en línea]. 7ª ed. México D.F-Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V, 2007. [Consulta: 24 marzo 2021]. Disponible en: <http://www.sgc.se/rapporter/resources/Evaluation.pdf%0Ahttp://www.springer.com/series/8059%0Ahttps://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjhfLp9KrNAhWKGB4KHftNCfsQFggcMAA&url=https://mediathek.fnr.de/media/>.

MEDINA, G. *Sistemas de control: características, tipos y más.* [blog]. [Consulta: 12 agosto 2021]. Disponible en: <https://tecnoinformatic.com/c-informatica-basica/sistemas-de-control/>.

MERA GRANJA, C. y CHECA GARZÓN, C.J., 2010. Modelamiento, simulación y diseño de controladores para un tanque continuamente agitado presurizado con intercambio de calor (Trabajo de titulación). Universidad San Francisco de Quito, Quito-Ecuador. 2010. pp.53-56.

MORENO ORTIZ, R. y RUIZ HORTA, M., 2003." Modelado, simulación y supervisión de una planta piloto de producción en el entorno ecosim - labview". *Reunión de usuarios de EcosimPro*, n° 2ª (2003), (España) pp. 2-5.

NÁJERA, J.M., HUGO, V. y ESTRADA, M. "Ventajas y desventajas de usar laboratorios virtuales e la educación a distancia". *Educación* [en línea], 2007, (Costa Rica) vol. (31), pp. 91-108. [Consulta: 19 febrero 2021]. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/educacion/article/download/1255/1318/>.

NOVUS. *Productos Electrónicos* [blog]. 2019. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: https://www.novusautomation.com/catalogos/layout_folheto.asp?ProdutoID=936207.

ORTIS TARI, P.M. Diseño de un tanque mezclador con sistema de calentamiento para la producción de protectores solares (Trabajo de titulación). Universitat Jaume I, Castellón,-España.2020. pp. 17-19.

OSORIA CLARO, E., 2018. Diseño de un tanque mezclador para la Unidad Básica de Producción Recuperación de Amoniaco (Trabajo de titulación). Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Facultad Metalurgia y Electromecánica, Departamento de Mecánica. Moa-Cuba. 2018. pp. 5-9.

PÉREZ CERVANTES, M. y SAKER BARROS, A. "Importancia del uso de las plataformas virtuales en la formación superior para favorecer el cambio de actitud hacia las TIC: estudio de

caso: Universidad del Magdalena, Colombia". *Revista Iberoamericana de Evaluación Educativa*, vol. 6, (2013). (Colombia) pp. 153-166.

PIROBLOC. *¿Qué es un P&ID?* [blog]. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.pirobloc.com/blog-es/que-es-un-piping-and-instrumentation-diagram/>.

QUISPE RUIZ, F., 2013. *Mecanismos de transmisión de calor*. [en línea]. Pamplona- España: Universidad de Pamplona, 2013. [Consulta: 11 agosto 2021]. Disponible en: [file:///C:/Users/prueba/Downloads/Mecanismos de transmisión de calor \(CONDUCCION, CONVECCION, RADIACION\).pdf](file:///C:/Users/prueba/Downloads/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20(CONDUCCION,%20CONVECCION,%20RADIACION).pdf).

RAE. *emular* [blog]. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/emular>.

RAE. *hidrodinámico*. [en línea]. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/hidrodinámico>.

RAMÍREZ, J., SOTO, D., LÓPEZ, S., AKROYD, J., NURKOWSKI, D., BOTERO, M.L., BIANCO, N., BROWNBIDGE, G., KRAFT, M. y MOLINA, A. "A virtual laboratory to support chemical reaction engineering courses using real-life problems and industrial software". *Education for Chemical Engineers*, vol. (33), 2020,(Colombia) pp. 36-44.

RODRÍGUEZ UMAÑA, L.A. "Modelo del control de nivel y caudal de líquido en un depósito cilíndrico usando la herramienta Simulink de Matlab". *Escuela de ingenierías y arquitectura*. [en línea], 2013, (9), pp. 7-8. [Consulta: 19 febrero 2021]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4762998>.

RUIZ, R.A. y PEÑALBA, D. *Habilidades espaciales*. [blog]. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/005187846a121fa23d589>.

SILVA, F. *Marco Legal del Software Libre en Ecuador*. [blog]. [Consulta: 13 julio 2021]. Disponible en: <http://www.asle.ec/marco-legal-del-softwarelibre-en-ecuador/>.

SMITH, CARLOS A; CORRIPIO, A. *Control Automático de procesos*. México: Limusa, 1991, pp. 177-190.

TAMAYO VELEZ, M.A., MURILLO HOYOS, H.A. y POSADA WILLIAMSON, D., 2016. "Laboratorios Virtuales: Modelos para el aprendizaje virtual de automática industrial basados en LabVIEW". *LACCEI Annual International Conference: "Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?"*, n° 13 (2016).(Republica Dominicana). pp. 1-4.

TRENTSIOS, P., WOLF, M. y FRERICH, S., 2020. "Remote Lab meets Virtual Reality - Enabling immersive access to high tech laboratories from afar". *Procedia Manufacturing* [en línea], vol. (43), 2019, pp. 25-31. [Consulta: 19 febrero 2021]. ISSN 23519789. DOI 10.1016/j.promfg.2020.02.104. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.104>.

TSOLUCIONA. *Tipos de intercambiadores de calor* [blog]. [Consulta: 11 agosto 2021]. Disponible en: <https://t-solucion.com/tipos-intercambiadores-calor/>.

VALIENTE, A. y GALDEANO, C. "Habilidades espaciales y competencias en Ingeniería Química". *Educacion Química*, vol. 25 (2014), (México) pp. 154-158.

VILLAJULCA, J.C. *Empezemos con los elementos finales de control: Válvulas de Control* [blog]. [Consulta: 12 agosto 2021]. Disponible en: <https://instrumentacionycontrol.net/empezemos-con-los-elementos-finales-de-control-valvulas-de-control/>.

ANEXOS

ANEXO A: INTRODUCCIÓN AL MANUAL DE USUARIO.

Introducción

TankSim es una aplicación desarrollada con el uso de MATLAB/Simulink, que permite simular el proceso de llenado de un tanque de agua. El modelo matemático está basado en funciones de transferencia que requieren ciertos parámetros para representar proceso, como: Área transversal del depósito, coeficientes de válvulas, condiciones iniciales y perturbaciones. En la figura 1 se observa la pantalla principal de la aplicación.

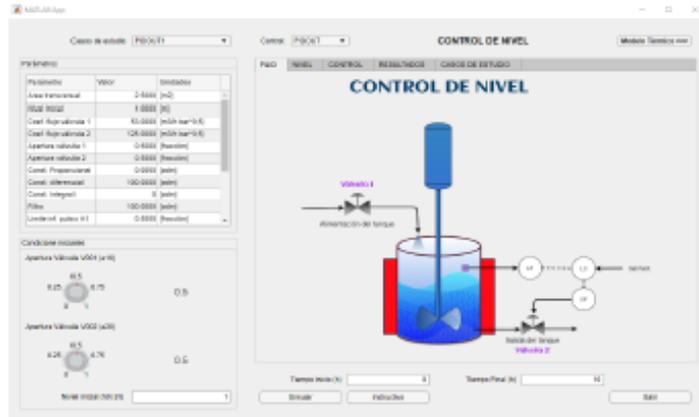


Figura 1. Pantalla principal de la aplicación LevelControlModel

La primera parte del desarrollo del modelo matemático fue obtener las ecuaciones que representan el modelo en base a funciones de transferencia. En el caso de este modelo de llenado de tanque se obtuvo una única ecuación con el grado de apertura de válvula, como variables de entrada.

$$\dot{h}_s = \frac{k_1}{\alpha_1 s + 1} u_{1s} - \frac{k_2}{\alpha_2 s + 1} u_{2s}; k_1 = \frac{2k_{a1} \sqrt{2h}}{k_{v2} \alpha_2}; k_2 = \frac{4gh}{\alpha_2}; \alpha_1 = \frac{2A_T \sqrt{2gh}}{k_{v2} \alpha_2}$$

Como se muestra en la ecuación el flujo de entrada es regulado por una válvula de comportamiento lineal, es decir el coeficiente de flujo es independiente de la presión. Mientras que la salida es controlada por una válvula que es afectada por la presión de columna de fluido (no lineal).

Esta ecuación se modeló usando Simulink para ejecutar el modelo pasándole los parámetros de ajuste a través de una interfaz grafica (App designer). Como el objetivo final de esta aplicación es su uso por parte de estudiantes en la cátedra de Control de Procesos, se desarrolló variantes de este modelo que permiten estudiar su comportamiento en el caso de: no tener ningún control, control PID y control ON/OFF. Posteriormente se explica con mayor detalle las variantes de modelo desarrolladas, y como se utilizan en la aplicación.

Instalación

Para instalar la versión standalone de la aplicación LevelControlModel se requiere cumplir con ciertos requisitos mínimo para ejecutarla. En el caso de que se quiera utilizar un computador que no cumpla con los requisitos mínimos el instalador ni impedirá la instalación, es decisión del usuario proceder. Se sugiere para el correcto funcionamiento de la aplicación cumplir con los siguientes requisitos mínimos:

- Sistema operativo: Microsoft Windows 7, 8 o 10
- Capacidad: 20 GB HDD o SSD
- Memoria RAM: 4GB DDR3
- Procesador: Intel o AMD x86-64 con soporte de instrucciones AVX2.
- Video: Soporte para OpenGL 3.3 recomendado con 1 GB en GPU.

El procedimiento de instalación de la aplicación es el siguiente:

1. Localizar el archivo de instalación TankSim.exe, y ejecutarlo en modo administrador. NOTA: Dentro del archivo .rar con los archivos de instalación existe tres folders %for_redistribution%, %for_distribution% y %for_testing%, el instalador con el ejecutable que incluye el Runtime es el folder %for_redistribution%.

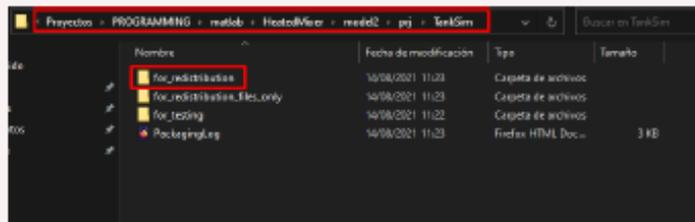


Figura 2. Pantalla principal de la aplicación LevelControlModel

2. Seleccionar la dirección de instalación de la aplicación, la dirección por defecto es %C:\Archivos de programas%. En caso de colocar una nueva dirección colocar el nombre del folder contenedor que por defecto es %ESP00CH-IQ%.
3. Instalar el Runtime de MATLAB, es aconsejable instalarlo en la dirección por defecto.
4. Ejecutar instalación, en caso de que el Runtime esté instalado el proceso pasa a la instalación de la aplicación directamente.
5. Finalizar la instalación. En este punto se puede activar la opción de ejecutar el programa o abrir el archivo Log de instalación.
6. En el caso de existir un problema en el proceso de instalación se recomienda desinstalar y volver a realizar el procedimiento desde el punto 1.

ANEXO B: FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

La aplicación en su conjunto sigue la arquitectura mostrada en la figura YY. Este diagrama muestra como interactúa el usuario con las UI, y a su vez como esta interactúa con otros elementos de la aplicación.

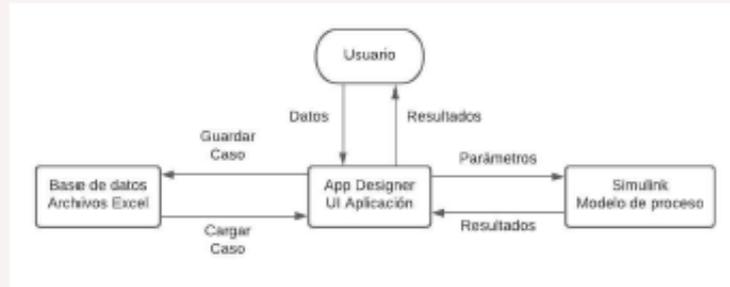


Figura 2. Pantalla principal de la aplicación LevelControlModel

El flujo de la información comienza en el usuario el cual proporciona datos para configurar el caso de simulación. Estos datos se ingresan a través de la UI, mediante campos disponibles en la aplicación. Estos datos se convierten en parámetros con los se configura un modelo de Simulink, que devuelve como resultados los valores de las variables configuradas dentro de cada modelo como salidas. Estas salidas son ordenadas y presentadas en la interface gráfica mediante diagramas o tabas de resultados. El otro flujo de información se da cuando el usuario desea guardar la configuración de un caso en la base de datos de la aplicación. Los registros ingresan como datos que se acumulan o apilan en tablas construidas en archivos de Excel. La aplicación también permite borrar casos; existen casos que están guardados por defecto en la base de datos que no se pueden eliminar.

Interface gráfica de usuario

La aplicación TankSim, consta de 3 Interfaces gráficas: LevelControlModelUI, TemperatureControlModel y HelpViewer. Estas ventanas se encuentran divididas en varios grupos de controles divididos en áreas. Estas interfaces gráficas de usuarios fueron desarrolladas usando App designer de MATLAB. La primera ventana en ejecutarse es la del modelo de control de nivel de fluido, y tiene las siguientes secciones.

1. Control para la selección de los casos de uso del método de control seleccionado.
2. Tabla de parámetros del modelo, tiene campos editables que permiten visualizar el nombre o denominación, el valor asignado y las unidades.
3. Panel de controles varios, en este caso contiene dos diales que definen la apertura inicial de las válvulas de entrada y salida de líquido del tanque. Si se modifica su posición los valores de la tabla de parámetros se actualiza al valor asignado. Igualmente, si se modifica el valor de apertura de las válvulas desde la tabla se actualiza la posición de estos controles.
4. Control para la selección del método de control. Existen 5 opciones: Sin control (NOCONT), Control PID Feedback sobre la válvula de entrada (PIDIN), Control PID Feedback sobre la válvula de salida (PIDOUT), Control ON/OFF sobre la válvula de entrada (ONOFFIN) y Control ON/OFF sobre la válvula de salida (ONOFFOUT)
5. Área de controles de visualización de resultados y base de datos. En esta área se presentan las gráficas y la tabla de los resultados de la simulación. En este caso existen una gráfica de nivel de líquido y otra con los valores de las señales de las válvulas (apertura vs tiempo).
6. Área de controles de ejecución de simulación. En esta sección se define el tiempo de simulación inicial y final, y a su vez se puede ejecutar la simulación. Además, se tiene acceso al instructivo y un botón para cerrar la ventana.
7. Botón de ejecución de la aplicación de control de temperatura. Solo es ejecutable en cuando se tiene resultados de modelo de control de nivel. Al momento de presionar este botón también envía la información que comparten los dos modelos con el fin de modelar el mismo tanque.

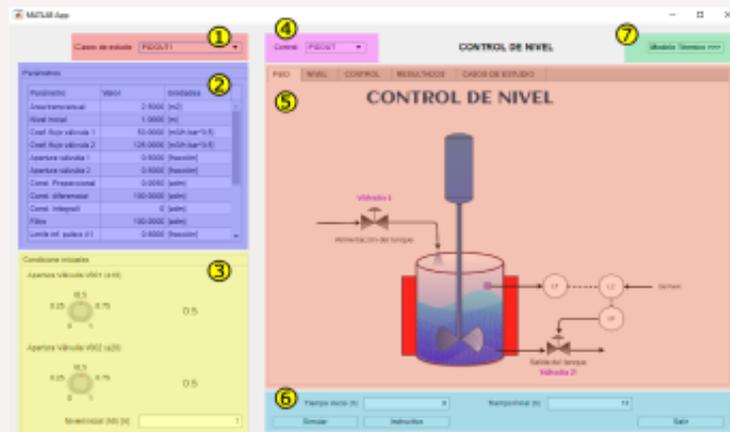


Figura 3. Secciones de la pantalla principal de la aplicación LevelControlModel

Las interfaces gráficas de la aplicación siguen la distribución mostrada en la figura YY. Es una distribución horizontal que tiene dos áreas definidas. Un bloque columna con los controles de configuración del caso de simulación (A) y un segundo bloque columna con los controles que manejan los resultados, configuración de control y base de datos (B).

1. Control de selección de caso de estudio. La aplicación tiene por defecto un cierto número de casos que se pueden ejecutar al momento de seleccionarlo en la lista que se despliega. En el caso de agregar un caso nuevo, configurado por el usuario, el nombre del caso asignado aparecerá en esta lista.
2. Tabla de parámetros de configuración del modelo, es una tabla similar a la tabla de la aplicación anterior.
3. Control de selección de método de control. En este caso se tiene 3 alternativas: Sin control (NOCONT), control PID sobre la válvula de entrada de vapor (PIDIN) y control ON/OFF sobre la válvula de entrada de vapor (ONOFFIN).
4. Área de controles de visualización de resultados y base de datos. En el caso de este modelo se tiene la gráfica de temperatura, las señales de control de las válvulas y una tabla de resultados.
5. Área de controles de ejecución de la simulación, y funciones varias. Similar a la aplicación anterior.

ANEXO C: PROCESO DE SIMULACIÓN.

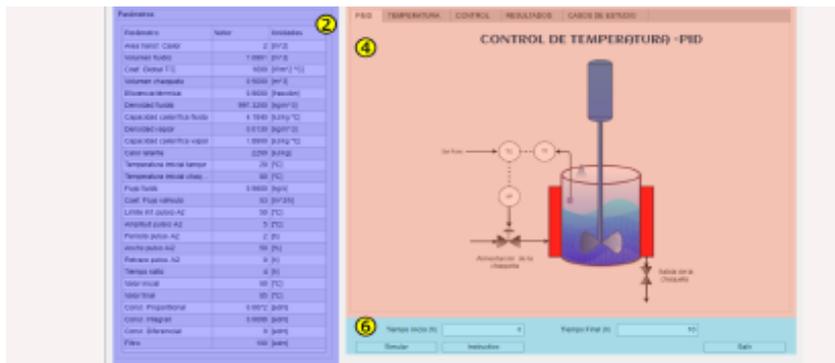


Figura 4. Secciones de la pantalla principal de la aplicación LevelControlModel

Desde cualquiera de las aplicaciones anteriores se puede llamar a la ventana de la documentación de la aplicación llamada HelpViewer. La documentación está hecha en formato web y contiene varios tópicos que permitirán al usuario las funcionalidades, capacidades y limitaciones de la aplicación. Así como comprender los aspectos teóricos de los modelos, y algunos casos de estudio. Esta ventana solo tiene dos áreas:

1. Barra de navegación o tabla de contenidos. Esta área contiene una lista de los temas que se describen en la documentación.
2. Área de presentación de información. En el que se muestra la información, imágenes, animaciones, etc.

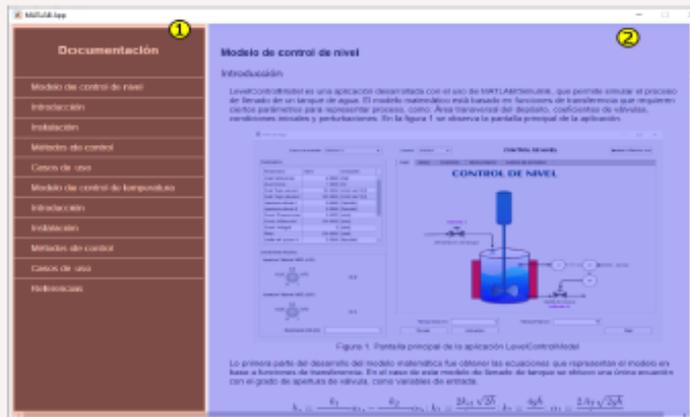


Figura 4. Secciones de la pantalla principal de la aplicación LevelControlModel

Proceso de simulación

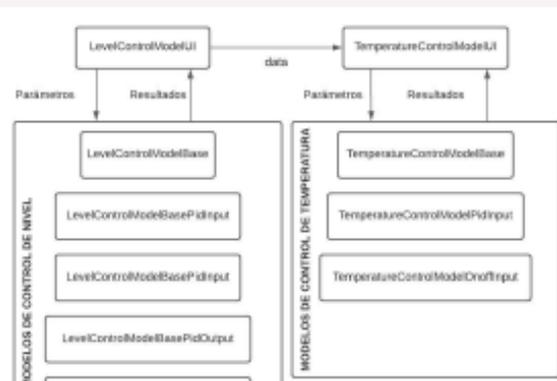
El proceso de simulación sigue el diagrama mostrado en la figura YY El proceso inicia cuando se ejecuta la UI de control de nivel, que posee cinco modelos con los que se puede trabajar en el control de nivel de fluido. Entre los modelos implementados se encuentran:

Para el control de nivel:

- Modelo sin sistema de control (LevelControlModelBase) [NOCONT]
- Modelo con control PID en la entrada (LevelControlModelPidInput) [PIDIN]
- Modelo con control PID en la salida (LevelControlModelPidOutput) [PIDOUT]
- Modelo con control ON/OFF en la entrada (LevelControlModelOnoffInput) [ONOFFIN]
- Modelo con control ON/OFF en la salida (LevelControlModelOnoffOutput) [ONOFFOUT]

Para el control de temperatura:

- Modelo sin sistema de control (TemperatureControlModelBase) [NOCONT]
- Modelo con control PID en la entrada (TemperatureControlModelPIDInput) [PIDIN]
- Modelo con control ON/OFF en la entrada (TemperatureControlModelOnoffInput) [ONOFFIN]



ANEXO D: CONTROL DE NIVEL DE FLUIDO

Control de nivel de fluido

El flujo del proceso empieza con la aplicación LevelControlModelUI, que ejecuta la simulación de los distintos modelos de proceso para el control de nivel de fluido (5 modelos diferentes). El proceso es el siguiente:

1. La aplicación TankSim V1.0 ejecuta la UI LevelControlModelUI y permite al usuario interactuar con los distintos controles y con la base de datos de casos. El usuario selecciona un caso por defecto o guardado, o por el contrario edita los parámetros del modelo y genera un nuevo caso. Los usuarios además deben escoger el tipo de control a aplicar (PIDIN, PIDOUT, ONOFFIN, ONOFFOUT y NOCONT). Luego en el menú dropdown se listan los casos almacenados en la base de datos para ese tipo de control. Seleccionando una de las opciones los parámetros se cargan en la tabla de parámetros. NOTA: Estos parámetros se pueden guardar en la base de datos de casos asignándole un nombre (ver Sección Guardar y eliminar casos de estudio).
2. Cuando el usuario está seguro de haber configurado de forma adecuada los parámetros del modelo, se presiona el botón SIMULAR, para correr el modelo. El botón procede a bloquearse para no permitir presionar varias veces, para evitar generar un error por doble ejecución del modelo. NOTA: El tiempo que tarde la aplicación en obtener resultados depende de las especificaciones del computador en el que se ejecuta la aplicación. Por lo general suele estar por debajo de los 60 segundos.
 - o Cuando el modelo ejecuta la simulación recoge los datos de los controles donde están asignados, construye una estructura params que se pasa como argumento a los distintos modelos de Simulink.
 - o Los modelos de Simulink se ejecutan con los parámetros pasados por la UI, y devuelven una estructura out (simOut), con los resultados de la simulación. Dependiendo del modelo se tiene diferentes estructuras de los resultados.
3. Los resultados se grafican en los UIAxes de la aplicación (ver código fuente).
4. Con los resultados generados y guardados, se puede: 1) Guardar los resultados como un archivo Excel, o 2) se puede migrar los parámetros compartidos con el modelo de control de temperatura. NOTA: no se puede ejecutar la UI TemperatureControlModelUI, sin tener resultados en la UI LevelControlModelUI.

Ambos bloques columnas tienen varias secciones donde se colocan controles que permiten ingresar datos, ejecutar acciones y mostrar resultados. La primera sección

Control de temperatura

1. Con los resultados obtenidos del control de nivel de fluido se puede continuar con la aplicación de control de temperatura. Para ejecutar la aplicación de control de temperatura se usa el botón "Modelo Temperatura >>>". Este botón migra los parámetros compartidos entre los dos modelos y ejecuta la UI TemperatureControlModelUI.
2. Cuando la UI se ejecuta el usuario tiene las mismas funcionalidades que con la aplicación de control de nivel: configuración de parámetros de modelo, ejecución de casos de estudio y base de datos para casos de estudio.
3. Cuando los parámetros se encuentran configurados de tal forma que refleje las intenciones del usuario, este puede guardar el caso o ejecutarlo.
4. Los resultados se grafican en los UIAxes de la aplicación (ver código fuente).
5. Con los resultados generados y guardados, se puede: 1) Guardar los resultados como un archivo Excel, o 2) se puede migrar los parámetros compartidos con el modelo de control de temperatura. NOTA: no se puede ejecutar la UI TemperatureControlModelUI, sin tener resultados en la UI LevelControlModelUI.

Ambos bloques columnas tienen varias secciones donde se colocan controles que permiten ingresar datos, ejecutar acciones y mostrar resultados. La primera sección

Casos de estudio

- Control de nivel de fluido

Caso de estudio 1 – Control de nivel de fluido [NOCONT]

A un tanque cilíndrico de 8 metros cúbicos que almacena una solución salada, se le instalan dos válvulas con coeficientes de flujo de 398.76 m³/h bar en la entrada y 127.155 m³/h bar en la salida. El tanque funciona correctamente hasta que un fallo en la válvula de entrada genera una perturbación que lo saca del estado estacionario. El tanque no tiene sistema de control, pero se encontraba ajustado manualmente para mantener el nivel de fluido constante.

Tiempo de simulación:

Se desea simular el proceso para un tiempo de 10 horas.

Perturbación:

La válvula de entrada se encontraba abierta en un 60% de su apertura total al inicio del proceso. Pero a partir del tiempo 3 horas, la válvula sufre una avería que hace que se abra y cierre en un 10% desde su valor inicial (60%). El período del pulso generado es de 1.0 horas con un ancho de flujo del 50%.

Acción de control:

El operario encargado del tanque intenta controlar el nivel de fluido de forma manual abriendo la válvula de salida del tanque 0.05 horas después de que la válvula de entrada sufra la avería. Abre la válvula desde un 10% hasta un 20%, intentando igualar el movimiento de la apertura de la válvula de entrada. El resultado es un pulso de 1.5 horas con un ancho de pulso de 50%.

Con los datos indicados determine los siguientes literales:

1. Obtenga los resultados dinámicos del nivel de fluido dentro del tanque.
2. ¿El proceso está bajo control o existe un desbordamiento tomando en cuenta que el tanque tiene una altura de 8,5 metros?
3. ¿Es correcta la acción de control realizada por el operador?
4. ¿Es controlable el proceso?

ANEXO E: RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO 1

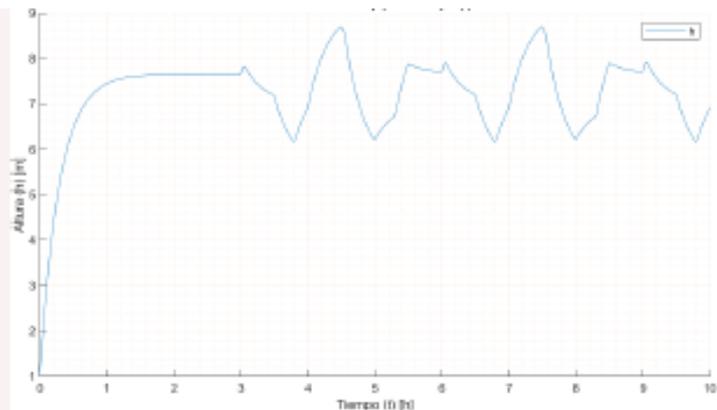


Figura 2. Resultados de nivel del caso de estudio 1.

Como se muestra en la figura YY la acción del operario no le permite mantener bajo control el nivel de fluido. Como el tanque tiene una altura de 8,5 metros se observa que en dos ocasiones supera este nivel. Esto significa que en dos ocasiones el operador no pudo controlar a tiempo el nivel de fluido y sufrió derrame del contenido.

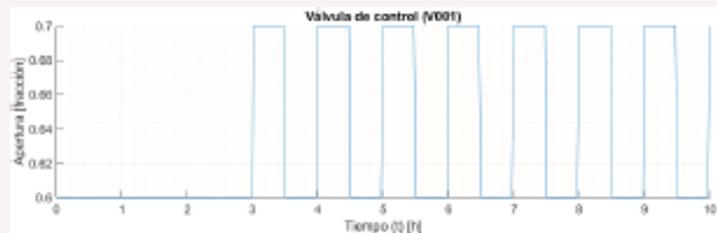


Figura YY. Señal de fallo de la válvula de entrada.

Según muestran las gráficas el proceso no se encuentra bajo control, de hecho, no se puede mantener un nivel de fluido estable. Esto puede perjudicar la operación posterior al equipo o a su vez la calidad del producto.

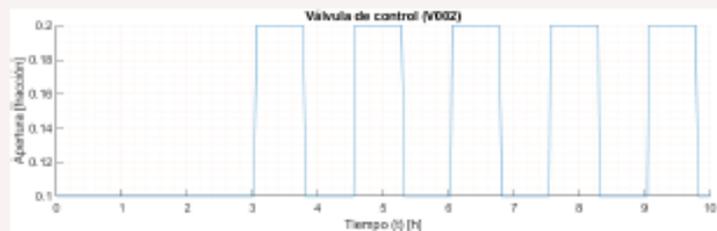


Figura YY. Señal de control del operario sobre la válvula de salida.

Caso de estudio 2 – Control de nivel de fluido [PIDOUT]

Como consecuencia del fallo en el tanque del caso de estudio 1 de nivel de fluido, se decide instalar un sistema de control PID, con acción de control sobre la válvula de salida del tanque. La válvula de control instalada tiene el mismo coeficiente de flujo (127.155 m³/h) y se instala una válvula de entrada con 398.765. El ajuste del controlador PID, tiene las siguientes constantes:

Durante la prueba del controlador se manipula apertura de la válvula de entrada bajo las mismas condiciones del pulso anterior (fallo).

Tiempo de simulación:

Se desea simular el proceso para un tiempo de 10 horas.

Perturbación:

Se repite la perturbación de fallo del caso 1.

Acción de control:

Ajustado por el controlador PID.

Con los datos indicados determine los siguientes literales:

1. Obtenga los resultados dinámicos del nivel de fluido dentro del tanque.
2. ¿El proceso está bajo control o existe un desbordamiento tomando en cuenta que el tanque tiene una altura de 8,5 metros?
3. ¿Controla correctamente el nivel de fluido el controlador PID?

ANEXO F: CASO DE ESTUDIO 2

Los resultados muestran que dada la configuración del PID ($P=0.0621$, $I=0$, $D=0$, $N=7.3743$), muestra que al inicio no se puede controlar de buena manera el aumento de nivel de fluido. El sistema de control reacciona de lentamente y devuelve el nivel al setpoint inicial (4m). Luego en el tiempo 2.5h el setpoint cambia a 6m, y el controlador lleva el nivel cerca del setpoint. Las perturbaciones hacen que el nivel caiga periódicamente, como respuesta el controlado intenta devolver el nivel al setpoint pero no lo logra por el nivel de afectación de la perturbación.

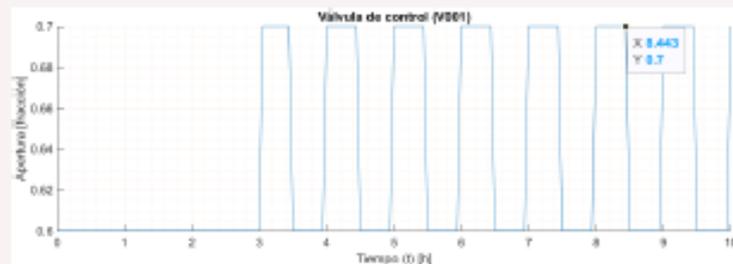


Figura YY. Señal de fallo de la válvula de entrada.

La perturbación que simula el fallo de la válvula, es simular al caso de estudio 1. El resultado se muestra en la figura YYY.

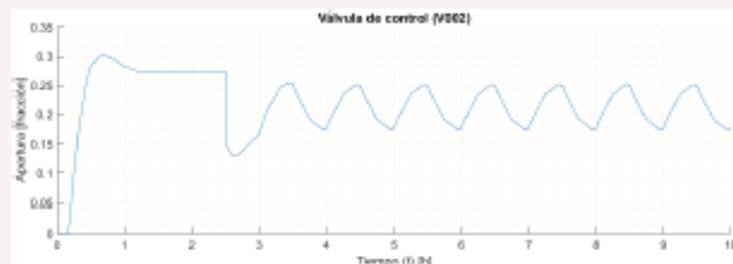


Figura YY. Señal de fallo de la válvula de salida.

A diferencia del método manual de control el PID ajusta de mejor manera la apertura de la válvula, aun así, el control del nivel por la acción de la perturbación es satisfactorio; pudiendo mejorar con un mejor ajuste de los parámetros. Ahora se nota el efecto que tiene el fallo de la válvula en el nivel del tanque de depósito. Por lo tanto, la propuesta de control tiene un desempeño satisfactorio, pero puede mejorar.

Caso de estudio 3 – Control de nivel de fluido [PIDIN]

La empresa XCompany S.A desea automatizar sus tanques de depósito con un solvente que usan en su proceso de fabricación. El tanque que almacena esta sustancia tiene un diámetro de 2.8 metros y una altura de 4.5 metros. El volumen utilizable del tanque es del 90%, y el volumen mínimo de operación es del 15%.

Como respuesta a la licitación de la empresa XCompany S.A, YControlCompany S.A propone aplicar un control sobre la válvula de entrada al tanque (PID IN). Propone instalar los siguientes dispositivos:

- o 1 válvula de compuerta con accionador neumático con un coeficiente de flujo de 398.7650 m³/h bar, para instalarla en la entrada.
- o 1 válvula de compuerta de acción manual, con un coeficiente de flujo de 127.1550 m³/h bar, para instalarla en la salida.
- o 1 controlador PID de tipo ideal, con coeficientes: $K_p=0.0899$, $K_i=7.3743$, $K_d=0$ y $n=100$.

El periodo propuesto para la evaluación de la propuesta es de 72 horas, y se le aplicara una perturbación en la válvula de salida de tipo pulso durante este periodo de tiempo. El pulso de salida tiene los siguientes parámetros:

- o Limite inferior: 10%
- o Amplitud: 10%
- o Ancho: 50%
- o Periodo 1.5 horas
- o Retraso: 3.05 horas

El nivel inicial de líquido en el tanque es de 1.5 metros, y el setpoint es 4 metros hasta el tiempo 2.5m y a 6m por el resto la prueba.

En base a los datos provistos anteriormente determinar:

1. Obtenga los resultados dinámicos del nivel de fluido dentro del tanque.
2. ¿La propuesta de la empresa YControlCompany S.A. cumple el objetivo planteado?
3. ¿Si la propuesta no funciona cual sería el cambio que se debería realizar para que funcione?
4. ¿Cuál sería su propuesta de control PID IN?

ANEXO G: CASO DE ESTUDIO 4

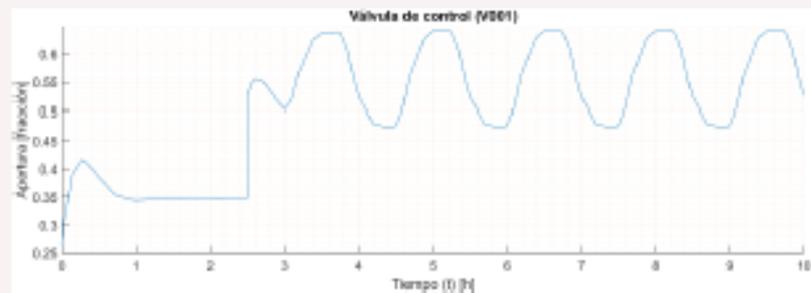


Figura YY. Señal de la válvula de entrada.

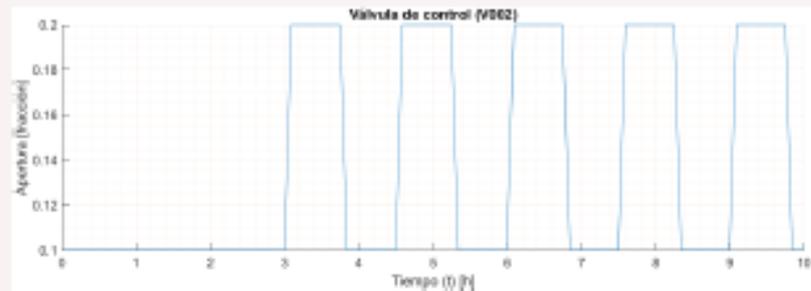


Figura YY. Señal de la válvula de salida.

Los resultados dinámicos muestran que la perturbación tiene un efecto desestabilizador sobre el nivel de fluido. Por tanto, se puede decir que la propuesta de control tiene un efecto satisfactorio, pero requiere un mejor ajuste de las constantes del controlador. El controlador PID sobre la válvula de entrada muestra una respuesta oportuna a los cambios de apertura de la válvula de salida. Además, se propone un cambio en el tamaño de la válvula de salida del tanque de almacenamiento.

Caso de estudio 4 – Control de nivel de fluido [ONOFFIN]

Una empresa de alimentos XGreatFoodCompany S.A, tiene un problema para controlar el nivel de sirope en el tanque de almacenamiento. La empresa llegó a la resolución que, por las características del proceso y los costos, requiere aplicar un control PID. Entonces deciden aplicar un control de tipo ON/OFF en la válvula de entrada del tanque.

Los elementos de control seleccionados son:

- 1 válvula de control de compuerta de acción hidráulica, cerrada al fallo. El coeficiente de flujo es 398.7650 m³/h bar.
- 1 válvula manual de compuerta, con un coeficiente de flujo de 127.1550 m³/h bar.
- Controlador ON/OFF analógico de Minilec WLCD1 Liquid Level Controllers, con rango superior e inferior de nivel.

Para probar el sistema se aplica una prueba de 6 horas con una variación de apertura (pulso) de la válvula de salida. Los parámetros de esta perturbación son:

- Límite inferior: 25%
- Amplitud: 20%
- Ancho: 50%
- Período 1.5 horas
- Retraso: 3.05 horas

Las dimensiones son:

- Volumen útil: 18430 L
- Factor de seguridad de llenado: 10%
- Altura del tanque 8 m

En base a los datos provistos anteriormente determinar:

1. Obtenga los resultados dinámicos del nivel de fluido, resultado de la propuesta planteada.
2. ¿La propuesta cumple el objetivo planteado?

ANEXO H: CASO DE ESTUDIO CON CONTROL ON-OFF

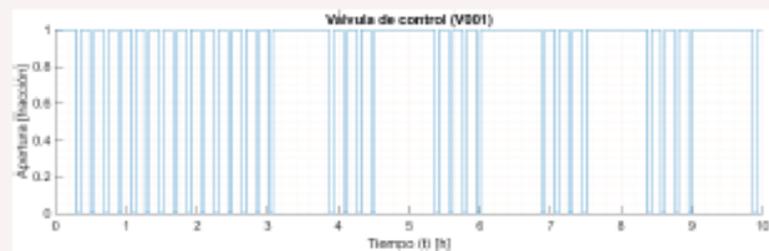


Figura YY. Señal de XXXXXXXXX.

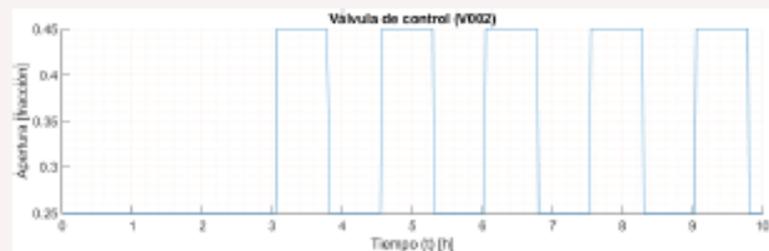


Figura YY. Señal de XXXXXX.

El sistema parece controlar el proceso de manera satisfactoria dentro del rango de control de 6 metros con una tolerancia de 1 metro. La respuesta a las perturbaciones es pronta y satisfactoria. Como resultado el sistema de control propuesto es suficiente para los requerimientos de la empresa.

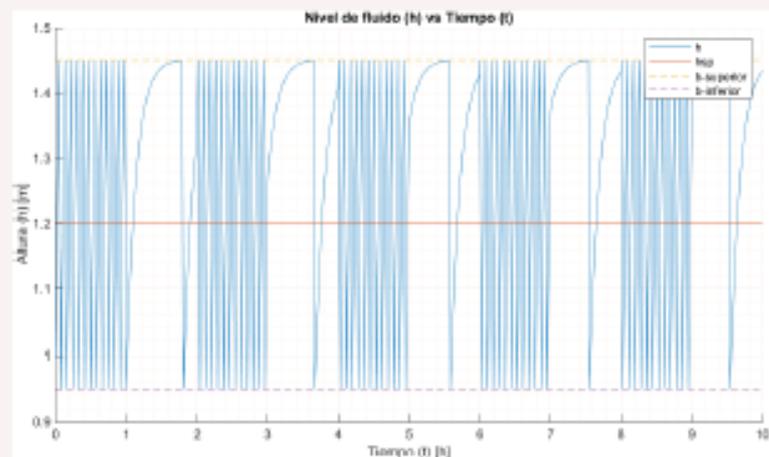
Caso de estudio 6 – Control de nivel de fluido [ONOFFOUT]

Durante un turno de proceso un operador recibe ordenes de cambiar el setpoint de un controlador ON/OFF de nivel de fluido de un tanque que almacena agua residual de los intercambiadores de calor de una planta. Este tanque debe mantenerse por debajo del 85% de su capacidad total y sobre el 20%. El nuevo setpoint es 1.2 m con una tolerancia de 0.25 m. La válvula de entrada tiene un coeficiente de flujo de 53 m³/h bar y una apertura inicial de 0.5. La válvula de salida tiene un coeficiente de 53 m³/h bar con una apertura inicial del 0.5. A parte, el tanque tiene un volumen total de 20 mil litros y un diámetro de 3.2 metros.

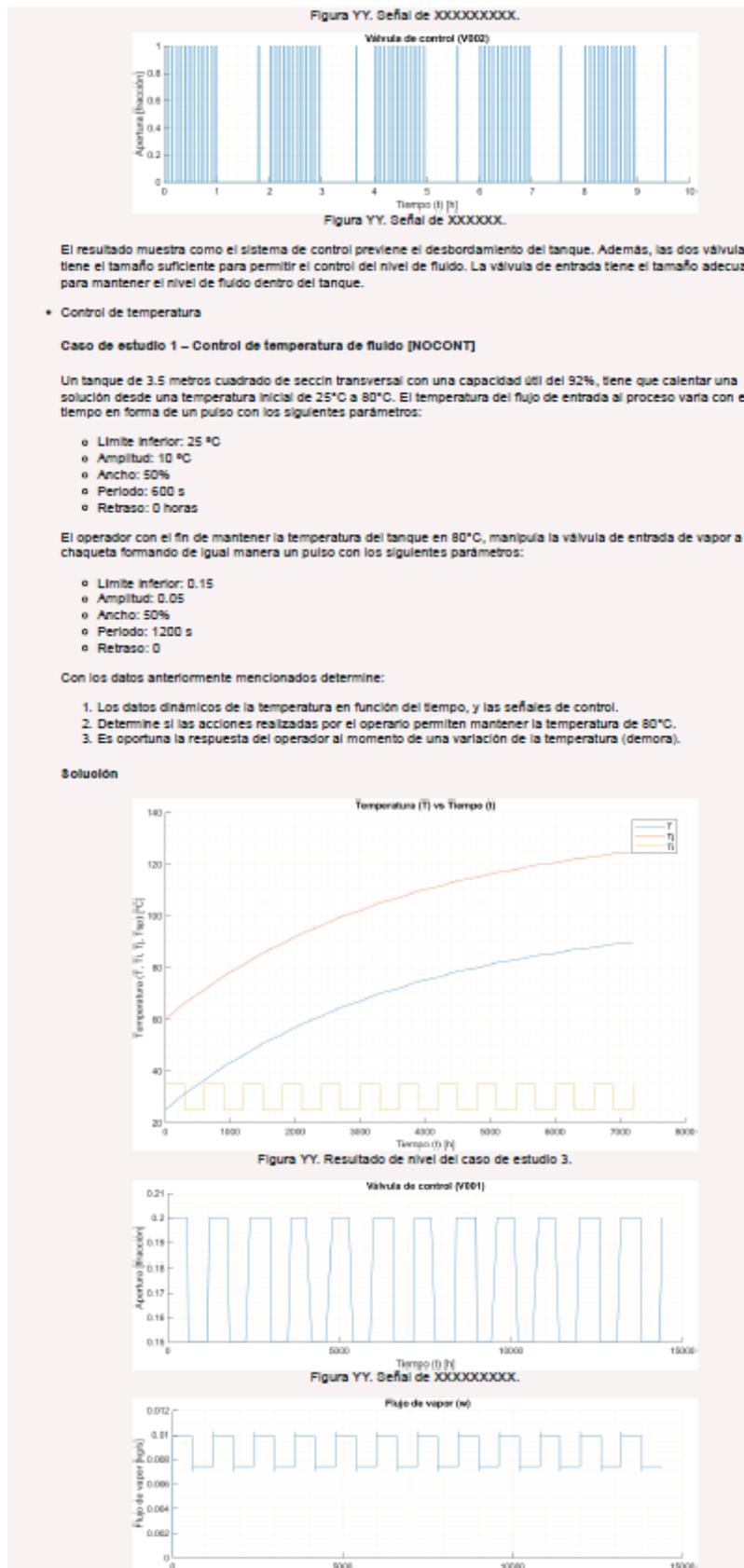
Con los datos proporcionados anteriormente determine:

1. Obtener los datos dinámicos de nivel de fluido en el tanque para un tiempo de 24 horas.
2. Determinar si el nuevo set point no genera ningún desborde en el tanque.
3. Determinar si la válvula de salida es suficientemente grande para permitir el control del proceso.
4. Determinar si la válvula de entrada tiene un coeficiente de flujo adecuado para el control del proceso.

Solución



ANEXO I: CONTROL DE TEMPERATURA.



ANEXO J: CONTROL PID DE TEMPERATURA

La acción realizada por el operario no es lo suficientemente efectiva para mantener la temperatura en el valor de 80°C, por lo tanto, no es oportuna la respuesta del operador. Además, se observa como dadas las condiciones del proceso el efecto que tiene el manipular la válvula de vapor tiene poco efecto sobre la temperatura del fluido dentro del tanque.

Caso de estudio 2 – Control de temperatura de fluido [PIDIN]

A un tanque que almacena una solución con propiedades iguales a las del agua, se desea calentar hasta una temperatura de 65°C, como paso previo a su mezclado con otras sustancias dentro de un reactor. El calentamiento de la solución se realiza mediante vapor a través de una chaqueta. La solución de entrada al tanque está a temperatura normal (25°C) y flujo masico de 1.25 kg/s. Aparte la capacidad del tanque es de 11.31 m³ con una altura total de 15m, y una capacidad efectiva de 87% del volumen total.

El sistema de control que tiene el tanque es un PID colocado en la válvula de entrada del tanque. La válvula de entrada a la chaqueta es una válvula de mariposa accionada por un servomotor y un coeficiente de flujo de 72 m³/bar. Por otra parte, la válvula de alimentación del tanque es una válvula de compuerta manual.

El ciclo de control del tanque es un PID feedback sobre la línea de entrada al tanque. El controlador PID tiene la siguiente configuración de constantes, $K_p = 0.050$, $K_i = 2.5e-4$, $K_d = 0$ y $N = 100$.

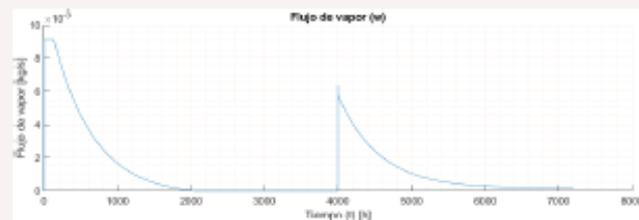
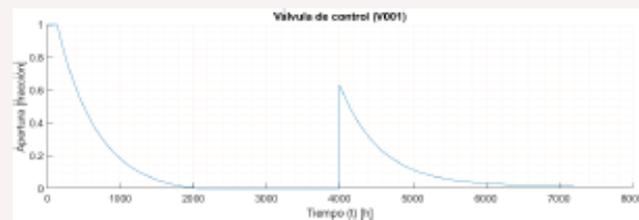
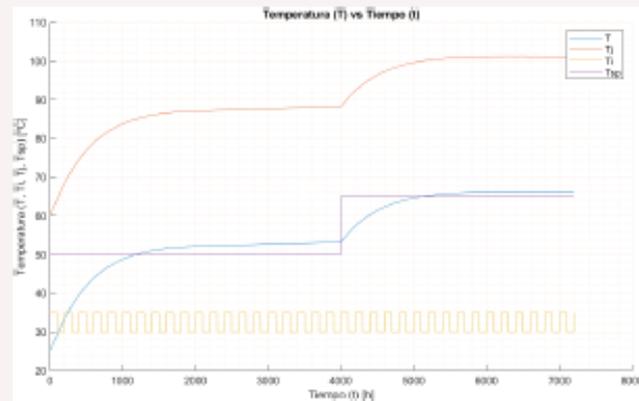
Se quiere simular un una perturbación en la temperatura de entrada al proceso, con los siguiente parametros:

- o Limite inferior: 30°C
- o Amplitud: 5°C
- o Ancho: 50%
- o Periodo: 200 s
- o Retraso: 0

Describe con datos que resultados se obtiene en la simulación, tomando en cuenta los siguientes puntos:

1. Capacidad de control del sistema PID FeedBack.
2. Temperatura de la solución resultante.
3. Acción de la válvula de control sobre la temperatura del proceso.
4. Interpretación de las gráficas de temperatura, señales de control y temperatura.

Solución



El sistema de control muestra ser efectivo en el control de la temperatura del fluido, manteniéndola cerca del punto de consigna. La temperatura final del proceso es 65°C, con una perturbación tipo pulso en la temperatura de entrada. La válvula de control de entrada a la chaqueta muestra ser un factor que permite controlar la temperatura del proceso. Como se observa en las gráficas existe un pequeño error de corrección en la temperatura. Esto es el resultado de la configuración del controlador PID y el tamaño de la válvula de control. La válvula de control de entrada a la chaqueta responde a los cambios de setpoint abriendo o cerrando su apertura de forma proporcional.

ANEXO K: CONTROL ON-OFF DE TEMPERATURA

Esto se puede notar de mejor manera en el cambio de setpoint, donde hay una apertura de casi el 60%, con el objetivo de subir la temperatura del fluido.

Caso de estudio 3 – Control de temperatura de fluido [ONOFFIN]

La empresa de alimentos XGreatFoodCompany S.A. desea realizar un estudio de control de un tanque de calentamiento para una solución de trabajo importante para su proceso de manufactura. Este tanque proviene de XEquipmentSupplier S.A. y sus datos técnicos son los siguientes:

Uno de los requerimientos hechos por la empresa XGreatFoodCompany S.A. es que los tanque tengan un control de nivel de líquido mediante un controlador ON/OFF conectado a la válvula de entrada de vapor. Este controlador debe permitir ingresar un setpoint y una tolerancia.

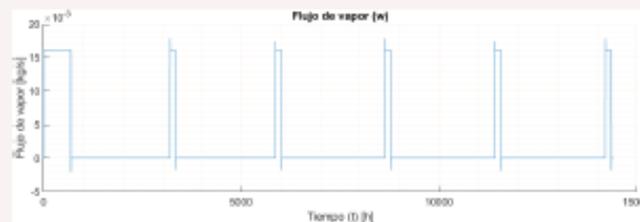
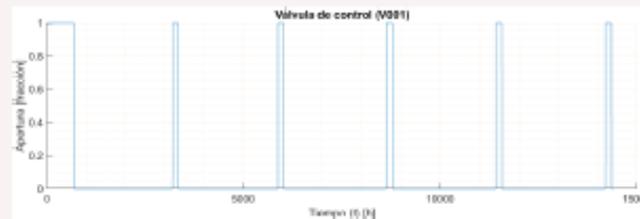
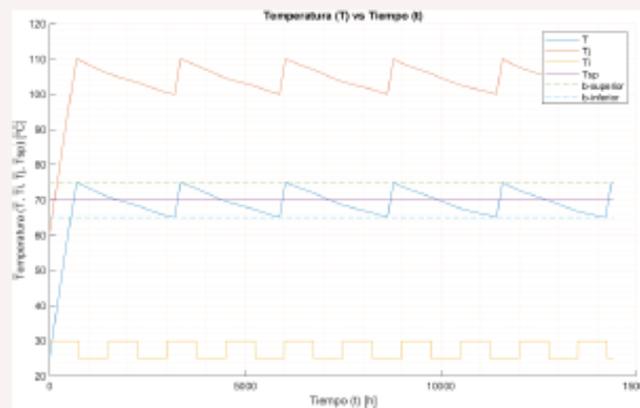
La empresa también proporciona ciertos datos operativos como:

1. Temperatura del flujo de entrada al tanque: 25°C
2. Temperatura operativa del tanque: 70°C
3. Margen de error deseado para el control: $\pm 5^\circ\text{C}$
4. Capacidad útil del tanque mínima: 25400 L
5. Margen mínimo de volumen en el tanque: 12%

Con los datos proporcionados determinar:

1. La idoneidad del sistema de control para mantener la temperatura del proceso dentro del rango de control.

Solución



Los resultados muestran que el sistema de control es adecuado para mantener la temperatura del tanque dentro del rango de control de $70 \pm 5^\circ\text{C}$. Por tanto, es factible para la empresa adquirir este equipo al proveedor mencionado.

Referencias

- SEBORG, Dale E., et al. Process dynamics and control. John Wiley & Sons, 2010.
- SMITH, Carlos A.; CORRIPIO, Armando B.; BASURTO, Sergio D. Manzanares. Control automático de procesos: teoría y práctica. México: Limusa, 1991.
- GUIDE, Getting Started. MATLAB® R2021a. 2020.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 10 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Pamela Lissette Legña Anrango</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Química</i>
Título a optar: <i>Ingeniera Química</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.10.18
09:37:25 -05'00'



1781-DBRA-UTP-2021