



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN  
REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO  
(CSTR) COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA  
PARA CONTROL DE PROCESOS”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: BRAYAN RODRIGO VACA MARTÍNEZ**

**DIRECTOR: Ing. ADRIÁN ALEJANDRO RODRÍGUEZ PINOS Mgs.**

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, **Brayan Rodrigo Vaca Martínez**

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, Brayan Rodrigo Vaca Martínez, 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 autor 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, 13 de agosto del 2021

**Brayan Rodrigo Vaca Martínez**

**050409293-3**

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

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular: Tipo Propuesta Tecnológica. **MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO (CSTR) COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA CONTROL DE PROCESOS**, realizado por el señor: **BRAYAN RODRIGO VACA MARTÍNEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Daniel Antonio Chuquin Vasco MsC. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-08-23
Ing. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos Mgs. <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	_____	2021-08-23
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada MsC. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-08-23

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de Integración Curricular se lo dedico a Dios por permitirme día a día la oportunidad de cumplir las metas que me he propuesto en la vida.

A mi madre Martha Martínez, por ser su sueño más anhelado en vida.

A mi padre y hermana, Rodrigo Vaca y Lizbeth Vaca por ser las personas que me dan amor y las fuerzas para continuar en este proceso de obtener mi título universitario, ya que gracias a su trabajo y sacrificio que conjuntamente con el de mi madre he logrado ser quién soy.

A Yuli por el cariño y apoyo incondicional, a Marcelo, Karen, Gissela, Yolida, Mayra, Danny por los ánimos y fuerzas en momentos buenos y difíciles de mi vida, y demás familiares y amigos que me han ayudado a superarme y seguir con el camino de la vida.

Brayan

## **AGRADECIMIENTO**

Principalmente agradezco a Dios por regalarme el milagro de la vida, por escucharme en momentos difíciles y acompañarme en los momentos de soledad lejos de mi familia.

También agradezco a mis padres Rodrigo Vaca y Martha Martínez por su lucha, dedicación, esfuerzo por darme lo mejor y ayudarme a formarme personal y profesionalmente.

A Lizbeth Vaca, por su empeño en ayudarme y ser un ejemplo y modelo de persona a seguir.

Agradezco también a mi director de Trabajo de titulación el Ing. Adrián Rodríguez, quien me supo guiar durante la realización de este proyecto además de ser una excelente persona y que ha sido una pieza muy fundamental para la realización del mismo, infinitas gracias por toda su colaboración y ayuda.

Para concluir, agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por recibirme durante toda mi vida universitaria, por brindarme las herramientas que hicieron posible mi formación académica.

Brayan

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
SIGLAS / ABREVIACIONES.....	xiv
RESUMEN .....	xv
SUMMARY .....	xvi

### CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación del proyecto .....	3
1.4. Objetivos .....	4
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	4
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
1.5. Alcance .....	5

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. Estado del Arte .....	6
2.1.1. <i>Reactor de Tanque Agitado Continuo</i> .....	6
2.1.2. <i>Modelado</i> .....	6
2.2. Bases Teóricas .....	11
2.2.1. <i>Reactor de Tanque Agitado Continuo</i> .....	11
2.2.2. <i>Cinética química</i> .....	12
2.2.2.1. <i>Reacciones en medio homogéneo</i> .....	12
2.2.3. <i>Modelado matemático y simulación</i> .....	14
2.2.3.1. <i>Modelo</i> .....	14
2.2.3.2. <i>Proceso del modelado y simulación (M&amp;S)</i> .....	14
2.2.3.3. <i>Simulación</i> .....	15
2.2.4. <i>MATLAB y su entorno</i> .....	16
2.2.4.1. <i>Matlab</i> .....	16
2.2.4.2. <i>Simulink</i> .....	16

2.2.4.3.	<i>App Designer</i> .....	17
2.2.5.	<b>Controlador Proporcional, Integral y Derivativo</b> .....	17
2.2.5.1.	<i>Acción Proporcional</i> .....	17
2.2.5.2.	<i>Acción Proporcional – Integral</i> .....	18
2.2.5.3.	<i>Acción Proporcional – Derivativo</i> .....	19
2.2.5.4.	<i>Acción Proporcional, Integral y Derivativa</i> .....	20
2.3.	<b>Marco legal</b> .....	21
2.3.1.	<i>Software libre en Ecuador</i> .....	21

### CAPÍTULO III

3.	<b>METODOLOGÍA</b> .....	23
3.1.	<b>Modelado Matemático</b> .....	24
3.1.1.	<i>Consideraciones del Modelado</i> .....	24
3.1.2.	<i>Modelado</i> .....	25
3.1.2.1.	<i>Balance General</i> .....	25
3.1.2.2.	<i>Balance para el componente A</i> .....	25
3.1.2.3.	<i>Balance para el componente B</i> .....	26
3.1.2.4.	<i>Balance de Energía para el reactor</i> .....	27
3.1.2.5.	<i>Balance de Energía para la camisa de enfriamiento</i> .....	28
3.1.2.6.	<i>Velocidad de reacción</i> .....	29
3.1.2.7.	<i>Flujo de salida para el control de válvula</i> .....	29
3.1.2.8.	<i>Flujo para el control de agua fría</i> .....	30
3.2.	<b>Modelado en Simulink</b> .....	30
3.2.1.	<b>MATLAB Function</b> .....	30
3.2.1.1.	<i>Vector de entrada</i> .....	31
3.2.1.2.	<i>Vector reciclo</i> .....	34
3.2.1.3.	<i>Vector salida</i> .....	34
3.3.	<b>Creación de Interfaz</b> .....	35
3.3.1.	<b>Design View</b> .....	36
3.3.1.1.	<i>Grid Layout</i> .....	37
3.3.1.2.	<i>Panel</i> .....	37
3.3.1.3.	<i>Tab Group</i> .....	37
3.3.1.4.	<i>Axes</i> .....	38
3.3.1.5.	<i>Edit Field (Numeric)</i> .....	38
3.3.1.6.	<i>Image</i> .....	38
3.3.1.7.	<i>Label</i> .....	39



3.3.1.8.	<i>Button</i> .....	39
3.4.	<b>Conexión Interfaz - SIMULINK</b> .....	39
3.5.	<b>Exportación de la interfaz didáctica</b> .....	41
3.6.	<b>Validación.</b> .....	42
3.6.1.	<i>Parámetros y constantes del reactor</i> .....	42
3.7.	<b>Creación de un manual de Usuario</b> .....	44

## CAPÍTULO IV

4.	<b>GESTIÓN DEL PROYECTO</b> .....	45
4.1.	<b>Cronograma</b> .....	45
4.2.	<b>Presupuesto</b> .....	47
4.3.	<b>Recursos y materiales</b> .....	47
4.4.	<b>Discusión y análisis de resultados</b> .....	47
4.4.1.	<i>Resultado del modelado e interfaz gráfica</i> .....	47
4.4.2.	<i>Resultados para el control de nivel y temperatura según PID Tuner</i> .....	49
4.4.2.1.	<i>Controles para el nivel y sus constantes</i> .....	49
4.4.2.2.	<i>Controles para la Temperatura y sus constantes</i> .....	54
4.4.2.3.	<i>Resultados de los controles seleccionados</i> .....	60
4.4.3.	<i>Validación de los resultados obtenidos para la concentración</i> .....	60
4.4.4.	<i>Control del nivel</i> .....	62
4.4.5.	<i>Control de la Temperatura</i> .....	64
4.4.6.	<i>Incremento del flujo de entrada en un 15%</i> .....	67
4.4.7.	<i>Incremento de la concentración en un 20%</i> .....	70

CONCLUSIONES	.....	73
--------------	-------	----

RECOMENDACIONES	.....	74
-----------------	-------	----

## GLOSARIO

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-3:</b>	Condiciones para el bloque transfer fcn. ....	32
<b>Tabla 2-3:</b>	Condiciones para el bloque transfer fcn. ....	32
<b>Tabla 3-3:</b>	Parámetros de la estructura del reactor. ....	42
<b>Tabla 4-3:</b>	Constantes. ....	43
<b>Tabla 5-3:</b>	Condiciones termodinámicas. ....	43
<b>Tabla 6-3:</b>	Condiciones de la reacción. ....	43
<b>Tabla 7-3:</b>	Condiciones de entrada. ....	43
<b>Tabla 8-3:</b>	Condiciones iniciales (tiempo =0) y configuración. ....	44
<b>Tabla 9-3:</b>	Condiciones de las válvulas. ....	44
<b>Tabla 1-4:</b>	Cronogramas de actividades. ....	45
<b>Tabla 2-4:</b>	Presupuesto por actividad para el trabajo de titulación. ....	47
<b>Tabla 3-4:</b>	Valor de las constantes para el control de nivel. ....	60
<b>Tabla 4-4:</b>	Valor de las constantes para el control de temperatura. ....	60
<b>Tabla 5-4:</b>	Resultados y error porcentual. ....	62
<b>Tabla 6-4:</b>	Condiciones del set point para el control del nivel. ....	63
<b>Tabla 7-4:</b>	Condiciones del set point para el control de la temperatura. ....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b>	Comportamiento del sistema para cambio de temperatura. ....	7
<b>Figura 2-2:</b>	Respuesta de la temperatura de salida del reactor ante las perturbaciones en las entradas.....	8
<b>Figura 3-2:</b>	Comportamiento del controlador PID frente a un cambio de 5%. ....	9
<b>Figura 4-2:</b>	Comportamiento del controlador PID frente a un cambio de +5% en el Set Point. ....	9
<b>Figura 5-2:</b>	Comportamiento ante un cambio en -5%. ....	10
<b>Figura 6-2:</b>	Comportamiento del controlador PID ante cambios en el Set Point en -5%. ....	10
<b>Figura 7-2:</b>	Reactor tipo tanque continuamente agitado. ....	11
<b>Figura 8-2:</b>	Proceso de M&S en función de la validez del modelo obtenido. (adaptación propia del gráfico presentado en Sargent).....	15
<b>Figura 9-2:</b>	Diagrama de bloques del control Proporcional.....	17
<b>Figura 10-2:</b>	Diagrama de bloques del control proporcional-integral.....	18
<b>Figura 11-2:</b>	Diagrama de bloques del control proporcional-derivativo.....	19
<b>Figura 12-2:</b>	Diagrama de bloques del control proporcional-integral-derivativo. ....	20
<b>Figura 1-3:</b>	Proceso a seguir para la creación de la Interfaz didáctica.....	23
<b>Figura 2-3:</b>	Bloque matlab function.....	30
<b>Figura 3-3:</b>	Bloque step para $f_0$ . ....	31
<b>Figura 4-3:</b>	Bloques que forman la línea de entrada para $v_p$ . ....	31
<b>Figura 5-3:</b>	Bloques que forman la línea de entrada para $v_{pj}$ . ....	32
<b>Figura 6-3:</b>	Bloque step para $Ca_0$ . ....	33
<b>Figura 7-3:</b>	Bloque constant para $T_0$ . ....	33
<b>Figura 8-3:</b>	Bloque constant para $T_{j0}$ . ....	33
<b>Figura 9-3:</b>	Línea del vector reciclo.....	34
<b>Figura 10-3:</b>	Línea del vector salida. ....	34
<b>Figura 11-3:</b>	Bloque integrador.....	35
<b>Figura 12-3:</b>	Bloque selector.....	35
<b>Figura 13-3:</b>	Ventana de app design. ....	35
<b>Figura 14-3:</b>	Ventana de component library de app design. ....	36
<b>Figura 15-3:</b>	Componente grid layout.....	37
<b>Figura 16-3:</b>	Componente panel. ....	37
<b>Figura 17-3:</b>	Componente tab group.....	37
<b>Figura 18-3:</b>	Componente axes.....	38
<b>Figura 19-3:</b>	Componente edit field (Numeric). ....	38
<b>Figura 20-3:</b>	Componente image. ....	38
<b>Figura 21-3:</b>	Componente label. ....	39

<b>Figura 22-3:</b>	Componente button.....	39
<b>Figura 23-3:</b>	Código de conexión interfaz – simulink. ....	40
<b>Figura 24-3:</b>	Herramientas de la ventana app designer.....	41
<b>Figura 25-3:</b>	Ventana de compilación de la aplicación.....	41
<b>Figura 26-3:</b>	Creación de carpetas a partir del compilado. ....	42
<b>Figura 1-4:</b>	Modelado en simulink.....	48
<b>Figura 2-4:</b>	Ventana principal de la interfaz didáctica.....	48
<b>Figura 3-4:</b>	Curva del control proporcional por PID Tuner.....	49
<b>Figura 4-4:</b>	Resultados para el control proporcional del nivel.....	50
<b>Figura 5-4:</b>	Curva de control integral para el nivel.....	50
<b>Figura 6-4:</b>	Resultados para el control integral del nivel.....	51
<b>Figura 7-4:</b>	Curva de control proporcional-integral para el nivel. ....	51
<b>Figura 8-4:</b>	Resultados para el control proporcional-integral del nivel. ....	52
<b>Figura 9-4:</b>	Curva de control proporcional-derivativo del nivel.....	52
<b>Figura 10-4:</b>	Resultados para el control proporcional-derivativo del nivel. ....	53
<b>Figura 11-4:</b>	Curva de control proporcional-integral-derivativo para el nivel.....	53
<b>Figura 12-4:</b>	Resultados para el control proporcional-derivativo-integral del nivel.....	54
<b>Figura 13-4:</b>	Curva de control proporcional para la temperatura.....	55
<b>Figura 14-4:</b>	Resultados para el control proporcional de la temperatura.....	55
<b>Figura 15-4:</b>	Curva de control integral para la temperatura.....	56
<b>Figura 16-4:</b>	Resultados para el control integral de la temperatura. ....	56
<b>Figura 17-4:</b>	Curva del control proporcional-integral de la temperatura. ....	57
<b>Figura 18-4:</b>	Resultados para el control proporcional-integral de la temperatura. ....	57
<b>Figura 19-4:</b>	Curva del control proporcional-derivativo de la temperatura. ....	58
<b>Figura 20-4:</b>	Resultados para el control proporcional-derivativo de la temperatura. ....	58
<b>Figura 21-4:</b>	Curva del control proporcional-integral-derivativo de la temperatura. ....	59
<b>Figura 22-4:</b>	Resultados del control proporcional-integral-derivativo de la temperatura.....	59
<b>Figura 23-4:</b>	Resultado de la concentración del producto. ....	61
<b>Figura 24-4:</b>	Resultados de la concentración de la aplicación. ....	61
<b>Figura 25-4:</b>	Nivel en su estado estacionario y lazo de control abierto. ....	62
<b>Figura 26-4:</b>	Resultado del control de nivel en el reactor CSTR. ....	63
<b>Figura 27-4:</b>	Apertura de la válvula para el control de nivel. ....	64
<b>Figura 28-4:</b>	Estado estacionario de la temperatura en un lazo de control abierto. ....	64
<b>Figura 29-4:</b>	Resultado del control de la temperatura en el reactor CSTR.....	65
<b>Figura 30-4:</b>	Resultado del control de la temperatura en el reactor CSTR. ....	66
<b>Figura 31-4:</b>	Picos de variación en la apertura de la válvula de la temperatura. ....	66
<b>Figura 32-4:</b>	Temperatura del reactor y chaqueta al incrementar 15% el flujo de entrada.....	67

<b>Figura 33-4:</b>	Nivel del reactor al incrementar 15% el flujo de entrada.....	68
<b>Figura 34-4:</b>	Concentración del producto al incrementar 15% el flujo de entrada. ....	68
<b>Figura 35-4:</b>	Grado de aperturas de las válvulas del nivel y temperatura al incrementar 15% el flujo de entrada. ....	69
<b>Figura 36-4:</b>	Temperatura del reactor y chaqueta al incrementar la concentración en un 20%.	70
<b>Figura 37-4:</b>	Control de temperatura y cambio del SP del nivel.....	70
<b>Figura 38-4:</b>	Concentración del producto al incrementar la misma en un 20%.....	71
<b>Figura 39-4:</b>	Grado de apertura de las válvulas al incrementar la concentración en un 20%..	72

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A:** Manual de usuario
- ANEXO B:** Distribución de archivos de código fuente
- ANEXO C:** Código fuente de simulink
- ANEXO D:** Código fuente de app design
- ANEXO E:** Workspace de MATLAB

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>CSTR</b>	Continuous Stirred Tank Reactor.
<b>P</b>	Proporcional.
<b>I</b>	Integral.
<b>D</b>	Derivativo.
<b>PI</b>	Proporcional-Integral.
<b>PD</b>	Proporcional-Derivativo.
<b>PID</b>	Proporcional-Integral-Derivativo
<b>SP</b>	Set Point
<b>M&amp;S</b>	Modelado y Simulación.
<b>K<sub>p</sub></b>	Constante proporcional para el controlador.
<b>K<sub>d</sub></b>	Constante derivativa para el controlador.
<b>k<sub>i</sub></b>	Constante integral para el controlador.
<b>T<sub>d</sub></b>	Tiempo derivativo.
<b>r</b>	Velocidad de reacción.
<b>C</b>	Concentración.
<b>R</b>	Unidad de temperatura, grados Rankine.

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de Integración Curricular fue modelar, simular y controlar un reactor de tanque agitado continuo (CSTR), en el que interviene una reacción de primer orden del tipo  $A \rightarrow B$ , creando una interfaz didáctica interactiva. Para esto se utilizó el software MATLAB, que permitió mediante ecuaciones diferenciales obtenidas de los balances de masa y energías, declarar variables, parámetros y constantes, con el fin de crear un diagrama de bloques en Simulink para poder calcular el cambio de dichas variables en un tiempo determinado, en este procedimiento se aplicaron controladores para el nivel y temperatura del reactor, en el que se determinó parámetros como los Set Points correspondientes y constantes para los controladores. También se creó una interfaz didáctica que se encuentra conectada mediante un código de función con el modelado de Simulink, esta se desarrolló con componentes básicos de la librería de App Design, lo que permitió diseñar de forma correcta una aplicación visualmente agradable e intuitiva, creando ventanas que muestren tanto sus resultados como parámetros para su edición. La aplicación ejecutada con los parámetros correspondientes para el modelo evidenció el comportamiento del reactor, en los cambios de temperatura que sufrió tanto el reactor como la chaqueta, la formación del producto B y el consumo del reactivo A, el aumento del nivel del tanque y el grado de apertura de las válvulas según como se controló dichas variables, el cambio en los resultados mencionados por el incremento en flujo y concentración. Se concluye que la interfaz interactiva simuló el modelo desarrollado, además que controló la temperatura y nivel del reactor según los parámetros del Set Point y se exportó como una aplicación independiente. Finalmente se recomienda realizar un modelo matemático que simule una reacción de segundo y tercer orden para profundizar el estudio del tema.

**Palabras clave:** <REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO (CSTR)>, <CONTROL>, <MATLAB>, <SIMULINK>, INTERFAZ DIDÁCTICA>, <APP DESIGN>, <MODELADO>.



1465-DBRA-UTP-2021



## SUMMARY

The objective of the present Curricular Integration work was to model, simulate and control a continuous stirred tank reactor (CSTR), in which a first order reaction of the type A to B, creating an interactive didactic interface. For this, the MATLAB software was used, which allowed, through differential equations obtained from the mass and energy balances, to declare variables, parameters and constants, in order to create a block diagram in Simulink to be able to calculate the change of said variables in a determined time, in this procedure controllers for the level and temperature of the reactor were applied, in which parameters such as the corresponding and constant Set Points for the controllers were determined. A didactic interface was also created that is connected by means of a function code with the Simulink modeling; It was developed with basic components from the App Design library, which allowed the correct design of a visually pleasant and intuitive application, creating windows that show both its results and parameters for editing. The application carried out with the corresponding parameters for the model, evidenced the behavior of the reactor, in the temperature changes suffered by both the reactor and the jacket, the formation of product B and the consumption of reagent A, the increase in the level of the tank and the degree of opening of the valves according to how these variables were controlled, the change in the mentioned results due to the increase in flow and concentration. It is concluded that the interactive interface simulated the model developed, in addition to controlling the temperature and level of the reactor according to the Set Point parameters and exported as a standalone application. Finally, it is recommended to carry out a mathematical model that simulates a second and third order reaction to deepen the study of the subject.

**Keywords:** <CONTINUOUS AGITATED TANK REACTOR (CSTR)>, <CONTROL>, <MATLAB>, <SIMULINK>, DIDACTIC INTERFACE>, <APP DESIGN>, <MODELED>.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La revolución Industrial que tuvo lugar en Gran Bretaña, aproximadamente a inicios del siglo VIII, y además, que a este acto se le conoce como parte del proceso de creaciones de nuevas tecnologías y transformaciones en el ámbito social y económico, gracias a esto el hombre obtuvo nuevos elementos que ayudaron y facilitaron la creación, producción y el desarrollo de esta revolución, de esta manera tuvo una superación tanto cultural como económica en la sociedad (Mejia, 2018, p.1).

La industrialización en el territorio ecuatoriano acaeció muy tarde, comparándolo con otros países sur americanos y centroamericanos. El conjunto de la creación de formulaciones ideológicas y técnicas que se obtuvieron en estudios así lo evidenciaron, pues de una manera muy lenta y tardía la industria en nuestro país se abrió paso a paso, en una economía tradicional y una estructura económica muy subdesarrollada. Pero ya en la segunda mitad de los años cincuenta fue el tiempo en que tomaría fuerzas este nuevo modelo industrial (Torres, 2012, p.8).

Las necesidades de valorar el capital foráneo y la implementación de un modelo industrializado llegaron de una manera conjunta y en una novedosa oleada de actualización estatal y renovación de nuevas tecnológica (Torres, 2012, p.9).

Con la venida de la nueva etapa industrial se desarrollaron nuevas investigaciones con el fin de mejorar la productividad de las industrias, de forma sobresaliente se tuvo un gran impacto en los procesos de cambio que se llevaban a cabo en las dichas industrias, dentro de estos procesos es el Químico, ya que es un conjunto de operaciones químicas y/o físicas ordenadas a la transformación de una materia prima en productos finales diferentes (Benites, 2011, p.6).

En todo proceso químico se ven inmersa múltiples operaciones, que contienen diversas reacciones químicas, y el equipo en donde se lleva a cabo una reacción química es un Reactor Químico. Con la nueva industrial un reactor químico era un equipo primordial en la mayoría de las industrias, por ende, estos equipos han estado presentes durante mucho tiempo y debido a su importancia han logrado obtener una gran variedad de clasificaciones e innovaciones (Benites, 2011, p.6).

Desde los inicios de la llegada de la nueva era Industrial se ha enfocado y concentrado el estudio y desarrollo de nuevas técnicas para determinar un comportamiento o predicción, este ha sido una constante desde principios del Siglo XIX. Se han hecho grandes esfuerzos con el surgimiento de métodos de investigación empírica y potentes herramientas estadísticas. Los avances en la capacidad de computación permiten hoy día tratar un gran número de variables, lo que lleva a la posibilidad de simular sistemas complejos (Collado, 2007, p.8).

En base al avance de la ciencia, en la actualidad se construye modelos o teorías para explicar los fenómenos que ocurren en nuestro alrededor. Los fenómenos son observados y se establecen relaciones, causas y explicaciones. Las observaciones se realizan sobre la evolución de características con el tiempo o con otras características y, tomando en consideración sus posibles causas o factores (Vera y Benítez, 2015, p.43g).

El modelado matemático y la simulación por ordenador es una forma de adquirir conocimiento acerca del comportamiento de los sistemas, a la vista de ello se experimenta de forma computacional el cual resulta menos costoso y más seguro que experimentar directamente con el sistema o equipo real, además que con un modelo bien detallado se puede experimentar en condiciones extremas que son impracticables en la vida real (Urquía y Martín, 2013).

Con la llegada del primer sistema de control, que fue el dispositivo de Herón para la apertura de puertas en un templo en el siglo primero, este dio paso a un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia hoy en día, brindando los medios para lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos y de esta forma mejorar la calidad y abaratar los costos de producción en el auge Industrial (Pérez., Hidalgo y Berenguer, 2007, p.3).

## **1.2. Planteamiento del problema**

Uno de los equipos utilizados en el campo industrial y que ha sido objeto de estudio en la carrera de Ingeniería Química es el Reactor de Tanque Agitado Continuo, el cual presenta variables dependientes como son: Concentración del producto, temperatura en el reactor, temperatura del líquido refrigerante la salida; variables independientes tales como: flujo de refrigerante; y variables perturbadoras como: Concentración y el flujo a la entrada; siendo uno de los desafíos más grandes que presentan los Ingenieros es determinar qué y cómo controlar estas variables así como las ecuaciones que rigen el equipo y el comportamiento que tendrá al ser aplicado en la vida real (Benites, 2011, p.13).

El problema de control consiste en seleccionar, para un sistema dado, ciertas variables que haga responder al mismo de una manera deseada (Pérez., Hidalgo y Berenguer, 2007, p.6), ya que si estas variables no son controladas pueden producir variaciones atípicas que pueden ocasionar cambios en las propiedades fisicoquímicas del producto a obtener, siendo este un gran problema a la hora de implementar un reactor en el campo industrial, por lo que, gracias a la ayuda del software y la simulación de estos equipos, se puede evidenciar cómo evoluciona el equipo con el tiempo, así como la viabilidad de este.

### **1.3. Justificación del proyecto**

En la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se imparten cátedras como Ingeniería de reacciones y Control de procesos, en las cuales es conveniente aplicar y evidenciar los conocimientos adquiridos, tanto en el diseño y análisis de un reactor como en el funcionamiento e implementación de controladores a equipos, siendo el modelado y simulación mediante la utilización de un software una forma de diferenciar las variables que intervienen así como la importancia de controladores en un equipo; la implementación de los mismos ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, brindando los medios para lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción, liberar de la complejidad de muchas rutinas de tareas manuales respectivas (Pérez., Hidalgo y Berenguer, 2007, p.6).

Este proyecto tecnológico es de gran importancia de conocimientos de los Ingenieros, ya que será de gran utilidad como objeto de estudio, tanto para docentes como para estudiantes de la carrera de Ingeniería Química o afines, siendo un aporte a la Institución para reforzar de forma aplicativa los temas impartidos en las aulas; gracias a este proyecto se beneficiaran tanto docentes que impartan la Cátedra de Control de procesos o similares, así como estudiantes de dichas materias; además también se beneficiarán de forma indirecta profesionales que busquen comprobar la viabilidad y funcionabilidad de la implementación en la vida real de este tipo de reactor con controladores.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo General***

- Modelar, simular y controlar un reactor de tanque agitado continuo (CSTR), como herramienta didáctica.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Identificar las variables y parámetros que definen el comportamiento de un reactor de tanque agitado continuo.
- Modelar matemáticamente en función de las variables y parámetros el reactor (CSTR)
- Simular mediante un software el proceso y control de un reactor de tanque agitado continuo.
- Crear un manual de usuario para el manejo de la interfaz gráfica didáctica que permita monitorear y evidenciar los resultados obtenidos.

## **1.5. Alcance**

El desarrollo del presente trabajo busca modelar matemáticamente con la ayuda del software MATLAB - SIMULINK, un reactor de tanque agitado continuo (CSTR), basándonos en sus balances tanto de masa como de energía, ocurriendo en su interior una reacción de primer orden ( $A \rightarrow B$ ) que puede ser exotérmica, para con esto poder realizar una simulación del comportamiento que tendrá dicho equipo en un intervalo de tiempo realizando el control de nivel y temperatura del producto en el equipo, creando de esta forma una Interfaz mediante la utilización de App Design, esta aplicación de MATLAB permitirá crear una herramienta didáctica para la cátedra de control de procesos y afines.

De esta forma tanto docentes como estudiantes tendrán un material aplicativo en dichas cátedras, ya que gracias a un manual de usuario de dicha aplicación les permitirá manipular la interfaz y usar la aplicación, siendo posible modificar ciertas variables según el caso de estudio.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Estado del Arte

##### 2.1.1. *Reactor de Tanque Agitado Continuo*

Reacción química, es el transcurso en el que una sustancias o más conocidas como reactivos, se transforman en sustancias diferentes llamadas productos, estas se llevan a cabo en un equipo capaz de proporcionar las condiciones para que se dé la reacción, denominado reactor químico (Kumar et al., 2019, p.2).

En la actualidad; Manuel F. Pérez Polo (2004), menciona que existe una gran variedad de reactores químicos los cuales son utilizados según las características de la reacción, uno de estos es el reactor de tanque agitado continuo (CSTR), este equipos es el más comúnmente usado en las industrias de procesos. Puede convertir reactivos en productos y, por lo tanto, desempeña un papel principal en muchos procesos químicos.

El reactor de tanque agitado continuo (CSTR) es el más utilizado en el campo industrial, ya que este proporciona la uniformidad de presión, composición y temperatura (Peña et al., 2008, p.2).

Según, Peña et al., (2008), las funciones principales de un Reactor CSTR son:

- Garantiza el contacto entre las sustancias o reactivos dentro del tanque, consiguiendo una mezcla correcta de los reactantes.
- Provee el tiempo necesario para que las sustancias entren en contacto.
- Proporciona la presión, temperatura y composición adecuada de tal manera que la reacción ocurra en el grado y a la velocidad que se requiere.

Las variables a controlar, son la temperatura y el nivel dentro del tanque; las perturbaciones del proceso que se consideran son: la concentración de entrada del reactante y el flujo de alimentación del reactante (Peña et al., 2008, p.3).

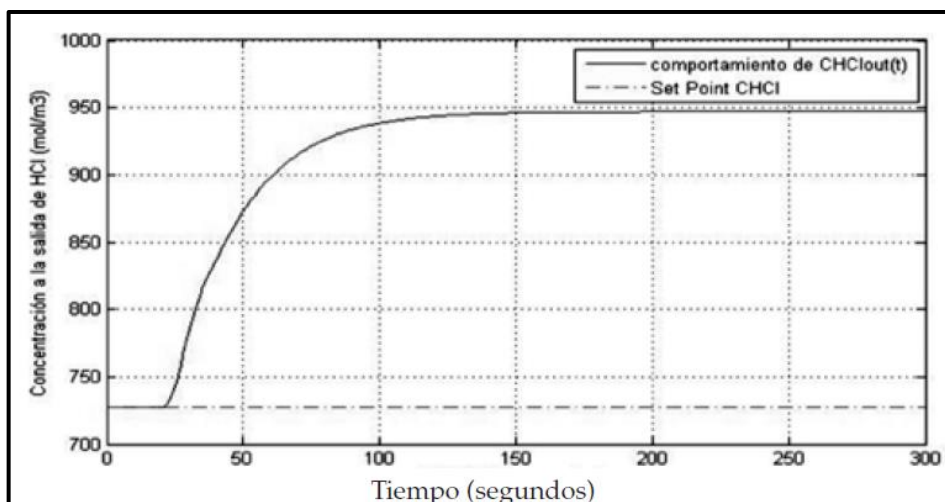
##### 2.1.2. *Modelado*

El modelado de las variables puede modelar la incertidumbre en los experimentos en un solo evento, lo que resulta en un valor numérico para algunos observables. En Simulink se indica como modelar los tipos de incertidumbre de variables aleatorias disponibles y también muestra cómo crear otras distribuciones de probabilidad para su uso en los fenómenos de modelado (Velásquez y Velásquez, 2012, p.2).

El reactor de tanque agitado continuo consta de dos fases: en la primera fase se da la formación de los productos, y la segunda fase permite el enfriamiento del tanque por medio de una chaqueta. El proceso es continuo, es decir, que tiene flujos de entrada y salida de forma permanente, por lo que el volumen en el tanque es proporcional al nivel de la mezcla (Peña et al., 2008, p.3).

Palencia, Fabregas y Carpintero (2012), realizan balances de masa, molar por componentes y balance de energías del proceso para el reactor y la chaqueta, a partir de estos se desarrolla el modelo matemático de una reacción irreversible y de proceso es adiabático, además se realiza un control. La variable sobre la que se ejecuta el control es la temperatura de salida del reactor y la variable manipulada para la estrategia de control es el flujo volumétrico de entrada.

En la figura 1-2, se observa el comportamiento de la concentración de ácido clorhídrico a la salida del reactor ante incrementos de +5% de la temperatura de la corriente de entrada de ácido. Dado que la reacción es exotérmica, el principio de Le Châtelier establece que los procesos de esta naturaleza se ven favorecidos por disminución de la temperatura de los alrededores. Tal como se esperaba, la concentración aumenta debido al aumento de la temperatura dentro de la corriente de entrada (Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012, p.33).

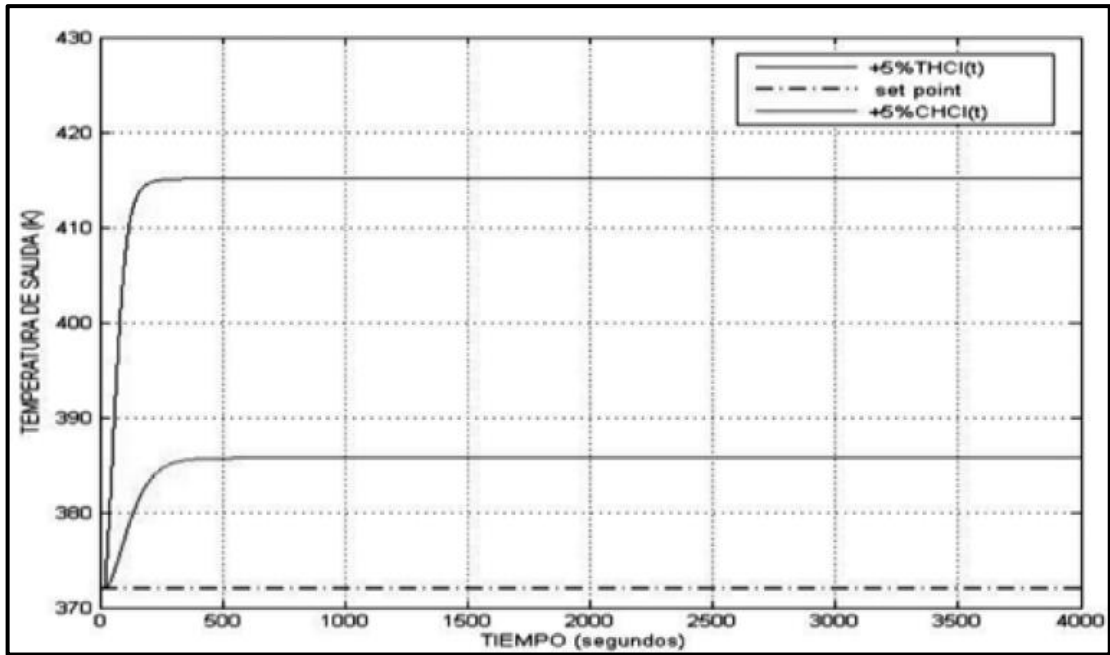


**Figura 1-2:** Comportamiento del sistema para cambio de temperatura.

**Realizado por:** Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012, p.33.

En la Figura 2-2, presenta el comportamiento de la temperatura del proceso frente a perturbaciones en las variables de entrada. Se aprecia que la temperatura de salida del reactor muestra mayor sensibilidad ante cambios en la temperatura de entrada que la concentración de entrada de ácido clorhídrico.

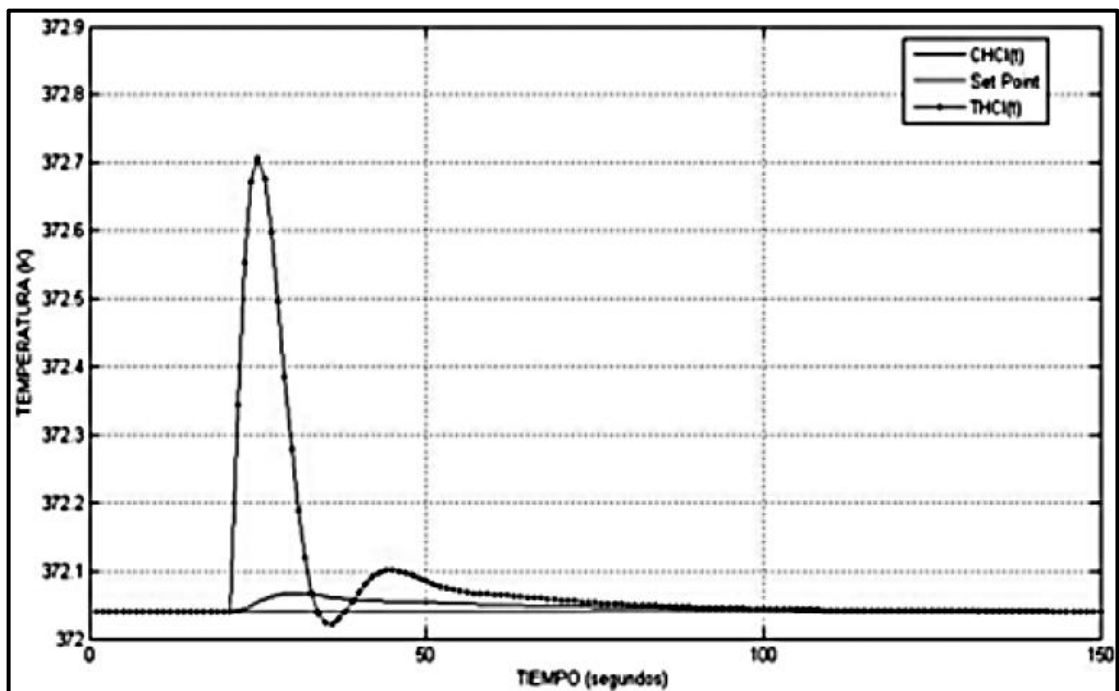




**Figura 2-2:** Respuesta de la temperatura de salida del reactor ante las perturbaciones en las entradas.

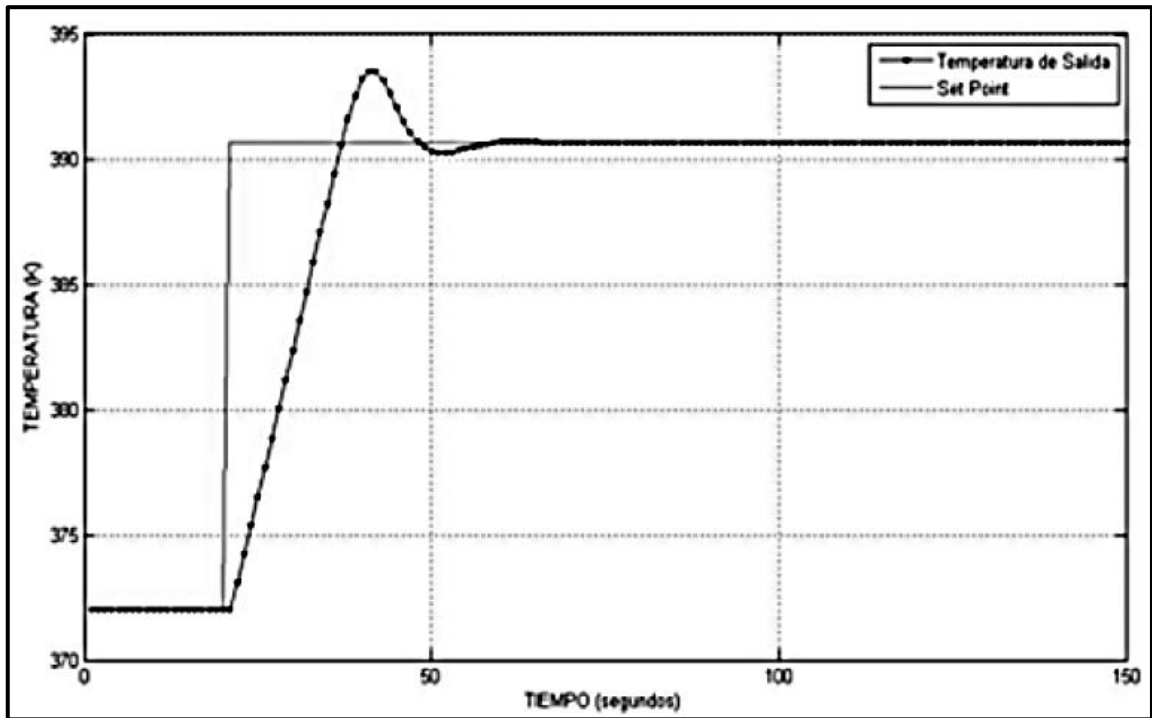
Realizado por: Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012, p.34.

La Figura 3-2, presenta el comportamiento de la estrategia PID para una perturbación de +5%. El controlador actúa sobre la temperatura de salida con una mayor oscilación cuando se perturba la temperatura de entrada, que cuando se modifica la concentración de ácido. En la Figura 4-2 se observa que, para cambios en el Set Point, el controlador responde con menor overshoot que a diferencia del control para perturbaciones en la entrada del proceso.



**Figura 3-2:** Comportamiento del controlador PID frente a un cambio de 5%.

Realizado por: Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012.



**Figura 4-2:** Comportamiento del controlador PID frente a un cambio de +5% en el Set Point.

Realizado por: Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012.

Posteriormente, se siguió perturbando el proceso para observar la capacidad de control de controlador PID ante perturbaciones y cambios en el Set Point del sistema. La Figura 5-2, presenta los resultados para perturbaciones en -5% del valor inicial. Nótese que el proceso de control se comporta de forma inversa al que presenta en la Figura 3-2 (Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012, p.34).

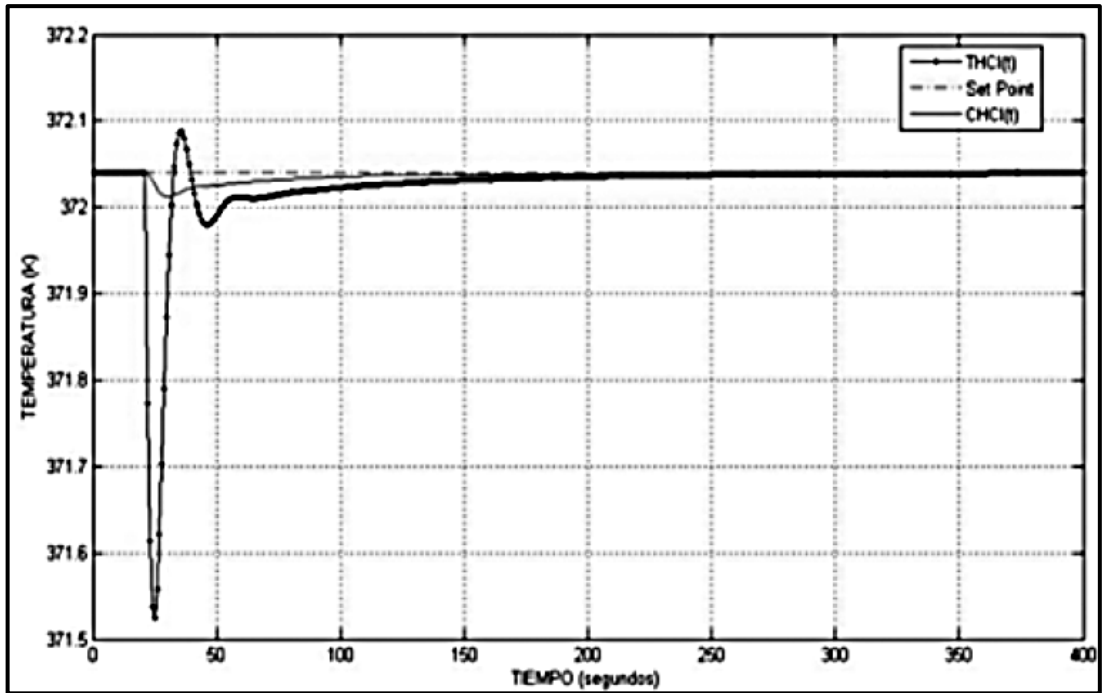


Figura 5-2: Comportamiento ante un cambio en -5%.

Realizado por: Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012.

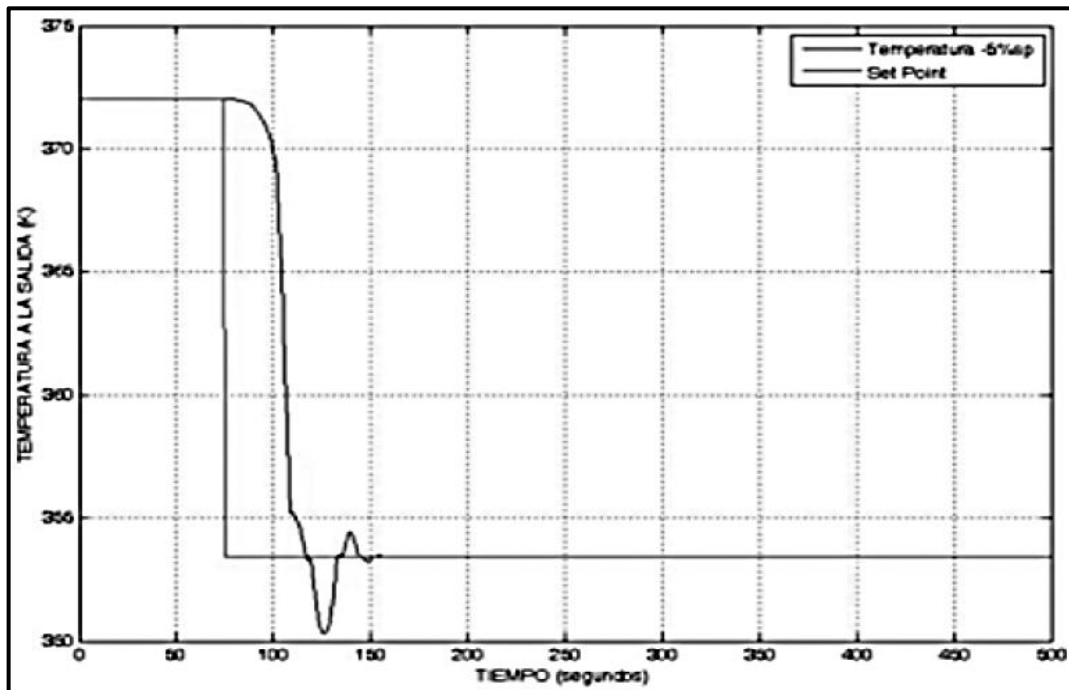


Figura 6-2: Comportamiento del controlador PID ante cambios en el Set Point en -5%.

Realizado por: Palencia, Fabregas y Carpintero, 2012.

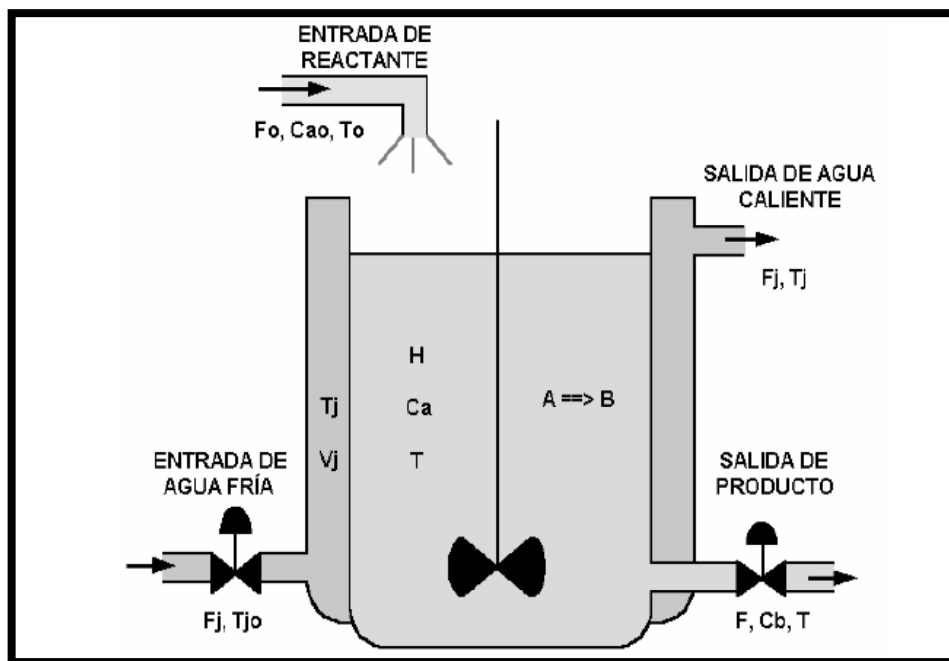
## 2.2. Bases Teóricas

### 2.2.1. Reactor de Tanque Agitado Continuo

El reactor de tanque agitado continuo, conocido por sus siglas en inglés como CSTR, está formado por un tanque con agitador que proporciona una mezcla casi exacta, en el que hay un flujo continuo de reactantes y desde el cual sale el producto. La mezcla no es tan difícil de alcanzar siempre y cuando la fase líquida no sea muy viscosa (Benites, 2011, p.10).

El objetivo de lograr una buena agitación se debe al interés de que dentro del tanque se produzca una mezcla casi perfecta, de esta manera se busca lograr que todo el tanque sea utilizado para que se dé la reacción, y que no existan espacios muertos o vacíos (Benites, 2011, p.10).

En el reactor de tanque agitado continuamente, sucede una reacción exotérmica del tipo  $A \rightarrow B$ . Para retirar el calor que se produce por la reacción, este ocupa una chaqueta para la refrigeración a través del cual fluye un líquido refrigerante (Benites, 2011, p.10).



**Figura 7-2:** Reactor tipo tanque continuamente agitado.

Realizado por: Peña et al., 2008.

### 2.2.2. *Cinética química*

La cinética de una reacción estudia la velocidad de la misma, y de esta dependen varios factores como la Temperatura (T).

#### 2.2.2.1. *Reacciones en medio homogéneo*

Una reacción se califica de homogénea cuando todas las sustancias que componen el sistema de reacción se encuentran en una sola fase, ya sea gaseosa, líquida o sólida. Se incluye entre esas sustancias los reactantes, los productos, así como también los inertes y los catalizadores.

Normalmente, la velocidad de una reacción homogénea depende las condiciones de la fase donde se desarrolla: composición, temperatura y, especialmente para los gases, presión. La velocidad de reacción intrínseca es característica del sistema químico, por lo que no deben influir aspectos externos como la forma del reactor, las propiedades de las superficies de los sólidos que están en contacto con el medio de reacción o las características difusionales del fluido (Izquierdo et al., 2008, p.36).

- *Cinética de reacciones irreversibles*

Supóngase una reacción química homogénea irreversible del tipo  $A \rightarrow B$ . El carácter de irreversibilidad se refiere a que la reacción siempre evoluciona desde los reactantes (especie A), hacia los productos (especie B), hasta que se consume totalmente al menos uno de los reactantes, denominado reactante limitante. En la mayoría de los casos, para las reacciones irreversibles la velocidad de reacción a una determinada temperatura sólo dependerá de la concentración de los reactantes y la expresión matemática que suele describir con suficiente precisión la velocidad de reacción es una función potencial (Izquierdo et al., 2008, p.36).

Así, para la reacción indicada, la ecuación cinética puede escribirse como:

*Ecuación 1*

$$r = K * [A]^n$$

Donde:

K: constante cinética.

A: reactivo.

N: Orden de reacción.

La concentración del reactivo ni el orden de reacción depende de la temperatura, por lo que la constante cinética  $k$  depende de la temperatura y por ende la velocidad de reacción, entonces esta se puede expresar según una ecuación empírica, la ecuación de Arrhenius.

*Ecuación 2*

$$K = A * e^{\frac{-Ea}{RT}}$$

Donde:

$Ea$ : energía de activación.

$A$ : factor pre-exponencial.

$R$ : constante de los gases.

- *Cinética de las reacciones reversibles*

Considérese ahora una reacción química homogénea reversible, es decir, que presenta una situación de equilibrio caracterizada por la presencia simultánea de reactantes y de productos de la reacción, esta es del tipo  $A + B \leftrightarrow C + D$ . La velocidad de reacción neta corresponde a la diferencia entre la velocidad de reacción directa ( $\rightarrow$ ) y la inversa ( $\leftarrow$ ) (Izquierdo Torres et al., 2008, p. 37).

En muchas ocasiones la velocidad puede describirse mediante una combinación de funciones potenciales como se indica a continuación:

*Ecuación 3*

$$r = kd[A]^{\alpha A}[B]^{\alpha B} \dots - k[C]^{\beta C}[D]^{\beta D}$$

Donde:

$\alpha$ : orden de reacción directa.

$\beta$ : orden de reacción inversa.

### **2.2.3. Modelado matemático y simulación**

#### **2.2.3.1. Modelo**

El modelo de un fenómeno es un conjunto de representaciones formales, que incorpora sin ambigüedad los conocimientos adquiridos mediante todas las fuentes pertinentes sobre el fenómeno de interés para el estudio, de tal forma, el modelo consiste en la especificación formal de los elementos de un sistema, las relaciones entre los mismos y los parámetros que permiten contextualizar el desempeño del sistema de acuerdo con las características del entorno y las relaciones del sistema del mundo real con el mismo (Maldonado, 2013, p.35).

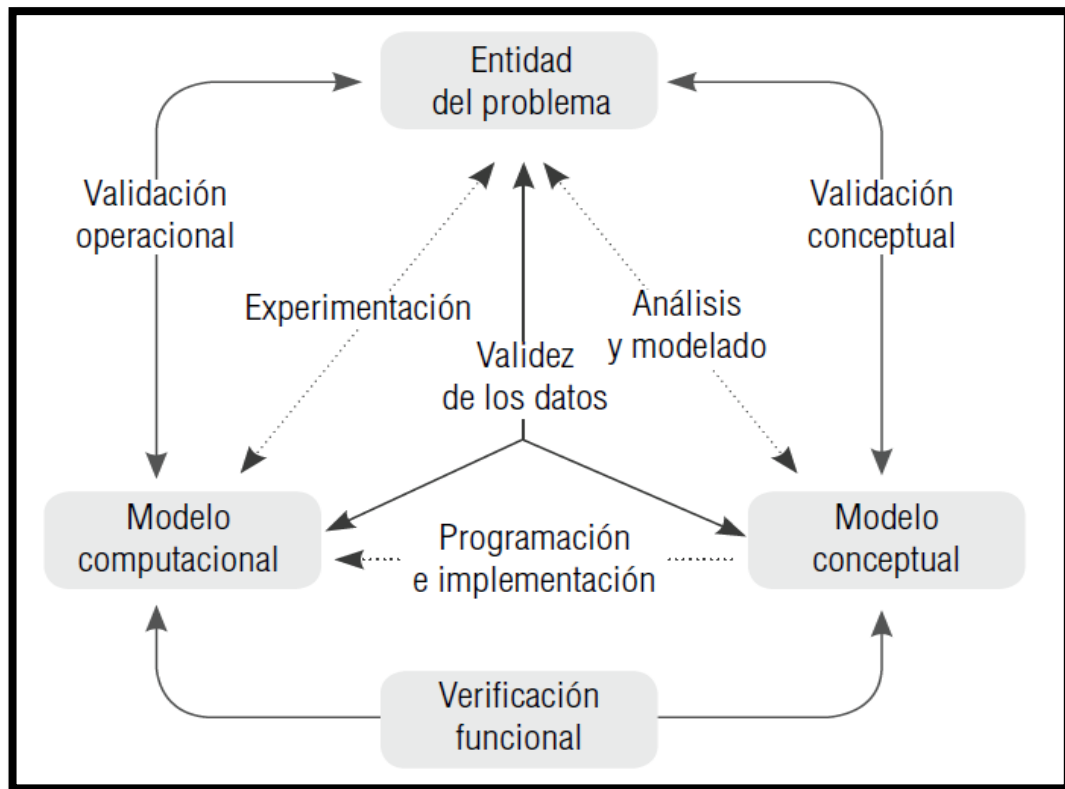
El desarrollo del modelo asociado a un objeto, sistema o fenómeno, busca la caracterización cualitativa y cuantitativa de un aspecto específico del objeto del mundo real, generalmente dinámico (comportamientos, evolución y cambios de estado del sistema relacionado), de interés para la consecución de los objetivos del estudio basado en el M&S (Maldonado, 2013, p.36).

En el modelo para la simulación según Maldonado Granados (2013), se pueden incluir, algunas de las siguientes características:

- Relaciones matemáticas emergentes (alto nivel) entre determinados aspectos del sistema.
- Mecanismos subyacentes relativos a las relaciones entre los diferentes elementos del sistema.
- Los valores umbrales de los parámetros que determinan la dinámica del sistema a partir de cambios de estado.
- Estructuras y patrones característicos, coherentes con la formulación conceptual del modelo, en los resultados.
- Patrones de interacción y competencia entre estructuras coherentes.

#### **2.2.3.2. Proceso del modelado y simulación (M&S)**

El proceso de M&S exige un proceso sistemático, riguroso y reproducible, que permita garantizar la calidad de sus resultados, tanto desde el punto de vista conceptual o cualitativo en la caracterización del objeto de estudio como desde el punto de vista de comportamiento o cuantitativo en la implementación de los métodos y herramientas computacionales que permiten efectuar la experimentación numérica. Sargent (2013) presenta una versión sintetizada de los procesos y actividades requeridos en un estudio basado en modelado y simulación.



**Figura 8-2:** Proceso de M&S en función de la validez del modelo obtenido. (adaptación propia del gráfico presentado en Sargent)

Realizado por: Sargent, 2013.

### 2.2.3.3. Simulación

El algoritmo, y su implementación en un lenguaje de programación, que resulta de la aplicación del proceso de M&S, posibilita la generación de un conjunto de datos numéricos que permite extraer conclusiones sobre el comportamiento del modelo como descripción de un sistema en el mundo real, mediante su interpretación a partir de diversas técnicas, algunas tradicionales como interpretación de gráficas, análisis estadístico y prueba de hipótesis, contraste con patrones obtenidos mediante estudios análogos, etc. u otras más recientes y adaptadas a la naturaleza computacional de los métodos de solución (Maldonado, 2013, p.43).

Alici y Edgar (2002), mencionan que el concepto de experimentación numérica es sinónimo de simulación, si bien algunos trabajos de corte metodológico definen la simulación como la implementación algorítmica del modelo y como un subproceso de la experimentación numérica.



#### 2.2.4. *MATLAB y su entorno*

##### 2.2.4.1. *Matlab*

Matlab es un programa de ingeniería destinado a realizar cálculos técnicos científicos y de propósito general. En él se integran operaciones de cálculo, visualización y programación, donde la interacción con el usuario emplea una notación matemática clásica (Aracil y Gómez, 2007, p.1).

Los usos y aplicaciones típicos de Matlab son: Matemáticas y cálculo, desarrollo de algoritmos, adquisición de datos, modelado, simulación y prototipado, análisis y procesado de datos, gráficos científicos y de ingeniería, desarrollo de aplicaciones (Aracil y Gómez, 2007, p.1).

Aracil y Gómez (2007), mencionan que las cuatro partes fundamentales de Matlab son:

- Entorno de desarrollo. Se trata de un conjunto de utilidades que permiten el uso de funciones Matlab y ficheros en general. Muchas de estas utilidades son interfaces gráficas de usuario (Aracil y Gómez 2007, p.2).
- La librería de funciones matemáticas Matlab. Se trata de un amplio conjunto de algoritmos de cálculo, comprendiendo las funciones más elementales como la suma, senos y cosenos o la aritmética compleja, hasta funciones más sofisticadas como la inversión de matrices, el cálculo de autovalores, funciones de Bessel y transformadas rápidas de Fourier (Aracil y Gómez, 2007, p.2).
- Gráficos. Matlab dispone de un conjunto de utilidades destinadas a visualizar vectores y matrices en forma de gráficos. Existe una gran cantidad de posibilidades para ajustar el aspecto de los gráficos, destacando la visualización tridimensional con opciones de iluminación y sombreado, y la posibilidad de crear animaciones (Aracil y Gómez, 2007, p.2).
- Interfaz de aplicación de Matlab. Consiste en una librería que permite escribir programas ejecutables independientes en C y otros lenguajes, accediendo, mediante DLLs, a las utilidades de cálculo matricial de Matlab (Aracil y Gómez, 2007, p.2).

##### 2.2.4.2. *Simulink*

Simulink es una aplicación que permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. Este comportamiento se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predeterminadas de todo tipo (Aracil y Gómez, 2007, p.3).

Simulink dispone de una serie de utilidades que facilitan la visualización, análisis y guardado de los resultados de simulación. Simulink se emplea profundamente en ingeniería de control (Aracil y Gómez, 2007, p.3).

### 2.2.4.3. *App Designer*

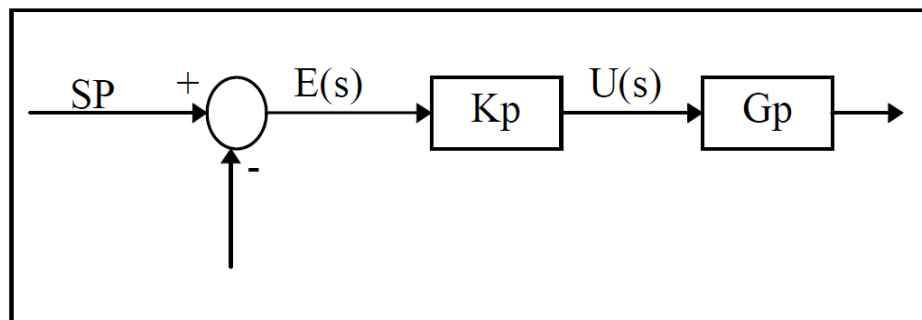
Este es un entorno de desarrollo interactivo para diseñar una aplicación y programar su comportamiento. Proporciona una versión totalmente integrada del editor de MATLAB y un gran conjunto de componentes interactivos de la IU. También ofrece un administrador de diseño de cuadrículas para organizar la interfaz de usuario y opciones de reordenación automáticas para hacer que su app detecte y responda a los cambios del tamaño de pantalla. Permite distribuir apps empaquetándolas en los archivos del instalador directamente desde la barra de herramientas de App Designer, o bien creando una aplicación web o de escritorio independiente (MathWorks, 2021).

### 2.2.5. *Controlador Proporcional, Integral y Derivativo*

Un control PID se basa en un modelo matemático riguroso de algún proceso lineal o lineal dentro de un rango. Estos modelos se desarrollan ya sea por Root-Locus, ubicación de polos, o algún otro método. Este control lee un valor de entrada o del sensor de entrada, aplica los algoritmos de control, definidos y produce una salida específica como señal actuante o como entrada a un actuador. La salida del sistema es medida por el sensor de entrada, y el proceso se repite indefinidamente (Lorandi et al., 2011, p.1).

#### 2.2.5.1. *Acción Proporcional*

En este tipo de controlador la relación entre su salida y la señal de error,  $e(t)$ , viene dada por:



**Figura 9-2:** Diagrama de bloques del control Proporcional.

Realizado por: Lourenço, 1942.

*Ecuación 4*

$$U(s) = K_p E(s)$$

Donde:

U(s): Señal de salida en el dominio de Laplace (s).

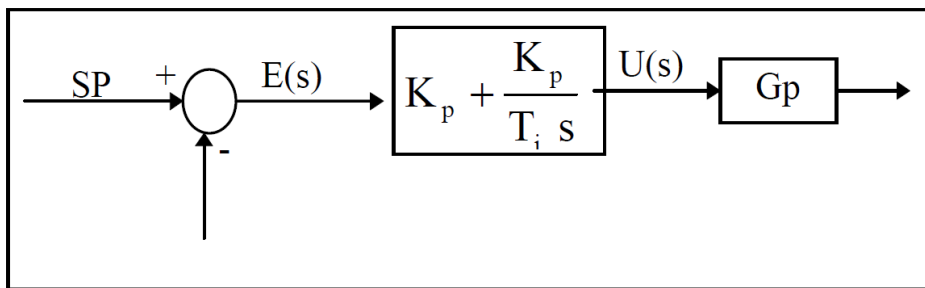
Kp: Constante de proporcionalidad.

E(s): Señal de error en el dominio de Laplace (s).

Un controlador proporcional consiste esencialmente en un amplificador con ganancia ajustable. Una característica importante de esta acción de control es la existencia de un error residual permanente siempre que se produce un cambio de carga, y el sistema que se pretende controlar es de tipo 0, o error estacionario que depende de Kp y de la carga, puede minimizarse mediante un aumento de Kp. Sin embargo, cabe señalar que el aumento de este parámetro conduce a un aumento en el tiempo de establecimiento y eventualmente a la inestabilidad (Lourenço, 1942, p.2).

### 2.2.5.2. Acción Proporcional – Integral

Si consideramos que la salida del controlador ahora es función del error y de la integral del error, estamos ante un controlador proporcional - integral:



**Figura 10-2:** Diagrama de bloques del control proporcional-integral

Realizado por: Lourenço, 1942.

### Ecuación 5

$$U(s) = Kp\left(1 + \frac{1}{Tis}\right) E(s)$$

Donde:

Ti: Tiempo Integral, o tiempo necesario para que la contribución de acción integral iguale a la acción proporcional.

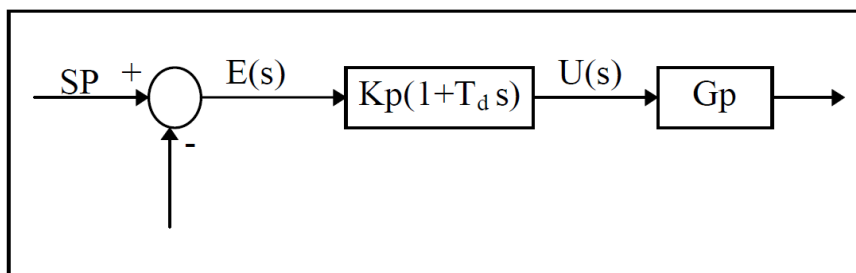
El componente integral, al agregar un polo en el origen de la función de transferencia del controlador, elimina el error de posición estacionaria, independientemente del sistema que se quiere controlar. Si, por un lado, como se mencionó anteriormente, la acción integral elimina el

error estacionario, por otro lado, aumenta el tiempo de configuración y empeora la estabilidad relativa, que suele ser indeseable (Lourenço, 1942, p.3).

En consecuencia, la ganancia de la participación proporcional debe reducirse, siempre que este combinado con la acción integral PI, se utiliza en sistemas con cambios de carga frecuentes, siempre que el controlador P, por sí mismo, no es capaz de reducir el error estacionario a un nivel aceptable. Sin embargo, el sistema debe tener cambios de carga relativamente lentos para poder evitar las oscilaciones inducidas por la acción integral (Lourenço, 1942, p.3).

### 2.2.5.3. Acción Proporcional – Derivativo

En este controlador, la señal de control ( $u(t)$ ) es proporcional al error y su tasa de variación:



**Figura 11-2:** Diagrama de bloques del control proporcional-derivativo.

Realizado por: Lourenço, 1942.

### Ecuación 6

$$U(s) = K_p(1 + T_d s) E(s)$$

Donde:

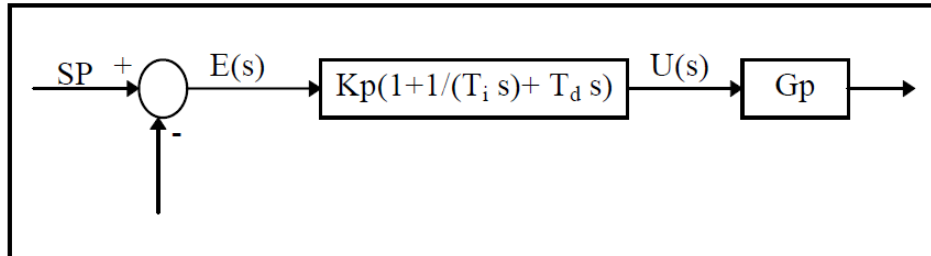
$T_d$ : Período de tiempo anticipado por la acción derivada con respecto a la acción proporcional.

El hecho de que la señal de control sea proporcional a la tasa de variación del error, implica que el modo derivado nunca se puede usar solo, ya que solo responde a regímenes transitorios.

La adición del modo derivado al modo proporcional da como resultado un controlador altamente sensible, ya que primero, al responder a una tasa de cambio del error, permite correcciones antes de que se eleve. Aunque el modo derivado no afecta el error estacionario directamente, agrega amortiguación al sistema (mejora la estabilidad) y por lo tanto permite el uso de valores de  $K_p$  más altos, lo que implica un error estacionario menor. Un inconveniente de esta forma es acentuar el alto nivel de ruido frecuencia (Lourenço, 1942, p.4).

#### 2.2.5.4. Acción Proporcional, Integral y Derivativa

Este modo resulta de la combinación de los modos proporcional, integral y derivado. Afirman que resulta en un compromiso entre las ventajas y desventajas de un IP y las ventajas de una DP. La salida del controlador viene dada por:



**Figura 12-2:** Diagrama de bloques del control proporcional-integral-derivativo.

**Realizado por:** Lourenço, 1942.

#### Ecuación 7

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s)$$

En este tipo de controlador, el modo integral se usa para eliminar el error estacionario causado por grandes variaciones de carga. El modo derivado, con su efecto estabilizador, permite un aumento de la ganancia y reduce la tendencia a las oscilaciones, es lo que conduce a una mayor velocidad de respuesta en comparación con P y PI. Sin embargo, estas propiedades son de naturaleza general, por lo que puede haber excepciones en ciertos sistemas.

El control total tendrá, por un lado, la eliminación del error estacionario y, por otro lado, empeoran la respuesta transitoria, es decir, la hacen más oscilatoria. Siempre que se utilice el control total debe probarse inicialmente con un  $K_p$  reducido. El uso del control derivado tiene la principal consecuencia de una mejorar la estabilidad del sistema, reducir la sobreelevación y mejorar la respuesta transitorio (Lourenço, 1942, p.4).

## 2.3. Marco legal

### 2.3.1. Software libre en Ecuador

Dentro de la Constitución de la república del Ecuador se garantiza la soberanía nacional, y se definen los sectores estratégicos entre los cuales se ven inmersas el uso de tecnologías como hardware y software.

Art. 16: “Todas las personas, en forma individual o colectiva, tienen derecho a:” (Silva, 2015).

2. “El acceso universal a las tecnologías de información y comunicación” (Silva, 2015).

*Art. 234. El Estado garantizará la formación y capacitación continua de las servidoras y servidores públicos a través de las escuelas, institutos, academias y programas de formación o capacitación del sector público; y la coordinación con instituciones nacionales e internacionales que operen bajo acuerdos con el Estado.* (Silva, 2015).

*Art. 322. Se reconoce la propiedad intelectual de acuerdo con las condiciones que señale la ley. Se prohíbe toda forma de apropiación de conocimientos colectivos, en el ámbito de las ciencias, tecnologías y saberes ancestrales. Se prohíbe también la apropiación sobre los recursos genéticos que contienen la diversidad biológica y la agro-biodiversidad.* (Silva, 2015).

Art. 334. “El Estado promoverá el acceso equitativo a los factores de producción, para lo cual le corresponderá:” (Silva, 2015).

1. “Evitar la concentración o acaparamiento de factores y recursos productivos, promover su redistribución y eliminar privilegios o desigualdades en el acceso a ellos” (Silva, 2015).

3. “Impulsar y apoyar el desarrollo y la difusión de conocimientos y tecnologías orientados a los procesos de producción” (Silva, 2015).

Art. 347. “Será responsabilidad del Estado:” (Silva, 2015).

8. “Incorporar las tecnologías de la información y comunicación en el proceso educativo y propiciar el enlace de la enseñanza con las actividades productivas o sociales” (Silva, 2015).

Art. 385. “El sistema nacional de ciencia, tecnología, innovación y saberes ancestrales, en el marco del respeto al ambiente, la naturaleza, la vida, las culturas y la soberanía, tendrá como finalidad:” (Silva, 2015).

1. “Generar, adaptar y difundir conocimientos científicos y tecnológicos” (Silva, 2015).

3. “Desarrollar tecnologías e innovaciones que impulsen la producción nacional, eleven la eficiencia y productividad, mejoren la calidad de vida y contribuyan a la realización del buen vivir.” (Silva, 2015).

Art. 386. El sistema comprenderá programas, políticas, recursos, acciones, e incorporará a instituciones del Estado, universidades y escuelas politécnicas, institutos de investigación públicos y particulares, empresas públicas y privadas, organismos no gubernamentales y

personas naturales o jurídicas, en tanto realizan actividades de investigación, desarrollo tecnológico, innovación y aquellas ligadas a los saberes ancestrales (Silva, 2015).

Art. 387. “Será responsabilidad del Estado:” (Silva, 2015).

1. “Facilitar e impulsar la incorporación a la sociedad del conocimiento para alcanzar los objetivos del régimen de desarrollo.” (Silva, 2015).

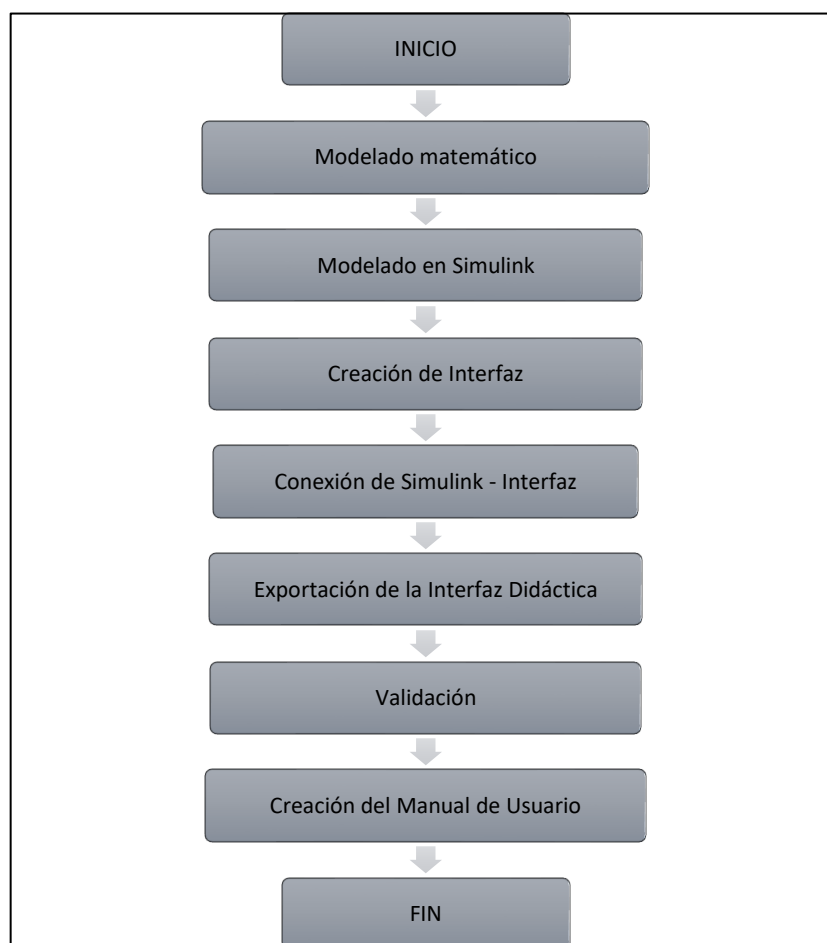
Art. 423. “La integración, en especial con los países de Latinoamérica y el Caribe será un objetivo estratégico del Estado. En todas las instancias y procesos de integración, el Estado ecuatoriano se comprometerá a:” (Silva, 2015).

2. Promover estrategias conjuntas de manejo sustentable del patrimonio natural, en especial la regulación de la actividad extractiva; la cooperación y complementación energética sustentable; la conservación de la biodiversidad, los ecosistemas y el agua; la investigación, el desarrollo científico y el intercambio de conocimiento y tecnología; y la implementación de estrategias coordinadas de soberanía alimentaria. (Silva, 2015).

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

El presente trabajo de Integración Curricular busca crear una Interfaz didáctica que simule y controle un Reactor de Tanque Agitado Continuo (CSTR), basado en un modelo matemático del mismo, permitiendo esta interfaz poder cambiar el valor de variables y parámetros pudiendo ser utilizada como objeto de estudio que permita visualizar el comportamiento de dicho reactor según las condiciones de estudio.



**Figura 1-3:** Proceso a seguir para la creación de la Interfaz didáctica.

Realizado por: Vaca B., 2021.

En la Figura 1-3, se detalla el procedimiento que se siguió para la creación de la Interfaz didáctica. Estas etapas se definen de la siguiente forma:

**Modelado matemático:** Estas son las ecuaciones que rigen el equipo según sus balances de masa y por componentes tanto para A en el cual se consume el reactivo, como para la formación del



producto B, interviniendo en este punto la velocidad reacción; también se utiliza el balance de energía para el reactor y para la camisa de enfriamiento (Peña et al., 2008).

**Modelado en Simulink:** Aquí se realiza modelado del equipo utilizando Simulink de Matlab, este se realiza mediante diagramas de bloques, se añade las funciones correspondientes y necesarias según el modelo, el cual permitirá obtener resultados y gráficos de los mismos durante un periodo de tiempo del comportamiento del reactor de tanque agitado continuo.

**Creación de Interfaz:** En esta fase se crea una aplicación con las diferentes opciones de diseño que presenta App Designer de MATLAB, aquí se inserta botones, ventanas, cuadros de texto y alfanuméricos, gráficos, entre otras opciones según la necesidad de la aplicación.

**Conexión Simulink – Interfaz:** En este punto mediante un Script de Matlab se ejecuta el programa para que la Interfaz calcule con los datos insertados en la aplicación realice los cálculos mediante el modelado realizado en Simulink.

**Exportación de la interfaz didáctica:** En este punto se realiza un comprimido de los paquetes que la interfaz necesita, es decir, el modelado en Simulink y el archivo test.mat que contiene los valores de los parámetros y resultados obtenidos de la modelación para finalmente exportarlo como una aplicación independiente.

**Validación:** Para poder validar el modelado y el funcionamiento correcto de la interfaz se debe comparar los valores obtenidos por la aplicación que calcula a base de la modelación con el resultado que se calcula de forma manual con los balances por componentes.

**Creación del Manual de usuario:** Aquí se detalla los pasos a seguir para la instalación y uso de la interfaz, ya que esta aplicación va dirigida específicamente a docentes y estudiantes y se podrán basar en este escrito el cual les facilitará la operación y explotar al máximo la utilidad de esta aplicación.

### 3.1. Modelado Matemático

#### 3.1.1. Consideraciones del Modelado

Para la realización del modelo matemático se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones.

- La reacción que presenta el reactor es irreversible y de primer orden, de tipo  $A \rightarrow B$ , donde A es el reactante y B es el producto.
- Tanto el reactivo como el producto se encuentran en fase líquida.
- Para este estudio la densidad, capacidad calórica de la mezcla entre otras propiedades termodinámicas del reactante y producto permanecen constantes.

- La transferencia de calor entre la pared del tanque del reactor y la camisa de enfriamiento es ideal, es decir que los efectos energéticos y pérdidas de calor son despreciables.
- El volumen de la mezcla es directamente proporcional al nivel de la misma.
- El volumen de la chaqueta es constante durante la fase de enfriamiento.

### 3.1.2. Modelado

Basados en la Figura 7-2, en el cual se muestra el reactor con sus variables de entrada y salida, así como, ciertas constantes, se ha realizado el modelado a partir de las ecuaciones detalladas por Peña, Pérez, Miranda, Sánchez, (2008).

#### 3.1.2.1. Balance General

$$\frac{d(h(t))}{dt} = \frac{1}{A} F_0(t) - \frac{1}{A} F(t)$$

*Ecuación 8*

$$\frac{d(h(t))}{dt} = k_1(F_0(t) - F(t))$$

Donde:

$h(t)$ : Nivel de la mezcla.

$F_0(t)$ : Flujo volumétrico de alimentación.

$F(t)$ : Flujo volumétrico de producto.

$A$ : Área del tanque.

$K_1$ :  $\frac{1}{448.83 * A}$  (siendo 448.83 un factor de conversión para convertir  $F$  de Gpm a  $\text{pie}^3/\text{s}$ .)

#### 3.1.2.2. Balance para el componente A

$$\begin{aligned} \frac{d(V(t)CA(t))}{dt} &= F_0(t)CA_0(t) - F(t)CA(t) - V(t)K(T)CA(t) \\ CA(t) \frac{dV(t)}{dt} + V \frac{dCA}{dt} &= F_0(t)CA_0(t) - F(t)CA(t) - V(t)K(T)CA(t) \\ CA(t)A \frac{dh(t)}{dt} + Ah \frac{dCA}{dt} &= F_0(t)CA_0(t) - F(t)CA(t) - V(t)K(T)CA(t) \end{aligned}$$

$$Ah \frac{dCA(t)}{dt} = F_0(t)CA_0(t) - F(t)CA(t) - Ah(t)K(T)CA(t) - CA(t)A \frac{dh(t)}{dt}$$

$$Ah \frac{dCA(t)}{dt} = F_0(t)CA_0(t) - F(t)CA(t) - Ah(t)K(T)CA(t) - CA(t)A[k_1(F_0(t) - F(t))]$$

$$Ah \frac{dCA(t)}{dt} = F_0(t)CA_0(t) - F(t)CA(t) - Ah(t)K(T)CA(t) - (CA(t)Ak_1F_0) - (CA(t)AK_1F)$$

$$\frac{dCA(t)}{dt} = \frac{F_0(t)CA_0(t)}{Ah} - \frac{F(t)CA(t)}{Ah} - \frac{AhK(T)CA(t)}{Ah} - \frac{(CA(t)Ak_1F_0)}{Ah} - \frac{CA(t)AK_1F}{Ah}$$

$$\frac{dCA(t)}{dt} = k_1 \frac{F_0(t)CA_0(t)}{h} - k_1 \frac{F(t)CA(t)}{h} - K(T)CA(t) - \frac{(CA(t)k_1F_0)}{h} - \frac{CA(t)k_1F}{h}$$

$$\frac{dCA}{dt} = k_1 \frac{F_0(t)CA_0(t)}{h} - K(T)CA(t) - k_1 \frac{(CA(t)F_0)}{h}$$

*Ecuación 9*

$$\frac{dCA(t)}{dt} = \frac{k_1F_0(t)}{h} (CA_0 - CA) - (K(T) * CA(t))$$

Donde:

V: Volumen de mezcla.

CA<sub>0</sub>(t): Concentración inicial del reactante.

CA(t): Concentración final del reactante.

K(T): Velocidad de reacción específica.

### 3.1.2.3. Balance para el componente B

$$\frac{d(V(t)CB(t))}{dt} = V(t)K(T)CA(t) - F(t)CB(t)$$

$$\frac{d(V(t)CB(t))}{dt} = V(t)K(T)CA(t) - F(t)CB(t)$$

$$\frac{CBdV}{dt} + \frac{VdCB}{dt} = V(t)K(T)CA(t) - F(t)CB(t)$$

$$\frac{VdCB(t)}{dt} = V(t)K(T)CA(t) - F(t)CB(t) - \frac{CBdV}{dt}$$

$$\frac{AhdCB(t)}{dt} = Ah(t)K(T)CA(t) - F(t)CB(t) - \frac{ACBdh}{dt}$$

$$\frac{AhdCB(t)}{dt} = Ah(t)K(T)CA(t) - F(t)CB(t) - ACB[k_1(F_0(t) - F(t))]$$

$$\frac{dCB(t)}{dt} = K(T)CA(t) - \frac{F(t)CB(t)}{Ah} - \frac{CB[k_1(F_0(t) - F(t))]}{h}$$

$$\frac{dCB(t)}{dt} = K(T)CA(t) - \frac{k_1F(t)CB(t)}{h(t)} - \frac{CBk_1F_0(t)}{h(t)} + \frac{CBk_1F(t)}{h(t)}$$

*Ecuación 10*

$$\frac{dCB(t)}{dt} = K(T) * CA(t) - \frac{CBk_1F_0(t)}{h}$$

Donde:

CB(t): Concentración final del producto.

#### 3.1.2.4. Balance de Energía para el reactor

$$\frac{d(h(t)T(t))}{dt} = k_1F_0(t)T_0(t) - k_1F(t)T(t) - \left(\frac{\mu * ATC}{A\rho C_p}\right)(T(t) - T_j(t)) - \left(\frac{Y}{\rho C_p}\right)h(t)K(T)CA(t)$$

$$\frac{hdT(t)}{dt} = k_1F_0(t)T_0(t) - k_1F(t)T(t) - k_2(T(t) - T_j(t)) - k_3h(t)K(T)CA(t) - \frac{Tdh}{dt}$$

$$\frac{hdT}{dt} = k_1F_0(t)T_0(t) - k_1F(t)T(t) - k_2(T(t) - T_j(t)) - k_3h(t)K(T)CA(t) - T[k_1(F_0(t) - F(t))]$$

$$\frac{hdT(t)}{dt} = k_1F_0(t)T_0(t) - k_1F(t)T(t) - k_2(T(t) - T_j(t)) - k_3h(t)K(T)CA(t) - Tk_1F_0(t) + Tk_1F(t)$$

*Ecuación 11*

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{k_1F_0(t)(T_0(t) - T)}{h} - \frac{k_2(T(t) - T_j(t))}{h} - k_3(t)K(T)CA(t)$$

Donde:

T<sub>0</sub>(t)= Temperatura de alimentación.

T<sub>j</sub>(t)= Temperatura de la chaqueta.

ρ= Densidad de la mezcla reaccionante.

C<sub>p</sub>: Capacidad calórica promedio de la mezcla reaccionante.

$\mu$ : Coeficiente pelicular de transferencia de calor.

ATC: Área de transferencia de calor.

$\Upsilon$ : Calor exotérmico de la reacción.

$$k2: \frac{\mu ATC}{(A\rho C_p) * 3600} \text{ (siendo 3600 un factor de conversión para convertir horas a segundos.)}$$

$$k3: \frac{\Upsilon}{\rho C_p}$$

### 3.1.2.5. Balance de Energía para la camisa de enfriamiento

$$\frac{d(T_j(t))}{dt} = \frac{1}{V_j} F_j(t)(T_{j0} - T_j(t)) + \left(\frac{\mu ATC}{\rho_j C_j V_j}\right) (T(t) - T_j(t))$$

*Ecuación 12*

$$\frac{d(T_j(t))}{dt} = k4 F_j(t)(T_{j0} - T_j(t)) + k5 (T(t) - T_j(t))$$

Donde:

$F_j(t)$ : Flujo volumétrico de la alimentación de la chaqueta.

$T_{j0}$ : Temperatura de alimentación de la chaqueta.

$\rho_j$ : Densidad del líquido dentro de la chaqueta.

$C_j$ : Capacidad calórica dentro de la chaqueta.

$V_j$ : Volumen de la Chaqueta.

$$k4: \frac{1}{V_j}$$

$$k5: \frac{\mu ATC}{(\rho_j C_j V_j) * 3600}$$

### 3.1.2.6. Velocidad de reacción

#### Ecuación 13

$$K(T) = K_0 * e^{-\left(\frac{K_6}{T(t)}\right)}$$

Donde:

T(t): temperatura dentro del tanque.

K<sub>0</sub>: factor pre-exponencial de Arrhenius.

E: energía de activación.

R: constante universal de los gases.

$$k_6: \frac{E}{R}$$

### 3.1.2.7. Flujo de salida para el control de válvula

$$F = C_v V_p(t) \sqrt{\frac{c_f g h}{144 * g_c * G}}$$

#### Ecuación 14

$$F = V_p(t) \sqrt{h} k_7$$

Donde:

C<sub>v</sub>: coeficiente de dimensionamiento de la válvula.

V<sub>p</sub>(t): fracción de apertura de la válvula de salida de producto, adimensional.

g: aceleración de la gravedad.

g<sub>c</sub>: factor de conversión.

G: gravedad específica del líquido que fluye a través de la válvula, adimensional.

$$k_7: C_v \sqrt{\frac{c_f g}{144 * g_c * G}}$$

### 3.1.2.8. Flujo para el control de agua fría

$$F_j = C_{vj} V_{pj} \sqrt{\frac{\Delta P_j}{G_j}}$$

Ecuación 15

$$F_j = V_{pj} K_8$$

Donde:

$V_{pj}(t)$ : fracción de apertura de la válvula de entrada de agua fría a la chaqueta, adimensional.

$C_{vj}$ : coeficiente de dimensionamiento de la válvula.

$\Delta P_j$ : caída de presión a través de la válvula.

$G_j$ : gravedad específica del agua fría que fluye a través de la válvula, adimensional.

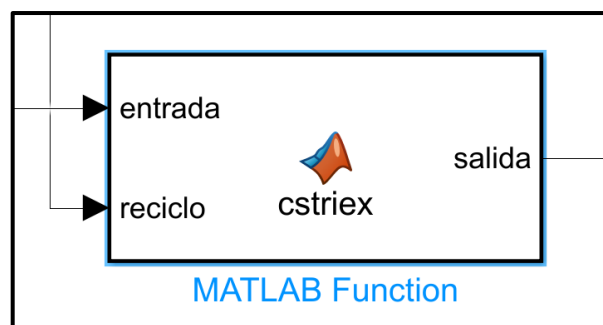
$$K_8 = \left( \frac{C_{vj} \sqrt{\frac{\Delta P_j}{G_j}}}{448.83} \right)$$

## 3.2. Modelado en Simulink

En la aplicación de SIMULINK de MATLAB se realiza el modelado utilizando diagramas de bloques según lo que se requiere; aquí se detallan valores, variables o constantes según la función de los mismos.

Los bloques de parámetros que se utilizaron para el modelado en Simulink son:

### 3.2.1. MATLAB Function



**Figura 2-3:** Bloque matlab function.

Realizado por: VACA B., 2021.

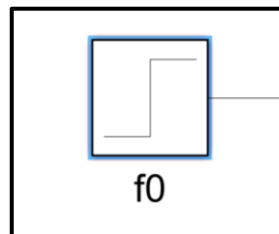
En este bloque se describen 3 vectores, entrada, salida y reciclo, así como las ecuaciones del modelado matemático.

### 3.2.1.1. Vector de entrada

Dentro de este vector se encuentran las variables que ingresan a este diagrama de bloque lo que permitirá calcular las variables de salida.

Las variables que ingresan para el cálculo son:

- *Flujo de entrada. (f0)*

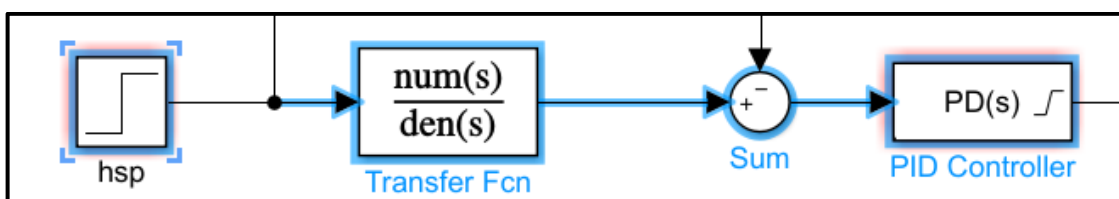


**Figura 3-3:** Bloque step para f0.

Realizado por: VACA B., 2021.

El flujo de entrada al ser una variable perturbadora, se ha utilizado un bloque llamado Step, este está diseñado para que el flujo cambie en un tiempo establecido de forma repentina según lo que el usuario requiera.

- *Fracción de apertura de la válvula de salida de producto. (vp)*



**Figura 4-3:** Bloques que forman la línea de entrada para vp.

Realizado por: VACA B., 2021.

Esta variable corresponde al grado de apertura de la válvula para el control del flujo de salida de producto, aquí se utiliza: bloque Step, bloque Transfer Fcn, Sum, PID Controller.

El bloque Step es utilizado para colocar en variables la altura inicial y final del SP así como el tiempo de control del mismo.



El bloque de Transfer Fcn, se utiliza únicamente para que la variable tiempo no se sobrescriba el mismo valor produciendo un error de cálculo.

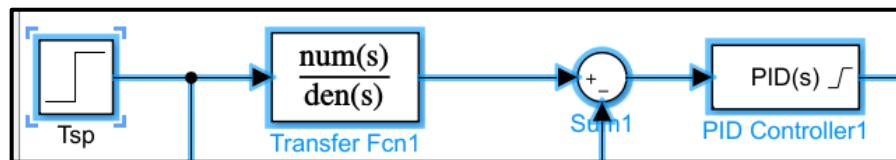
**Tabla 1-3:** Condiciones para el bloque transfer fcn.

Condiciones	Valor
Coefficiente del numerador.	1
Coefficientes del denominador.	0.001 1

Realizado por: VACA B., 2021.

En el bloque PID Controller, está configurado para ubicar el valor de kp2, ki2, kd2, de las constantes del control proporcional, integral y derivativo respectivamente, los cuales se obtuvieron mediante el Pid Tuner.

- *Fracción de apertura de la válvula de entrada de agua fría a la chaqueta. (vpj)*



**Figura 5-3:** Bloques que forman la línea de entrada para vpj.

Realizado por: VACA B., 2021.

La variable Vpj que corresponde a la apertura de válvula para la entrada de agua fría a la chaqueta, está acompañada al igual que Vp, bloques de: Step, Transfer Fcn, Sum y PID controller.

De igual forma bloque Step es utilizado para colocar en variables la altura inicial y final del SP así como el tiempo de control.

El bloque de Transfer Fcn, realiza la misma función en esta línea, que no se sobrescriba el mismo valor produciendo un error de cálculo.

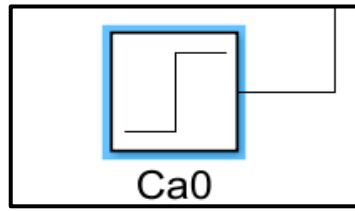
**Tabla 2-3:** Condiciones para el bloque transfer fcn.

Condiciones	Valor
Coefficiente del numerador.	1
Coefficientes del denominador.	0.001, 1

Realizado por: VACA B., 2021.

En el bloque PID Controller, está configurado para ubicar el valor de kp1, ki1, kd1, de las constantes del control proporcional, integral y derivativo respectivamente, los cuales se obtuvieron mediante la linealización previamente en el Pid Tuner.

- *Concentración inicial. (Ca0)*

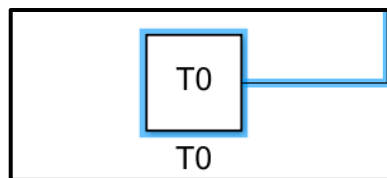


**Figura 6-3:** Bloque step para Ca0.

Realizado por: VACA B., 2021.

Al ser la concentración inicial una perturbación se ha utilizado un bloque Step, en el cual se podrá colocar valores como: tiempo de salto de Ca0 ( $t_{ca0}$ ), flujo inicial ( $ca0i$ ) y flujo final ( $ca0f$ ).

- *Temperatura inicial en el reactor. (T0)*

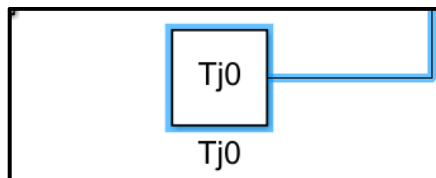


**Figura 7-3:** Bloque constant para T0.

Realizado por: VACA B., 2021.

La temperatura a la entrada del reactor es una entrada fija, y para este se ha usado un bloque Constant.

- *Temperatura inicial en la chaqueta. (Tj0)*

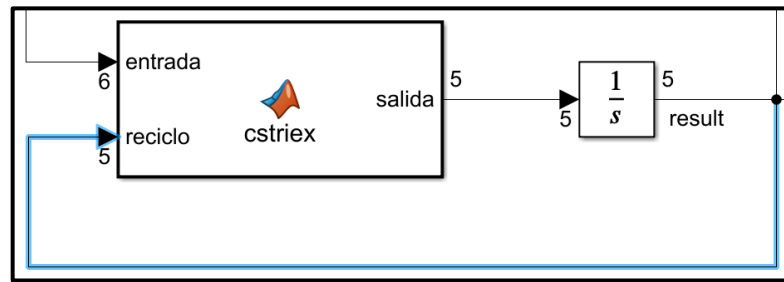


**Figura 8-3:** Bloque constant para Tj0.

Realizado por: VACA B., 2021.

La temperatura a la entrada de la camisa de refrigeración del reactor es una entrada fija, usándose un bloque Constant.

### 3.2.1.2. Vector reciclo

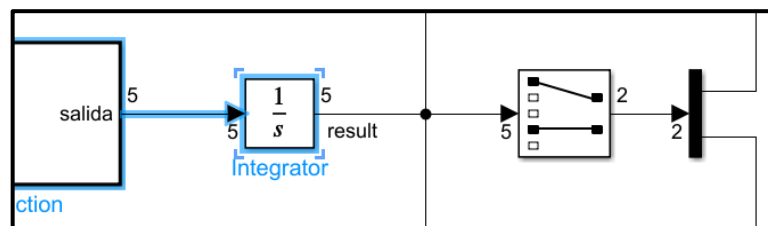


**Figura 9-3:** Línea del vector reciclo.

Realizado por: VACA B., 2021.

El vector reciclo calcula las variables en un tiempo  $t$  y lo utiliza para realizar el cálculo en un tiempo  $t+1$ ; repitiéndose este cálculo hasta el tiempo final de la simulación  $t_f$ ,

### 3.2.1.3. Vector salida



**Figura 10-3:** Línea del vector salida.

Realizado por: VACA B., 2021.

Aquí se calcula el resultado en un tiempo final  $t_f$ , a diferencia del vector reciclo, es decir, este vector proporciona los resultados del modelado.

Estas variables son:

$h$  = Nivel del reactor

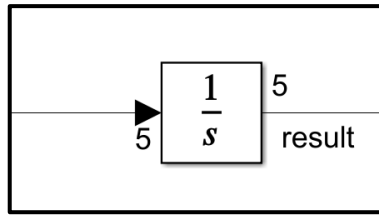
$C_a$  = Concentración de A.

$C_b$  = Concentración de B.

$T$  = Temperatura del reactor.

$T_j$  = Temperatura de la chaqueta.

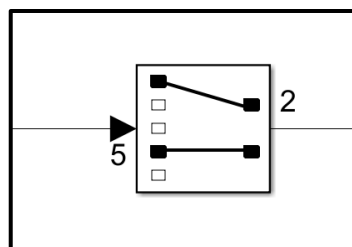
Estos datos pasan por un bloque Integrador el cual proporciona el método numérico a utilizar, este está en modo auto, es decir que el bloque determinará automáticamente tomando en consideración las ecuaciones que método aplicará.



**Figura 11-3:** Bloque integrador.

Realizado por: VACA B., 2021.

El bloque selector se encarga de seleccionar las variables, en este caso la altura y la temperatura del reactor, que son tomadas como señal que ingresa al bloque Sum para el controlador del nivel y temperatura respectivamente.

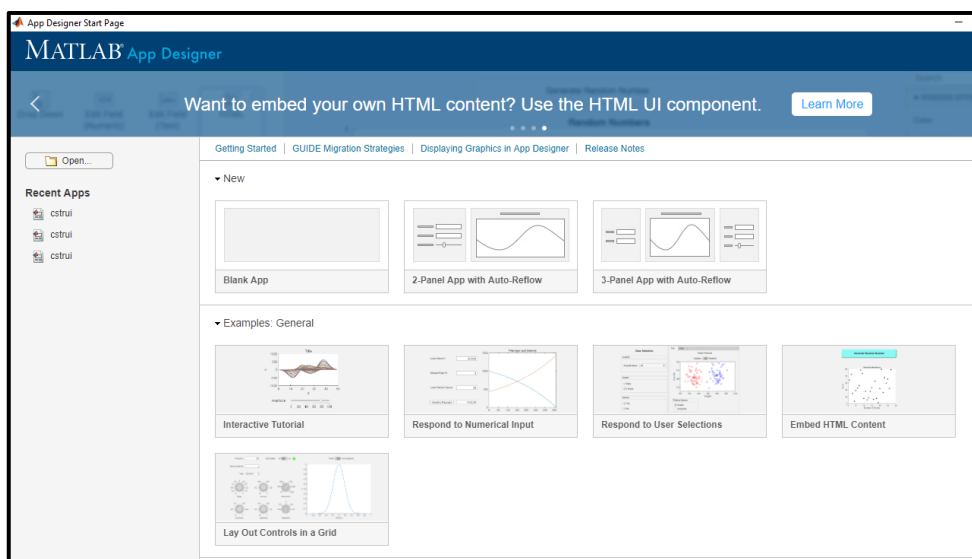


**Figura 12-3:** Bloque selector.

Realizado por: VACA B., 2021.

### 3.3. Creación de la Interfaz

La creación de la Interfaz gráfica didáctica se realiza en una aplicación de Matlab, esta es Design App.

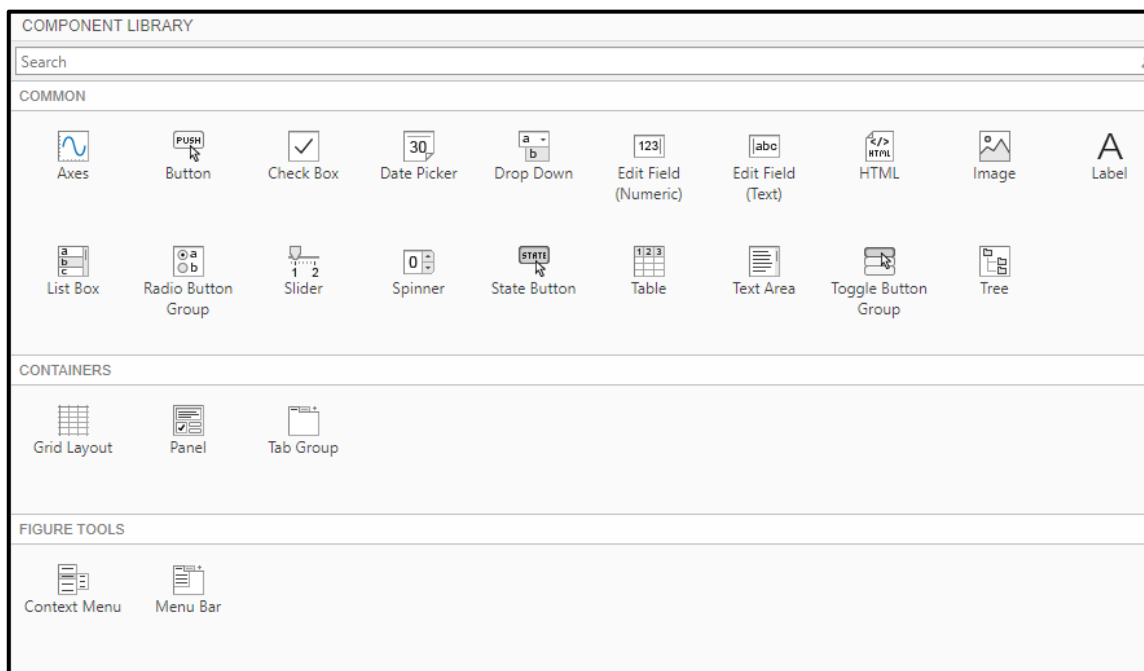


**Figura 13-3:** Ventana de app design.

Realizado por: VACA B., 2021.

La opción que nos permite crear una app desde cero es Blank App, esta nos proporciona una nueva ventana con múltiples opciones proporcionadas por el Software de Matlab y su aplicación, que dota al usuario de herramientas propias suficientes para crear una interfaz gráfica, funcional, fácil de usar y profesional.

Los componentes de la librería de Design App se muestran a continuación:



**Figura 14-3:** Ventana de component library de app design.

Realizado por: VACA B., 2021.

En la parte superior derecha de la ventana central de App Design, se encuentra dos comandos: Design View y Code View.

### 3.3.1. *Design View*

Esta opción nos da una vista del diseño visual que le damos a la interfaz, esto se logra haciendo uso de los diferentes componentes de la librería de Design App.

En este apartado se brinda la oportunidad al usuario de crear el aspecto de la App según la necesidad y características que deba tener la misma.

Para la creación de esta app se utilizó los siguientes componentes de la librería de Design App:

### 3.3.1.1. *Grid Layout*



**Figura 15-3:** Componente grid layout.

**Realizado por:** VACA B., 2021.

Este componente fue utilizado para crear espacios y divisiones de forma simétrica, que sea fácil de interpretar visualmente, logrando así una interfaz ordenada y accesible según la forma en la que se quiera distribuir los diferentes comandos en la interfaz gráfica.

### 3.3.1.2. *Panel*

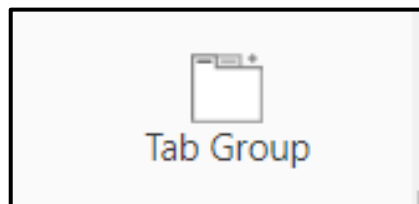


**Figura 16-3:** Componente panel.

**Realizado por:** VACA B., 2021.

Esta opción proporciona al creador un espacio que puede a su vez agregar nuevos componentes de la librería, teniendo como finalidad crear dentro del panel general más subpaneles que se pueden utilizar para agregar textos, imágenes, valores numéricos, etc.

### 3.3.1.3. *Tab Group*



**Figura 17-3:** Componente tab group.

**Realizado por:** VACA B., 2021.

Con la ayuda de esta herramienta podemos crear un diseño que nos permita crear varias ventanas, las cuales nos abran un apartado diferente el cual podrá ser editado a la necesidad del usuario y de la aplicación.

#### 3.3.1.4. *Axes*

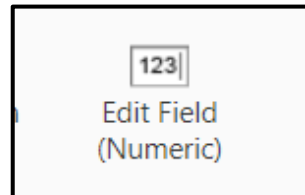


**Figura 18-3:** Componente axes.

Realizado por: VACA B., 2021.

Este es un comando que nos permite realizar gráficos que muestren resultados justando a una escala cada uno de los ejes  $x$  y  $y$  de modo que grafique el valor mínimo y el máximo.

#### 3.3.1.5. *Edit Field (Numeric)*

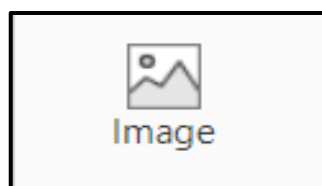


**Figura 19-3:** Componente edit field (Numeric).

Realizado por: VACA B., 2021.

Este comando es esencial para la creación de interfaces de cálculo, ya que nos da la opción de agregar valores numéricos los cuales se utilizarán para realizar cálculos, es decir que estos datos podrán ser editables según el uso de estudio que se le dé a la Aplicación.

#### 3.3.1.6. *Image*



**Figura 20-3:** Componente image.

Realizado por: VACA B., 2021.

Con este apartado podremos agregar o insertar imágenes desde nuestro equipo hacia la aplicación, para que nos muestre una información visual de algún texto, valor u otro comando, que nos ayude a comprender o identificar ciertos parámetros.

#### 3.3.1.7. *Label*

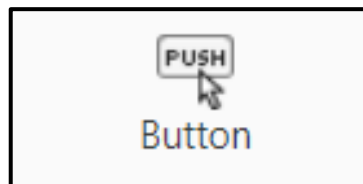


**Figura 21-3:** Componente label.

Realizado por: VACA B., 2021.

Label nos da la facilidad de agregar cuadros de texto en la Aplicación, este se utilizó para nombrar las ventanas de forma general, así como dar una identidad a los diferentes tipos de gráficos.

#### 3.3.1.8. *Button*



**Figura 22-3:** Componente button.

Realizado por: VACA B., 2021.

Esta herramienta permite crear botones funcionales tales como resolver, Workspace, Save MAT y Salir, los cuales cumplen funciones diferentes que están especificadas en el código de la aplicación.

### 3.4. **Conexión Interfaz – Simulink**

En la ventana de Design App se encuentra el comando Code View, este genera el código del diseño automáticamente en base a lo que se creó en el comando Design View, además aquí se puede crear de forma manual funciones y propiedades que ayudan al funcionamiento final de la interfaz.



En el Code View lo primero que se debe de hacer es asignar propiedades a los componentes que se ingresaron en el Code View, estas propiedades son: data y model.

Data, ingresado dentro del código como app.data, se utiliza para que los componentes correspondientes a Edit Field (numeric) permitan a la aplicación editar e ingresar datos de numéricos; mientras que Model, ingresado como código app.model, crea vectores o una compilación de datos de resultados que se utilizaran para realizar específicamente gráficos.

Para la conexión Interfaz Simulink, esta llama a Simulink mediante la función runSim(app), y esta proporciona la facilidad que Simulink realice e interprete los valores que se inserta en la App. Dentro de esta función se detalla los parámetros, constantes y variables que se utilizaran para el cálculo en Simulink.

```
function runSim(app)

    app.toggleUIC('off', 'Simulando...');

    %Create a function to run the simulation
    simInp = Simulink.SimulationInput('cstrPID');

    simInp = simInp.setModelParameter('StartTime', num2str(app.data.cfg(1)));
    simInp = simInp.setModelParameter('Stoptime', num2str(app.data.cfg(2)));

    simInp = simInp.setVariable('kp1', app.data.cont(4));
    simInp = simInp.setVariable('k1', app.data.cont(5));
    simInp = simInp.setVariable('ki1', app.data.cont(6));
    simInp = simInp.setVariable('N1', app.data.cont(7));

    simInp = simInp.setVariable('kp2', app.data.cont(8));
    simInp = simInp.setVariable('kd2', app.data.cont(9));
    simInp = simInp.setVariable('ki2', app.data.cont(10));
    simInp = simInp.setVariable('N2', app.data.cont(11));

    simInp = simInp.setVariable('Tspi', app.data.cont(12));
    simInp = simInp.setVariable('Tspf', app.data.cont(13));
    simInp = simInp.setVariable('tsp_t', app.data.cont(14));

    simInp = simInp.setVariable('hspl', app.data.cont(15));
    simInp = simInp.setVariable('hspf', app.data.cont(16));
    simInp = simInp.setVariable('tsp_h', app.data.cont(17));

    simInp = simInp.setVariable('t_sf0', app.data.input(1));
    simInp = simInp.setVariable('f0i', app.data.input(2));
    simInp = simInp.setVariable('f0f', app.data.input(3));

    simInp = simInp.setVariable('t_ca0', app.data.input(4));
    simInp = simInp.setVariable('Ca0i', app.data.input(5));
    simInp = simInp.setVariable('Ca0f', app.data.input(6));
```

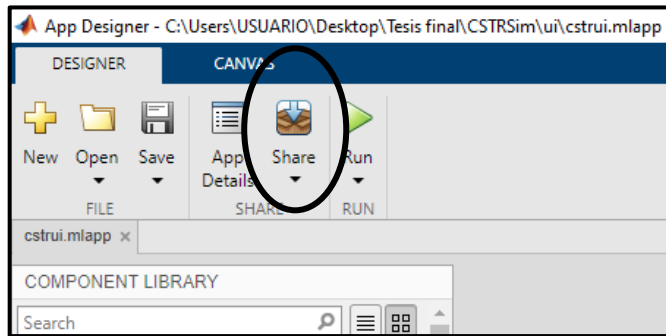
**Figura 23-3:** Código de conexión interfaz – simulink.

Realizado por: VACA B., 2021.

### 3.5. Exportación de la interfaz didáctica

La interfaz diseñada debe ser una aplicación de simulación que sea independiente de Matlab y de acceso libre.

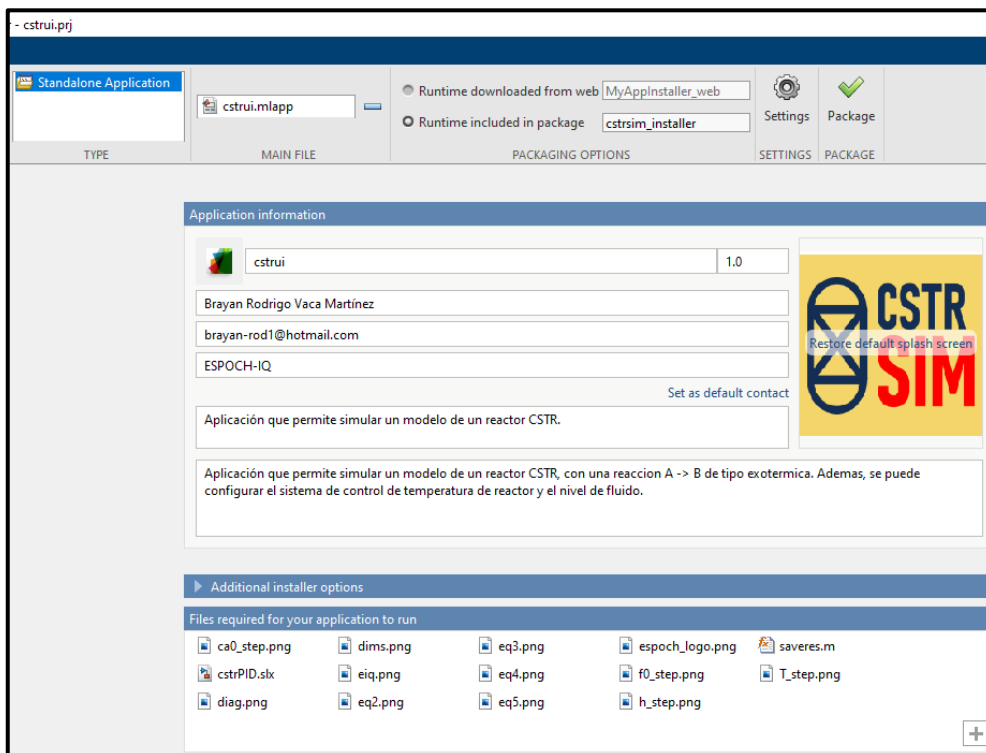
Una vez diseñada la aplicación, insertada propiedades y funciones, se selecciona desde la Ventana de Design App el comando Share que se muestra en la figura 24-3.



**Figura 24-3:** Herramientas de la ventana app designer.

Realizado por: VACA B., 2021.

Posteriormente escogemos la opción Standalone desktop App, que es la que nos permite usar la interfaz como una aplicación de Escritorio independiente; posteriormente se abre una nueva ventana como se muestra en la figura 25-3.



**Figura 25-3:** Ventana de compilación de la aplicación.

Realizado por: VACA B., 2021.

Aquí se detalla el nombre del instalador y la carpeta en la que se guarda la app, autor y dirección de correo electrónica, imagen del instalador, así como una breve descripción de la misma y una ventana donde se evidencia los archivos que utiliza para su funcionamiento.

Finalmente se utiliza el comando Package, la cual da paso a la compilación y creación de carpetas y archivos instaladores que se guardaran donde se haya seleccionado previamente como se muestra en la figura 26-3 a continuación.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
for_testing	13/3/2021 21:11	Carpeta de archivos	
for_redistribution	13/3/2021 21:11	Carpeta de archivos	
for_redistribution_files_only	13/3/2021 21:11	Carpeta de archivos	

**Figura 26-3:** Creación de carpetas a partir del compilado.

Realizado por: VACA B., 2021.

### 3.6. Validación.

Para la validación se debió hallar el error porcentual o sesgo, este se puede calcular dividiendo el sesgo (valor teórico - calculado) entre el valor teórico y este a su vez es multiplicado por 100.

Para la precisión del modelo, el error obtenido debe ser igual o menor a  $\frac{1}{4}$  del error total esto es  $\leq 0,25$  ET (error total permitido) (UNODC 2010).

La validación se realizó teniendo en cuenta las concentraciones tanto de producto que se forma como el reactivo que se consume en el reactor CSTR, en el cual se comparó la concentración del producto para el modelado de un artículo científico, es decir, para el componente B (UNODC 2010). Los parámetros para la validación del modelado y del reactor se detallan a continuación:

#### 3.6.1. Parámetros y constantes del reactor.

**Tabla 3-3:** Parámetros de la estructura del reactor.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Diámetro (D)	5	Pie
Altura del reactor (h)	6.5	Pie
Espesor de la chaqueta ( $E_j$ )	0.5	Pie
Altura de la chaqueta ( $h_j$ )	5	Pie

Realizado por: VACA B., 2021.

**Tabla 4-3:** Constantes.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Factor de conversión (gc)	32.2	lbm pies/lbf s <sup>2</sup>
Gravedad (g)	32.2	pies/s <sup>2</sup>
Constante de gas ideal (R)	1.99	Btu/lbmol °R

Realizado por: VACA B., 2021.

**Tabla 5-3:** Condiciones termodinámicas.

Parámetro	Valor	Unidades
Coefficiente de transferencia de calor ( $\mu$ )	150	Btu/h°Rpie <sup>2</sup>
Densidad de la mezcla ( $\rho$ )	50	Lbm/pie <sup>3</sup>
Densidad del flujo en la chaqueta ( $\rho_{oj}$ )	62.3	Lbm/pie <sup>3</sup>
Calor específico de la mezcla A+B ( $C_p$ )	0.75	Btu/lbm°R
Calor específico del agua fría de la chaqueta ( $C_{pj}$ )	1	Btu/lbm°R
Gravedad específica de la mezcla A+B ( $G_w$ )	0.80	Adimensional
Gravedad específica del agua fría en la chaqueta ( $G_j$ )	0.99	Adimensional

Realizado por: Peña et al., 2008.

**Tabla 6-3:** Condiciones de la reacción.

Parámetro	Valor	Unidades
Energía de activación (E)	30000	Btu/lb <sub>mol</sub>
Calor de reacción ( $\lambda$ )	-30000	Btu/lb <sub>mol</sub>
Factor pre-exponencial de Arrhenius (k <sub>0</sub> )	$1.967 \times 10^7$	s <sup>-1</sup>

Realizado por: Peña et al., 2008.

**Tabla 7-3:** Condiciones de entrada.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de entrada al reactor ( $f_0$ ).	4.92	Gpm
Concentración inicial de A ( $CA_{0i}$ ).	0.5	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
Concentración perturbación de A ( $CA_{0f}$ )	0.55	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
Tiempo de la perturbación de la concentración.	12	S
Temperatura del flujo de entrada. ( $T_0$ )	530	°R
Temperatura del flujo en la chaqueta ( $T_{j0}$ )	594.6	°R

Realizado por: Peña et al., 2008.

**Tabla 8-3:** Condiciones iniciales (tiempo =0) y configuración.

Parámetro	Valor	Unidades
Altura del líquido en el reactor.	0.1	Pies
Concentración inicial de A (CA0).	0.5	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
Concentración inicial de B (CB0).	0.245	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
Temperatura del Reactor	600	°R
Temperatura de la chaqueta	594.6	°R
Tiempo inicial de simulación	0	S
Tiempo final de la simulación	25000	S
Tamaño de salto	0.03	S

Realizado por: Peña et al., 2008.

**Tabla 9-3:** Condiciones de las válvulas.

Parámetro	Valor	Unidades
Coficiente de la válvula V002 (Cv)	5.28	Gpm/psi <sup>0.5</sup>
Coficiente de la válvula V001 (Cvj)	9.86	Gpm/psi <sup>0.5</sup>
Caída de presión (dpj)	2	psi

Realizado por: Peña et al., 2008.

### 3.7. Creación de un manual de Usuario

Para el mejor uso y entendimiento de la aplicación, se pretende desarrollar un manual de procedimientos que explique paso a paso el proceso de instalación como una aplicación independiente, y la instalación con el código fuente de la aplicación con el uso del software de MATLAB.

El Manual de usuario muestra también cada uno de los parámetros editables dentro de la aplicación, su definición y las unidades en las que se encuentra dicho valor.

El Manual se dividirá en las secciones que muestra la ventana de la aplicación, como son la estructura, valores termodinámicos donde intervienen las condiciones de la reacción, control y válvulas, condiciones de entrada, condiciones iniciales y la configuración del tiempo de la simulación.

Este servirá como uso para mejorar el desempeño de la aplicación tanto para usuarios estudiantes como docentes.

## CAPÍTULO IV

### 4. GESTIÓN DEL PROYECTO

#### 4.1. Cronograma

**Tabla 1-4:** Cronogramas de actividades.

<i>Actividad</i>	<i>Meses</i>																																								
	<i>Octubre</i>	<i>Noviembre</i>	<i>Diciembre</i>	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	<i>Marzo</i>	<i>Abril</i>	<i>Mayo</i>	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>																															
	<i>Semanas</i>																																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
<i>Obtención de Información</i>	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																
<i>Elaboración de Anteproyecto</i>	█	█	█	█	█																																				
<i>Determinación de variables y ecuaciones</i>		█	█	█	█	█	█	█	█	█																															
<i>Modelado en Simulink</i>										█	█	█	█	█	█																										
<i>Creación de la interfaz</i>																		█	█	█	█																				

<i>Desarrollo del manual de usuario</i>																																			
<i>Elaboración del trabajo final</i>																																			
<i>Análisis de costo</i>																																			
<i>Revisión del trabajo final</i>																																			
<i>Defensa de los resultados obtenidos</i>																																			

Realizado por: Vaca B., 2021.

## 4.2. Presupuesto

Tabla 2-4: Presupuesto por actividad para el trabajo de titulación.

Presupuesto			
Actividad	Monto	Tipo de financiamiento	
		Interna	Externa
Curso de Matlab	\$250	X	
Papel de impresión	\$10	X	
Copias e Impresiones	\$40	X	
Empastados	\$60	X	
Imprevistos	\$60	X	
<b>TOTAL</b>			420

Realizado por: Vaca B., 2021.

## 4.3. Recursos y materiales

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación se utilizaron los siguientes softwares y equipo:

- Ordenador Portátil Lenovo (Intel(R) Core (TM) i7-8550U CPU @ 1.80GHz 1.99 GHz, 8th generación.): Equipo utilizado para el procesamiento de los softwares necesarios para el desarrollo de este trabajo.
- MATLAB (Versión R2020a): Declaración de variables y parámetros.
- Simulink de MATLAB: Modelado de las ecuaciones que rigen el reactor CSTR.
- App Designer de MATLAB: creación de la interfaz gráfica que se conecta con Simulink y MATLAB para el cálculo de los resultados.

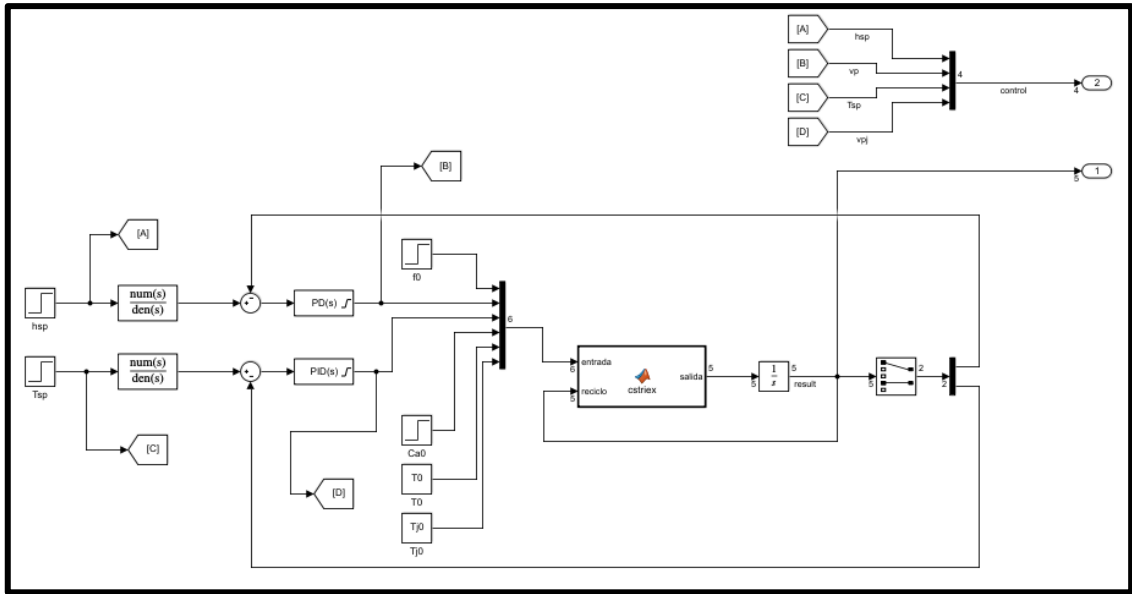
## 4.4. Discusión y análisis de resultados

### 4.4.1. Resultado del modelado e interfaz gráfica

En la Figura 1-4 se muestra el diagrama de bloque final producto de la modelación del reactor de tanque agitado continuo (CSTR).

Este cuenta con 6 entradas al bloque central tal, así como el vector reciclo y salida; en las entradas 2 y 3 que corresponden a  $v_p$  y  $v_{pj}$ , que determinan el control del nivel y temperatura, se ha tomado un bloque de señal, el mismo que permitió realizar el control respectivo y posteriormente tomar este valor y realizar el gráfico correspondiente.

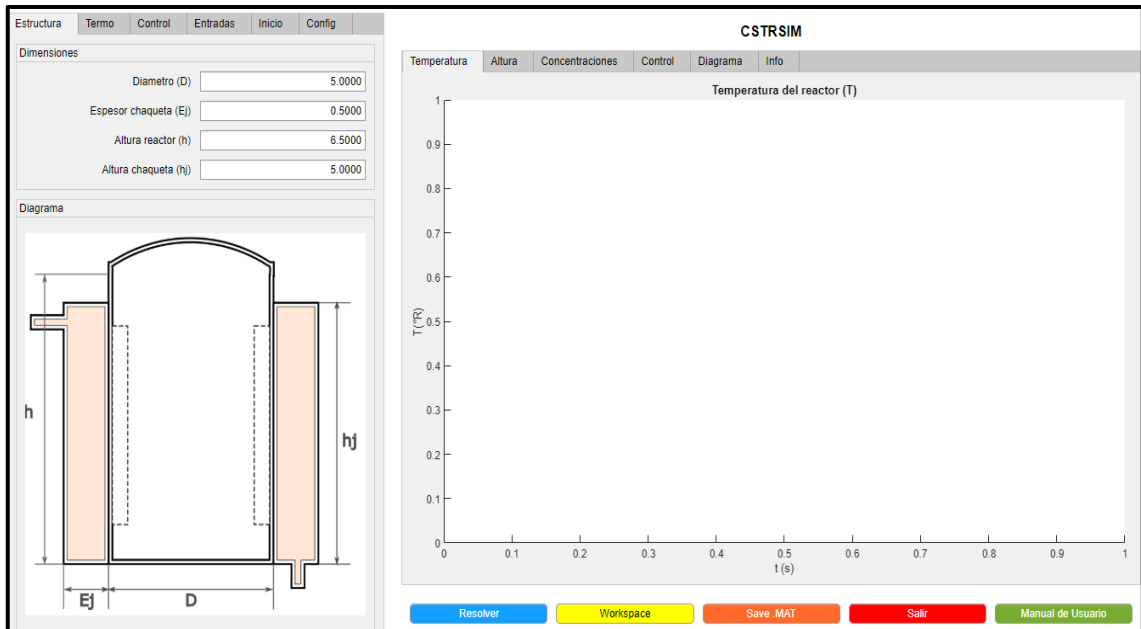




**Figura 1-4:** Modelado en simulink.

Realizado por: VACA B., 2021.

Como resultado del diseño en App Designer, se obtuvo una interfaz didáctica como se muestra en la figura 2-4, con dos ventanas generales, la primera permite editar parámetros de estructura del reactor, térmicos, control, entradas, condiciones iniciales y configuración del tiempo del modelado, y la segunda que simula el comportamiento en un tiempo determinado de la temperatura, altura, concentración y control.



**Figura 2-4:** Ventana principal de la interfaz didáctica.

Realizado por: Vaca B., 2021.

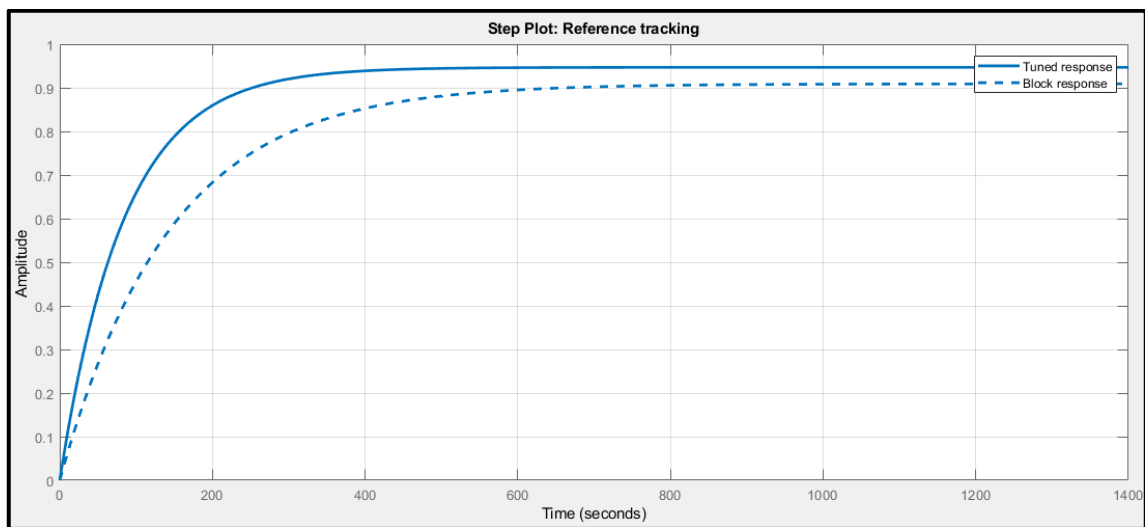
#### 4.4.2. Resultados para el control de nivel y temperatura según PID Tuner

##### 4.4.2.1. Controles para el nivel y sus constantes

Los resultados de las constantes  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  y  $N$  para la línea vp del control de nivel según PID tuner, se obtuvieron mediante la selección entre los controles: Proporcional (P), Integral (I), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID), el mejor control se eligió en base a las gráficas y los resultados que este arrojaba.

- *Control proporcional.*

Para el modelo de Simulink, PID Tuner resolvió que para la curva de control mostrada en la figura 3-4, con un tiempo de respuesta de 178 segundos y una robustez de 0.6 siendo esta una función la cual ayuda a ajustar de mejor manera el control ante la presencia de perturbaciones, se obtuvieron los resultados que refleja la figura 4-4, el cual corresponde a un control Proporcional.



**Figura 3-4:** Curva del control proporcional por PID Tuner.

Realizado por: Vaca B., 2021.

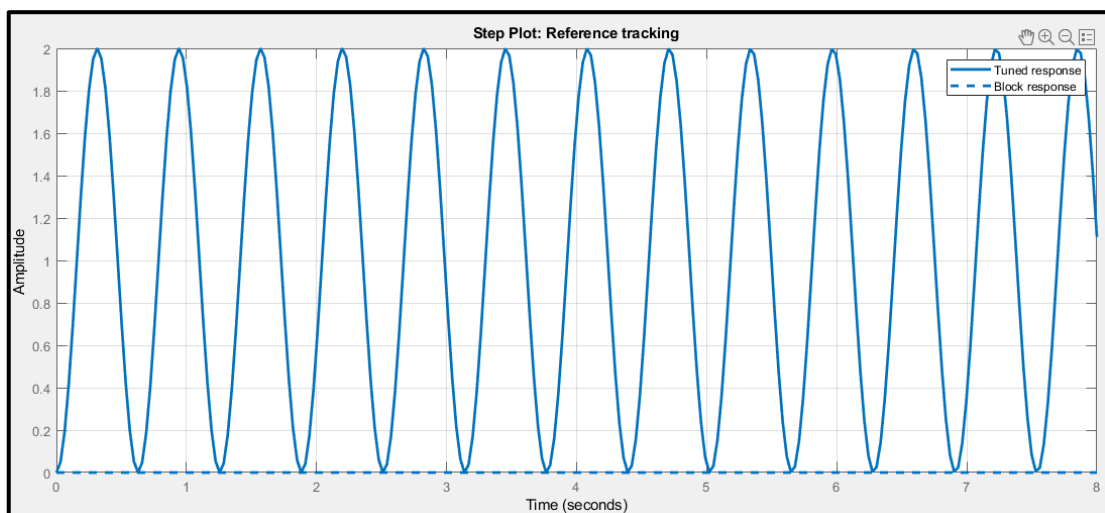
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-89.191	-50
I	n/a	n/a
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	185 seconds	316 seconds
Settling time	329 seconds	563 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	0.947	0.909
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	93.2 deg @ 0.0113 rad/s	95.7 deg @ 0.00629 ra...
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 4-4:** Resultados para el control proporcional del nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control Integral*

La figura 5-4, muestra la curva de control Integral para el nivel con un tiempo de respuesta de 0.2 segundos, siendo los resultados que arrojan los que se muestran en la figura 6-4.



**Figura 5-4:** Curva de control integral para el nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

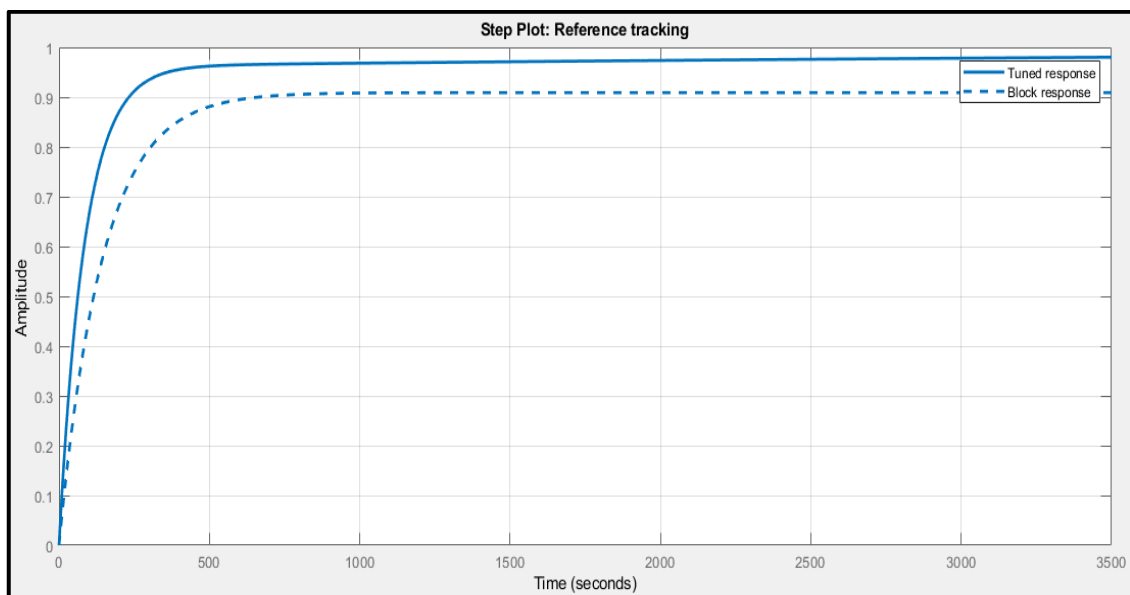
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	n/a	n/a
I	-791081.7952	0
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	NaN seconds	0 seconds
Settling time	NaN seconds	0 seconds
Overshoot	NaN %	Inf %
Peak	Inf	0
Gain margin	0 dB @ 10 rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	0 deg @ 10 rad/s	Inf deg @ NaN rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 6-4:** Resultados para el control integral del nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control Proporcional-Integral*

En la figura 7-4, se observa la curva de un control Proporcional-Integral en un tiempo de respuesta de 178 segundos y una robustez de 0.9, obteniendo los resultados que se muestran en la figura 8-4.



**Figura 7-4:** Curva de control proporcional-integral para el nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

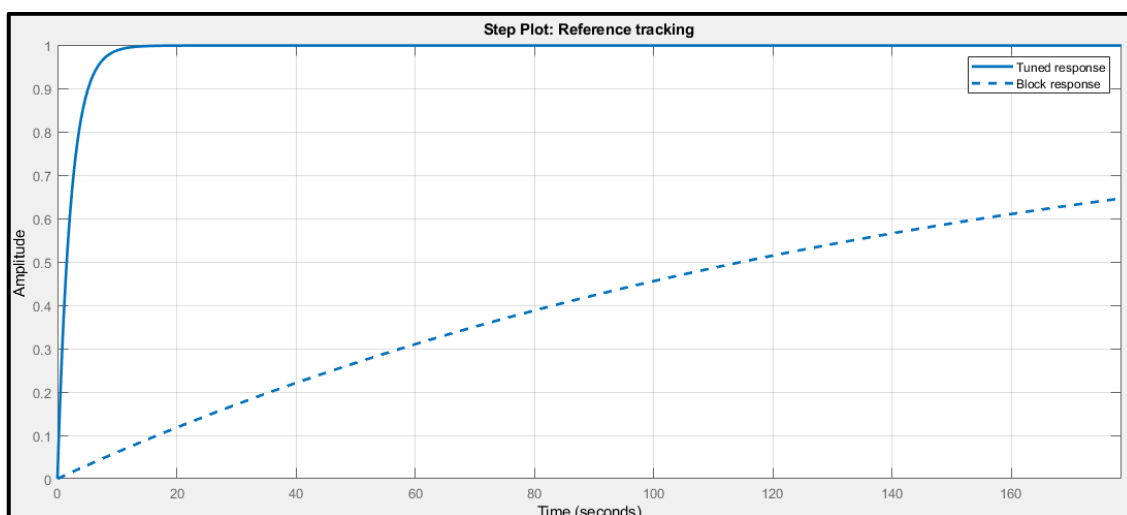
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-89.1774	-50
I	-0.017569	0
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	223 seconds	316 seconds
Settling time	3.44e+03 seconds	563 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	0.987	0.909
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	92.2 deg @ 0.0113 rad/s	95.7 deg @ 0.00629 ra...
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 8-4:** Resultados para el control proporcional-integral del nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control Proporcional-Derivativo.*

En la figura 9-4, se observa la curva del control Proporcional-Derivativo con un tiempo de respuesta de 4.463 segundos y una robustez de 0.9, arrojando resultados que se reflejan en la figura 10-4.



**Figura 9-4:** Curva de control proporcional-derivativo del nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

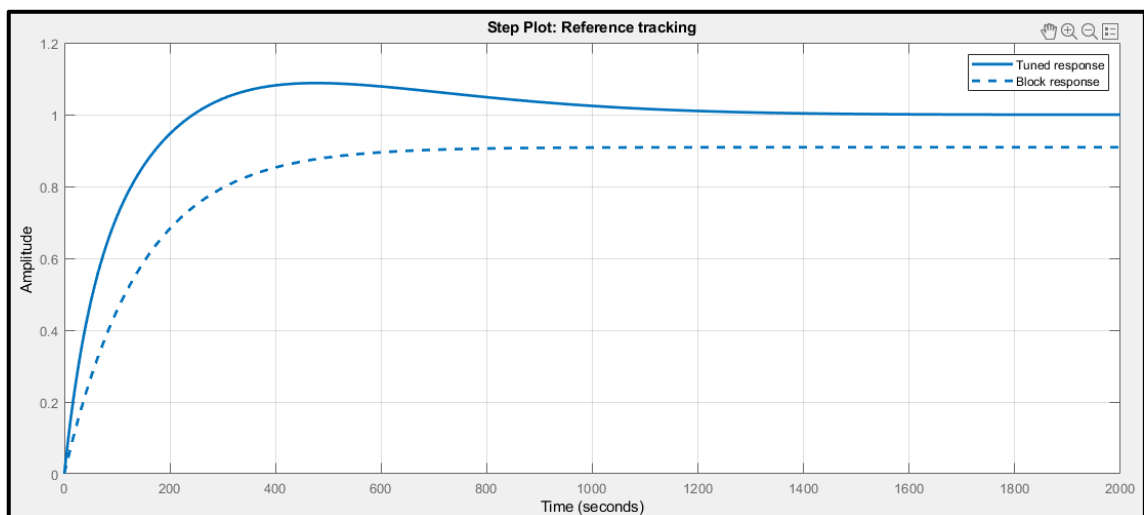
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-3545.1788	-50
I	n/a	n/a
D	0	0
N	100	100
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	4.9 seconds	316 seconds
Settling time	8.72 seconds	563 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	0.999	0.909
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	90.1 deg @ 0.448 rad/s	95.7 deg @ 0.00629 ra...
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 10-4:** Resultados para el control proporcional-derivativo del nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control Proporcional-Integral-Derivativo*

En la figura 11-4 se presenta la curva del control Proporcional-Integral-Derivativo para el nivel con un tiempo de respuesta 178 segundos y una robustez de 0.9, dando como resultados los valores que se detallan en la figura 12-4.



**Figura 11-4:** Curva de control proporcional-integral-derivativo para el nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-78.8004	-50
I	-0.22039	0
D	-1935.3311	0
N	0.01601	100
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	164 seconds	316 seconds
Settling time	1.05e+03 seconds	563 seconds
Overshoot	8.78 %	0 %
Peak	1.09	0.909
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	90 deg @ 0.0113 rad/s	95.7 deg @ 0.00629 ra...
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 12-4:** Resultados para el control proporcional-derivativo-integral del nivel.

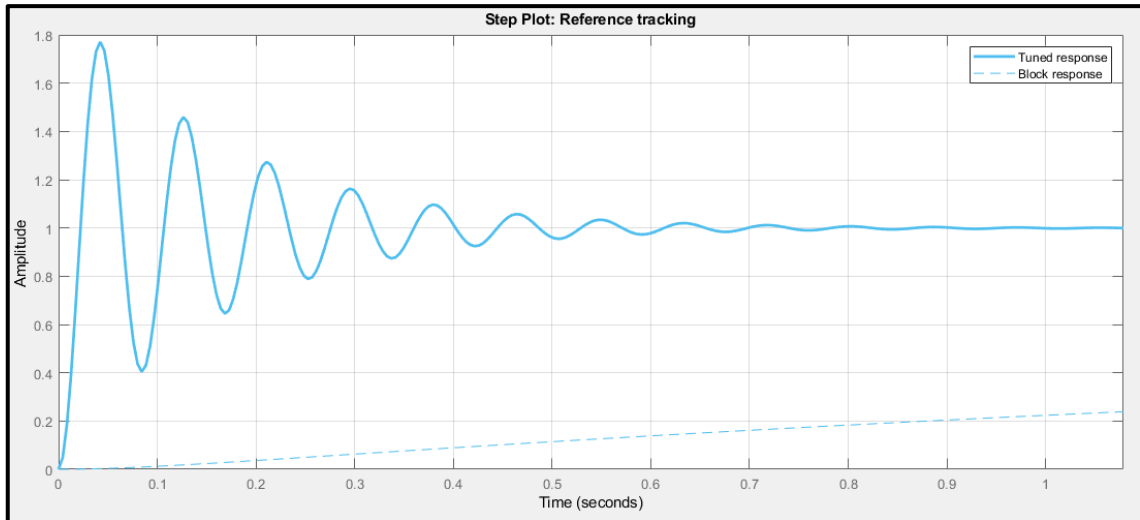
Realizado por: Vaca B., 2021.

#### 4.4.2.2. Controles para la Temperatura y sus constantes

El valor de las constantes  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  y  $N$  para la línea  $v_{pj}$  del control de temperatura según la aplicación PID Tuner, se obtuvieron mediante la selección entre los controles: Proporcional (P), Integral (I), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID), al igual que en el control del nivel, de la misma forma se basa en los resultados que presenta la aplicación.

- *Control Proporcional*

En la figura 13-4, se observa la gráfica de la curva del control proporcional con un tiempo de respuesta de 0.02697 segundos, y a continuación en la figura 14-4 se muestran los resultados del mismo.



**Figura 13-4:** Curva de control proporcional para la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-53986.2516	-35
I	n/a	n/a
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.0149 seconds	4.25 seconds
Settling time	0.636 seconds	7.61 seconds
Overshoot	77.2 %	0 %
Peak	1.77	0.594
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	9.4 deg @ 74.2 rad/s	132 deg @ 0.219 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

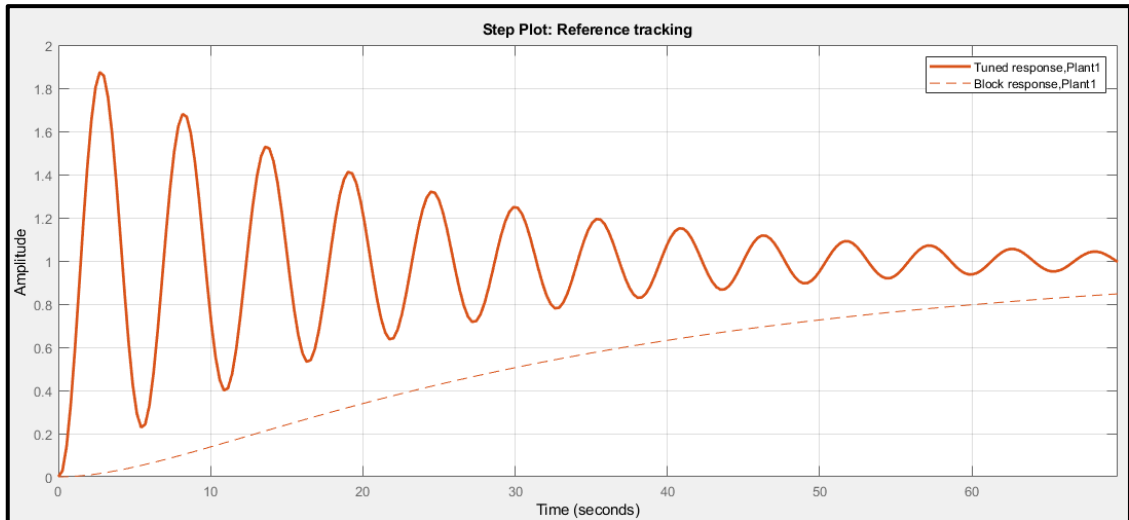
**Figura 14-4:** Resultados para el control proporcional de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Controlador Integral*

Para el controlador Integral de la temperatura, se muestra una curva de control como se observa en la figura 15-4 para un tiempo de respuesta de 1.74 y una robustez de 0.6, dando como resultado los valores detallados en la figura 16-4.





**Figura 15-4:** Curva de control integral para la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

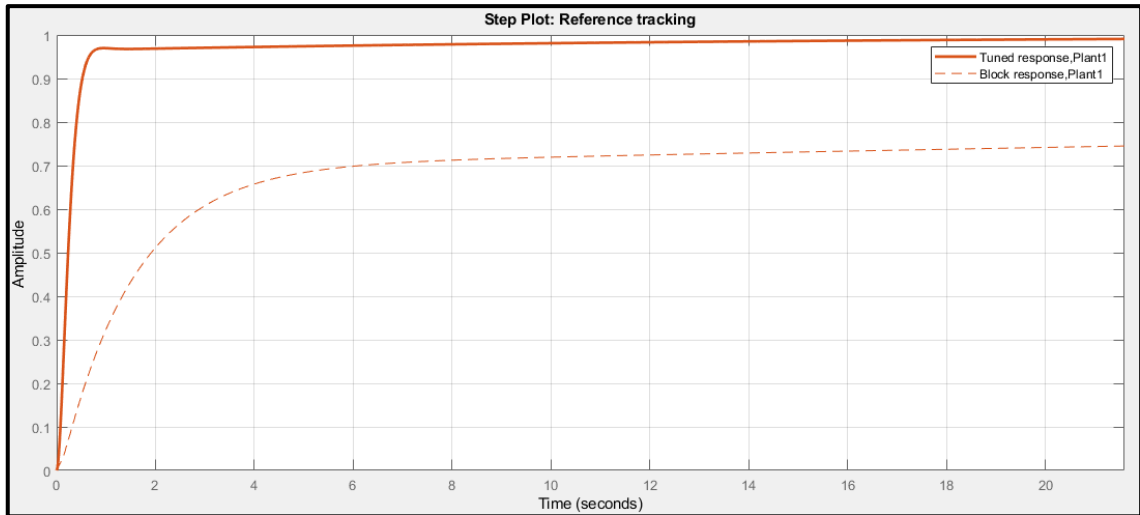
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	n/a	n/a
I	-104.4854	-0.4
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.939 seconds	75.8 seconds
Settling time	84.6 seconds	138 seconds
Overshoot	87.4 %	0 %
Peak	1.87	0.998
Gain margin	5.36 dB @ 1.57 rad/s	53.7 dB @ 1.57 rad/s
Phase margin	4.61 deg @ 1.15 rad/s	82.8 deg @ 0.0251 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 16-4:** Resultados para el control integral de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control Proporcional-Integral*

Para la curva de control Proporcional-Integral de la temperatura, como se muestra en la figura 17-4, se ha llevado a cabo en tiempo de respuesta de 0.54 y una robustez de 0.9, dando como resultado los valores que se reflejan en la figura 18-4.



**Figura 17-4:** Curva del control proporcional-integral de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

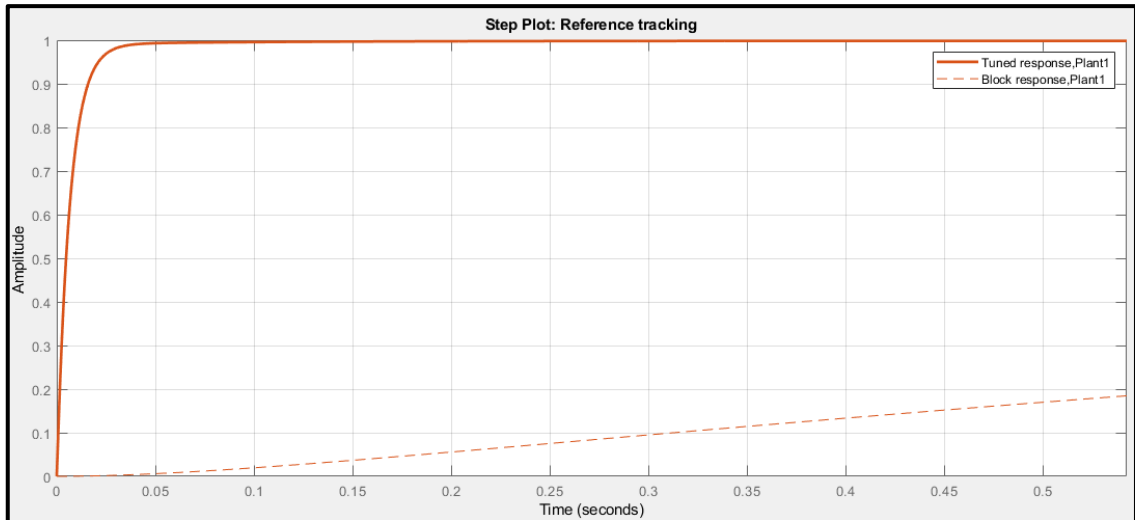
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-296.6375	-35
I	-19.2276	-0.4
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.443 seconds	138 seconds
Settling time	NaN seconds	340 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	0.98	0.997
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	75.1 deg @ 3.7 rad/s	113 deg @ 0.41 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 18-4:** Resultados para el control proporcional-integral de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control Proporcional-Derivativo*

En la figura 19-4 se muestra la curva del control Proporcional-Derivativo con un tiempo de respuesta de 0.0135 segundos y una robustez de 0.9 el cual da como resultado los valores detallados en la figura 20-4.



**Figura 19-4:** Curva del control proporcional-derivativo de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

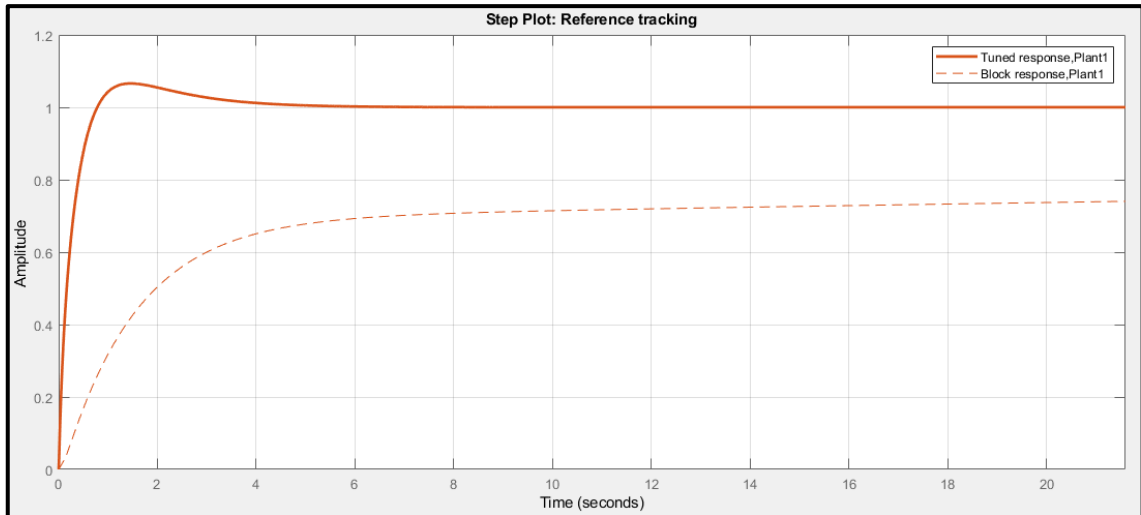
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-10378.2375	-35
I	n/a	n/a
D	-945.0997	-0.1
N	16849.8346	100
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.015 seconds	3.22 seconds
Settling time	0.0285 seconds	5.78 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	0.997	0.689
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	90 deg @ 147 rad/s	115 deg @ 0.404 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 20-4:** Resultados para el control proporcional-derivativo de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control Proporcional-Integral-Derivativo*

En la figura 21-4 se observa la curva del control Proporcional-Integral-Derivativo para la temperatura con un tiempo d respuesta de 0.54 y una robustez 0.9, mostrando en la figura 22-4 los resultados obtenidos con este tipo de controlador.



**Figura 21-4:** Curva del control proporcional-integral-derivativo de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-293.6319	-35
I	-184.0862	-0.4
D	-33.1356	-0.1
N	423.2463	100
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.515 seconds	141 seconds
Settling time	3.37 seconds	344 seconds
Overshoot	6.59 %	0 %
Peak	1.07	0.999
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	90 deg @ 3.7 rad/s	114 deg @ 0.398 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

**Figura 22-4:** Resultados del control proporcional-integral-derivativo de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

#### 4.4.2.3. Resultados de los controles seleccionados.

- *Control para el nivel.*

Analizando los resultados de cada tipo de controlador para el nivel se observa que al aplicar un control PD se tiene que el tiempo en aumento es hasta 4.9 segundos, tendiendo a estabilizarse en 8.72 segundos y un 0% de sobreposición siendo el que ajusta mejor a la cima con 0.999 en un tiempo de respuesta menor a los demás de 4.463, con un valor como se observa en la tabla 3-4. para las constantes de:

**Tabla 3-4:** Valor de las constantes para el control de nivel.

Condiciones	Valor
Proporcional (kp2)	-3545.1788
Derivativo (kd2)	0
Coefficiente filtro (N2)	100

Realizado por: Vaca B., 2021.

- *Control la temperatura*

De todos los tipos de controladores utilizados, según el PID Tuner, se puede observar que muestra un mejor resultado el controlador PD, el cual presenta un tiempo de aumento de 0.015 segundos, estabilizándose en 0.0285 segundos con una sobreposición de 0.0%, ajustando la cima en 0.997, este controlador tiene un tiempo de respuesta de 0.0135 y una robustez de 0.9, siendo el resultado de las constantes el detallado en la tabla 4-4.

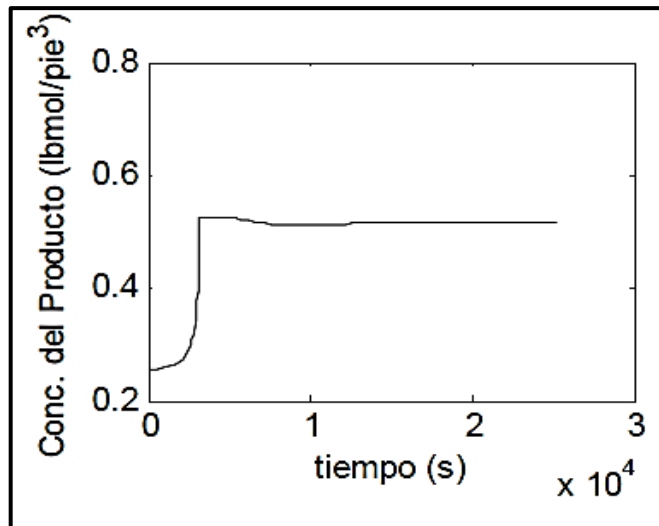
**Tabla 4-4:** Valor de las constantes para el control de temperatura.

Condiciones	Valor
Proporcional (kp1)	-10378.2375
Derivativo (kd1)	-945.0997
Coefficiente filtro (N1)	16849.8346

Realizado por: Vaca B., 2021.

#### 4.4.3. Validación de los resultados obtenidos para la concentración

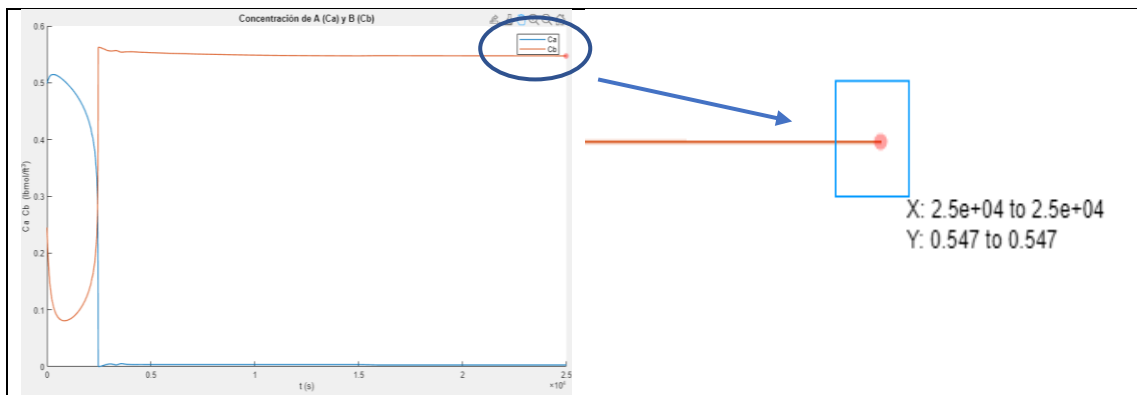
Los resultados obtenidos que muestra el artículo científico sometido a comparación, en base a los parámetros termodinámicos que se detallan en la tabla 5-3, y las condiciones de la reacción que corresponden a la tabla 6-3, con valores de entrada e iniciales mostrados en las tablas 7-3, 8-3 respectivamente; se tiene como resultado una concentración del producto (Cb), de 0.55 lbmol/pies<sup>3</sup>, esto se puede observar en la figura 23-4.



**Figura 23-4:** Resultado de la concentración del producto.

Realizado por: Peña et al., (2008)

Por otro lado, la aplicación diseñada con condiciones termodinámicas, de reacción, entrada y valores iniciales similares y ya mencionadas anteriormente, para un reactor de estructura mostrada en la tabla 1-3, mostró un comportamiento similar a la formación del producto en un tiempo de 25000 segundos, formándose 0.4970 lbmol/pies<sup>3</sup>, como se muestra en la figura 24-4.



**Figura 24-4:** Resultados de la concentración de la aplicación.

Realizado por: Vaca B., 2021.

Una vez ejecutada la aplicación y obtenido los resultados, se calcula el error porcentual para determinar el porcentaje de fallo de la aplicación respecto al artículo científico.

$$e = \frac{V. real - V. calculado}{V. real} * 100$$

Siendo:

V. real: Resultado que muestra el artículo científico.

V. calculado: Resultado obtenida por la aplicación diseñada.

**Tabla 5-4:** Resultados y error porcentual.

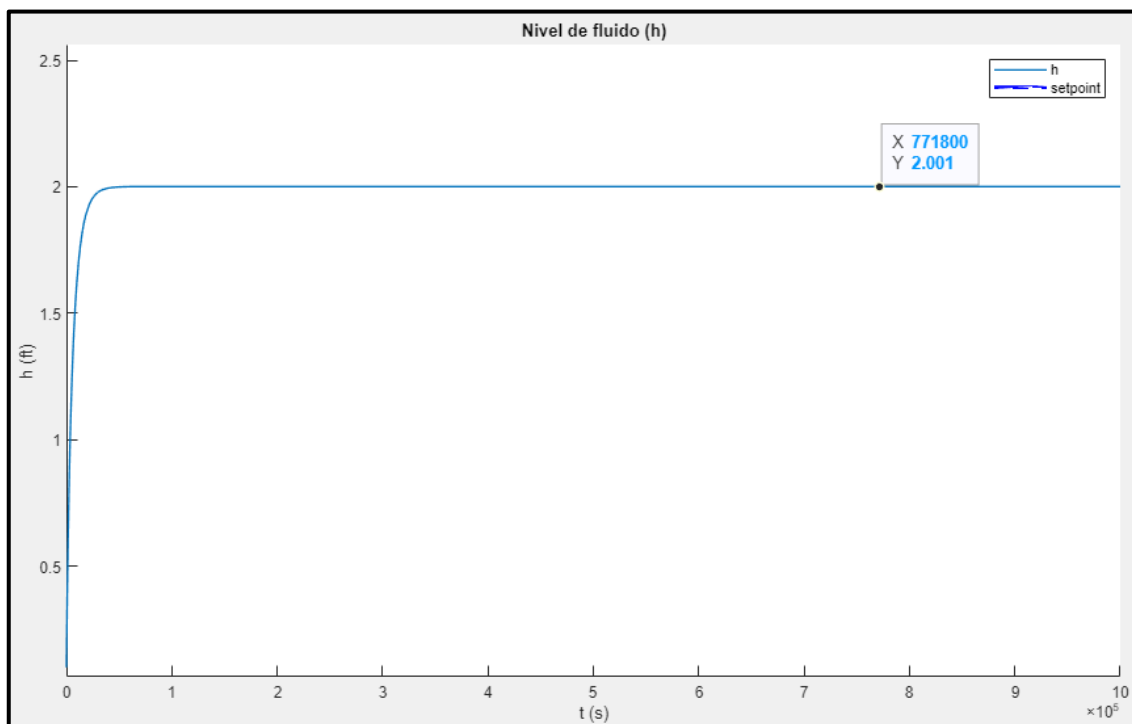
	Concentración del producto (CB)
Valor real	0.55
Valor calculado	0.547
Error porcentual	0.005
e (%)	0.5

Realizado por: Vaca B., 2021.

Se obtiene un error porcentual del 0.5%, como se observa en la tabla 5-4, siendo este menor del error total permitido (25%), dando por aceptada la validación del resultado obtenido por la interfaz basada en el modelado matemático en Simulink.

#### 4.4.4. Control del nivel

En la Figura 25-4 se observa que el nivel alcanza su estado estacionario en el segundo 76660 en 2 pies, aquí presenta un lazo de control abierto.



**Figura 25-4:** Nivel en su estado estacionario y lazo de control abierto.

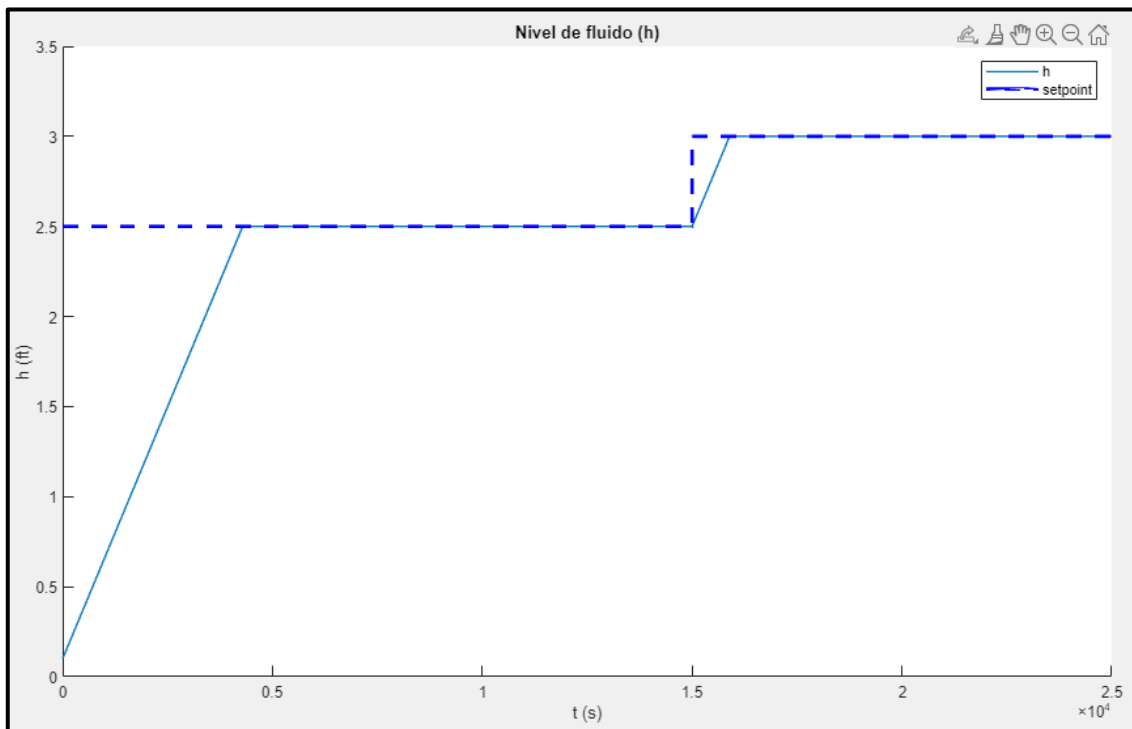
Realizado por: Vaca B., 2021.

En la figura 26-4 se observa la variación del nivel con el control de acuerdo a las condiciones del SetPoint especificadas en la tabla 6-4; también se observa el grado de apertura de la válvula en la figura 26-4.

**Tabla 6-4:** Condiciones del set point para el control del nivel.

Condiciones	Valor
Tiempo del Set Point de h (tsp_h)	15000 s.
Altura del Set Point inicial (hspi)	2.5 pies.
Altura del Set Point final (hspf)	3 pies.

Realizado por: Vaca B., 2021.

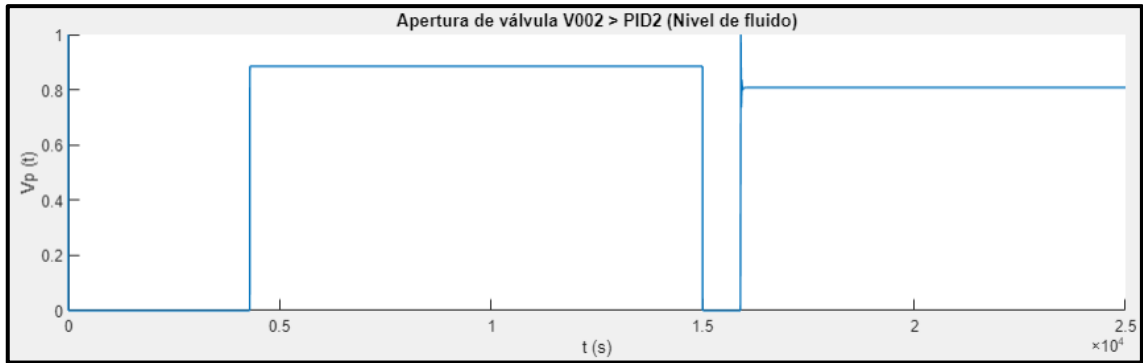


**Figura 26-4:** Resultado del control de nivel en el reactor CSTR.

Realizado por: Vaca B., 2021.

En la Figura 26-4, se observa el nivel dentro del reactor, este consta de dos puntos de control a la altura de 2.5 y 3 pies respectivamente; de esta forma se asegura un mejor control para el nivel; el grado de apertura de la válvula se muestra en la figura 27-4, la misma que se encuentra ubicada a la salida del producto, es por eso que la válvula se encuentra cerrada hasta el segundo 4300 que alcanza el primer Set Point, posteriormente en el segundo 15000 se muestra otro cierre de apertura de la válvula para que este alcance el nivel indicado en el segundo Set Point; a partir del segundo 15900 el grado de apertura se mantiene constante en un 0.8163 y controlando el nivel dentro del reactor.



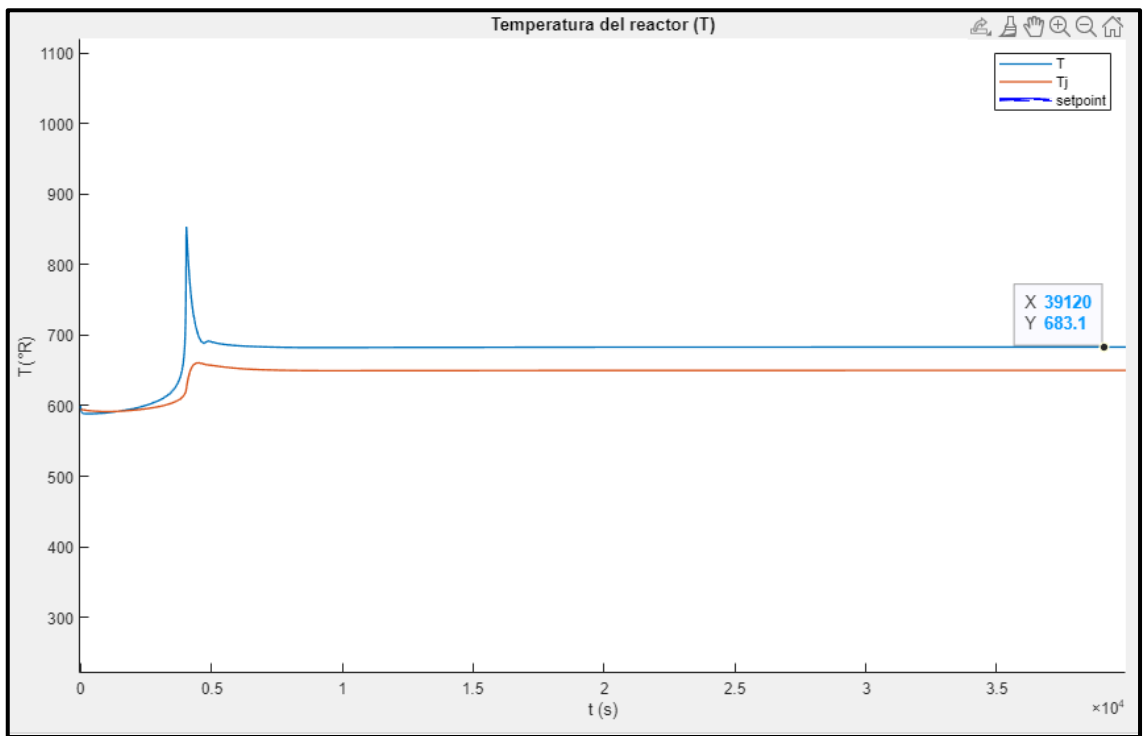


**Figura 27-4:** Apertura de la válvula para el control de nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

#### 4.4.5. Control de la Temperatura

El estado estacionario de la temperatura se encuentra a partir del segundo 19580, con una temperatura de 683.1 °R, aquí se muestra la temperatura en un lazo de control abierto.



**Figura 28-4:** Estado estacionario de la temperatura en un lazo de control abierto.

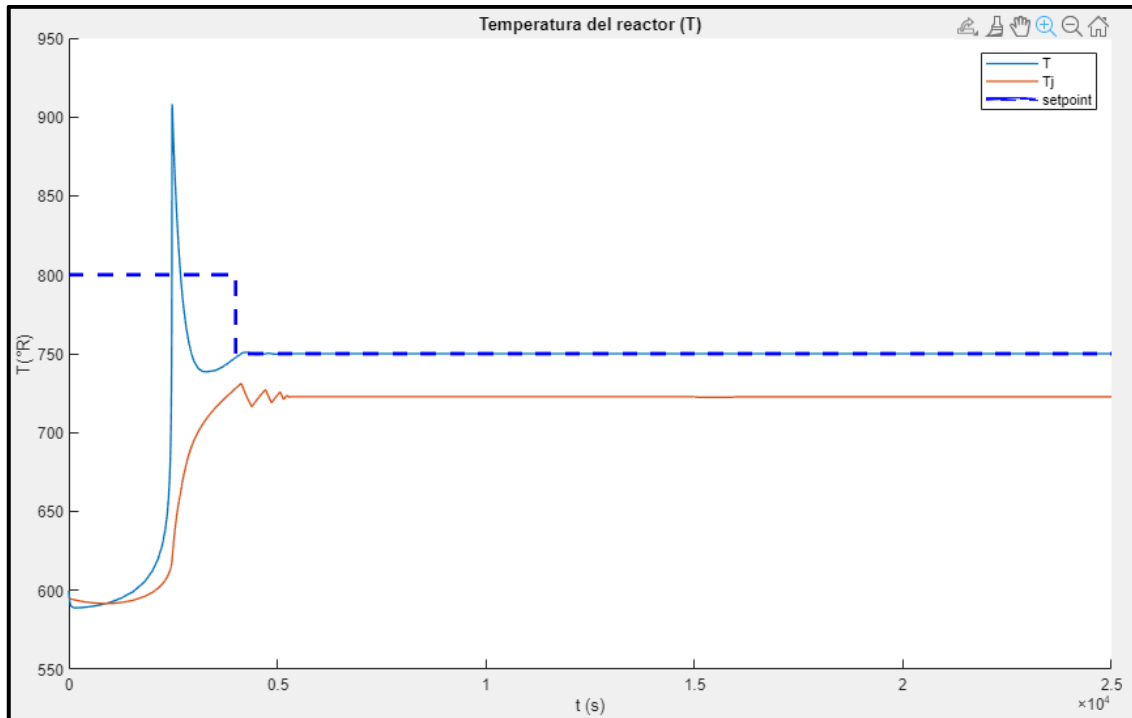
Realizado por: Vaca B., 2021.

La interfaz realizó el control para la temperatura como se muestra en la figura 29-4, según las condiciones del Set Point especificadas en la tabla 7-4; también se observa el grado de apertura de la válvula V001 correspondiente al flujo de la chaqueta en la figura 30-4.

**Tabla 7-4:** Condiciones del set point para el control de la temperatura.

Condiciones	Valor
Tiempo del Set Point de h (tsp_t)	4000 s.
Altura del Set Point inicial (Tspi)	800 °R
Altura del Set Point final (Tspf)	750 °R

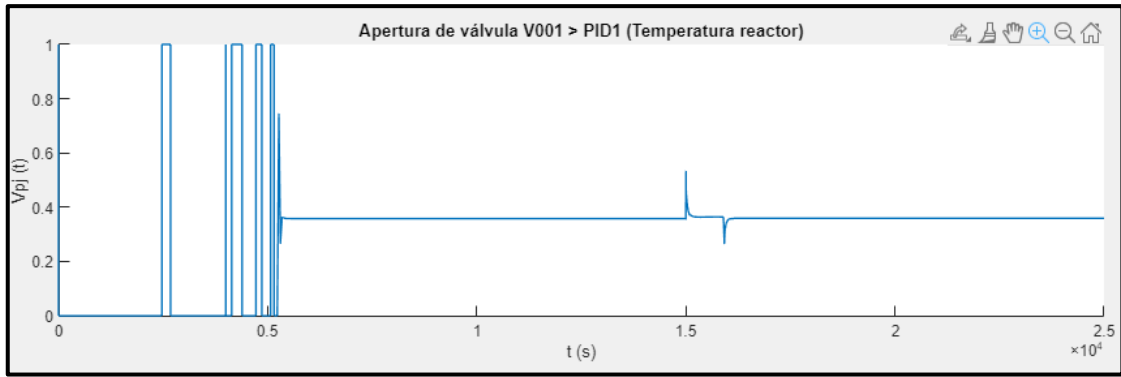
Realizado por: Vaca B., 2021.



**Figura 29-4:** Resultado del control de la temperatura en el reactor CSTR.

Realizado por: Vaca B., 2021.

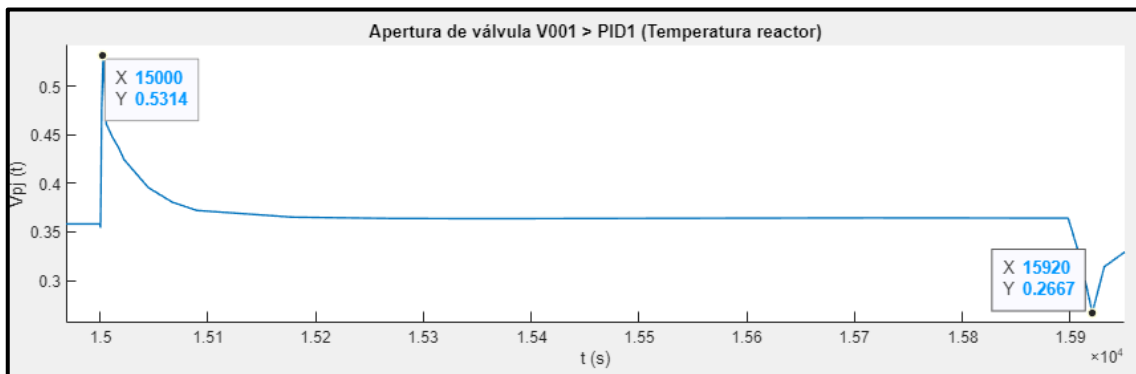
En la figura 29-4, se muestra la variación de la temperatura del reactor y de la chaqueta con su control respectivo, en el segundo 2483 se muestra el pico más alto de temperatura siendo este de 905.8 °R, este aumento brusco de temperatura se debe a que la reacción libera temperatura dentro del reactor al ser una reacción exotérmica, siendo esta temperatura un aporte a la formación del producto, después de esto la temperatura permanece constante debido a la condición de la temperatura final del control como se detalla en la tabla 7-4.



**Figura 30-4:** Resultado del control de la temperatura en el reactor CSTR.

Realizado por: Vaca B., 2021.

El flujo de enfriamiento que circula por la chaqueta es regula por la apertura de la válvula como se observa en la figura 30-4, esta permanece cerrada hasta el segundo 2472, debido a que la temperatura hasta este tiempo se encuentra por debajo del Set Point, posterior a esto se cierra ya que la temperatura del reactor desciende por debajo del punto de control, a partir del segundo 4000 entra la válvula en un ajuste de control, es decir, abriéndola y cerrándola en intervalos cortos de tiempo para llegar a la temperatura indicada por el Set Point con una apertura final de 0.36.



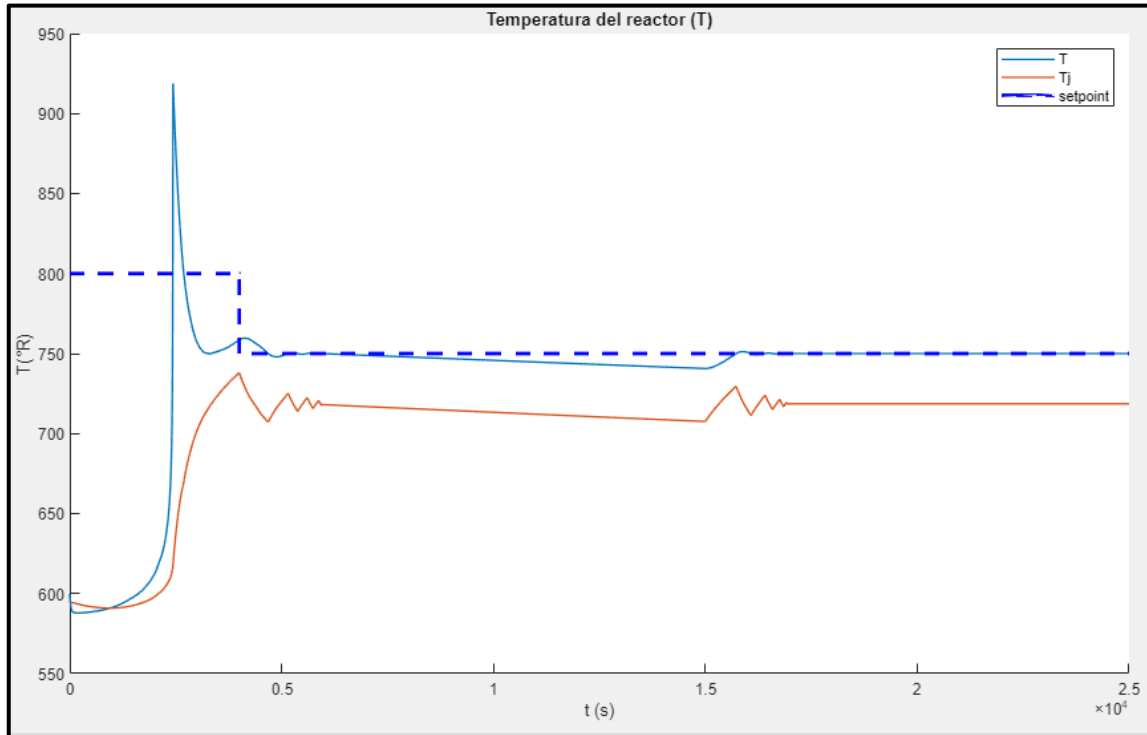
**Figura 31-4:** Picos de variación en la apertura de la válvula de la temperatura.

Realizado por: Vaca B., 2021.

Los incrementos y descensos en el grado de apertura de la válvula para la temperatura, tal y como se observa en la figura 31-4, se debe a que en el segundo 15000 existe un incremento de nivel en el reactor y aumenta el área de transferencia de calor, es aquí donde se requiere mayor cantidad de agua fría para que la temperatura del reactor no aumente, una vez el nivel llega a su estado estacionario la válvula se cierra hasta que la temperatura llegue a su equilibrio y retomar su grado de apertura constante.

#### 4.4.6. Incremento del flujo de entrada en un 15%

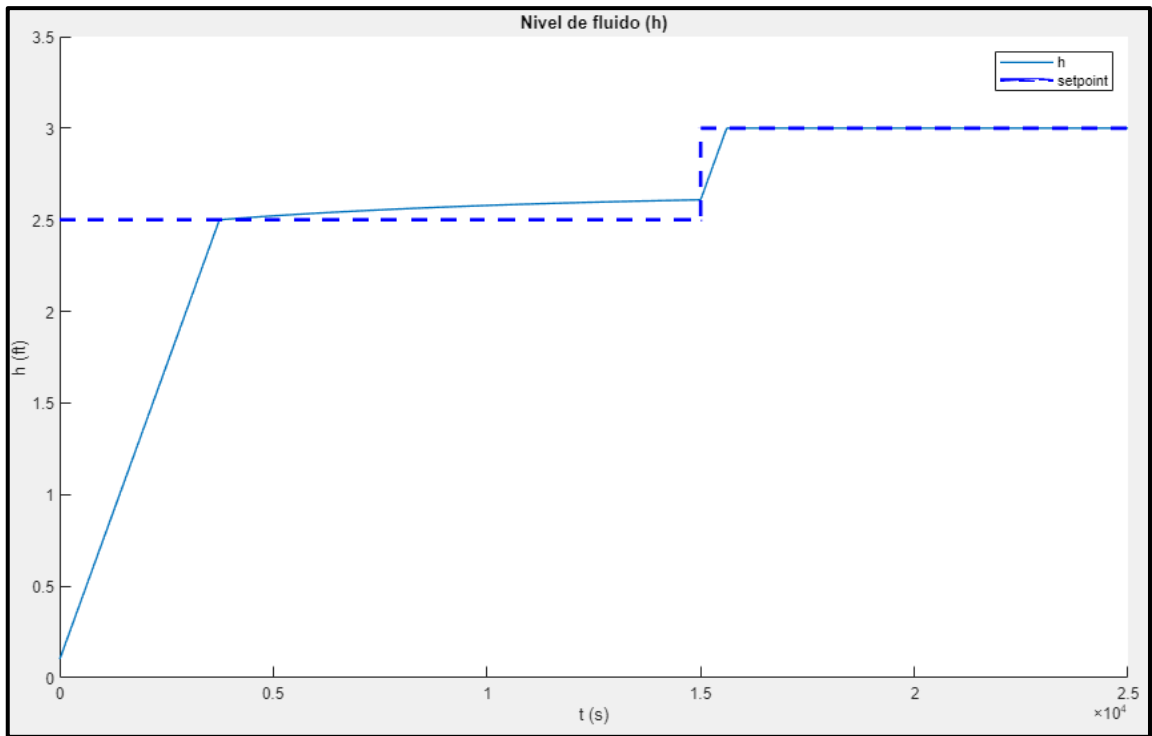
Se agregó una perturbación en el flujo de entrada en el segundo 10 a 5.658 gpm.



**Figura 32-4:** Temperatura del reactor y chaqueta al incrementar 15% el flujo de entrada.

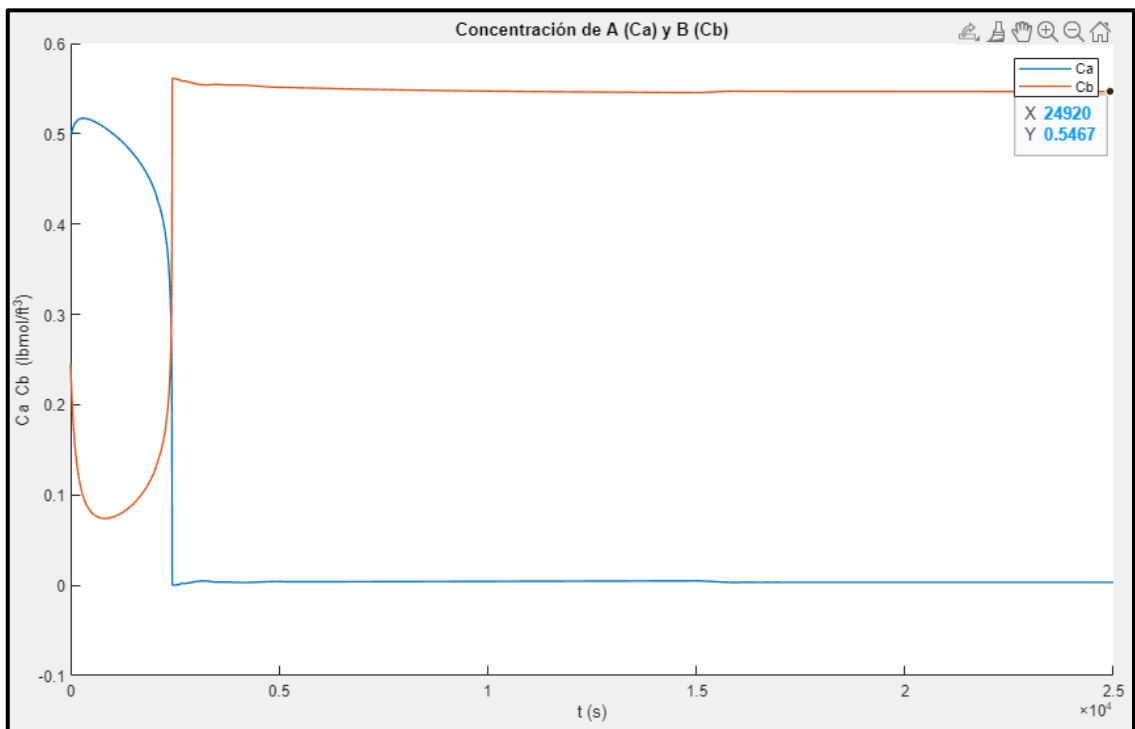
Realizado por: Vaca B., 2021.

El control logra mantener la temperatura en el Set Point pasado los 15000 segundos, ya que hasta antes de ese punto el primer control del nivel del reactor no logra mantener el Set Point y hay un leve incremento en la altura del reactor que es controlado por el segundo punto de control como se observa en la figura 33-4, es por esta razón que la temperatura antes de los 15000 segundos tiene un descenso.



**Figura 33-4:** Nivel del reactor al incrementar 15% el flujo de entrada.

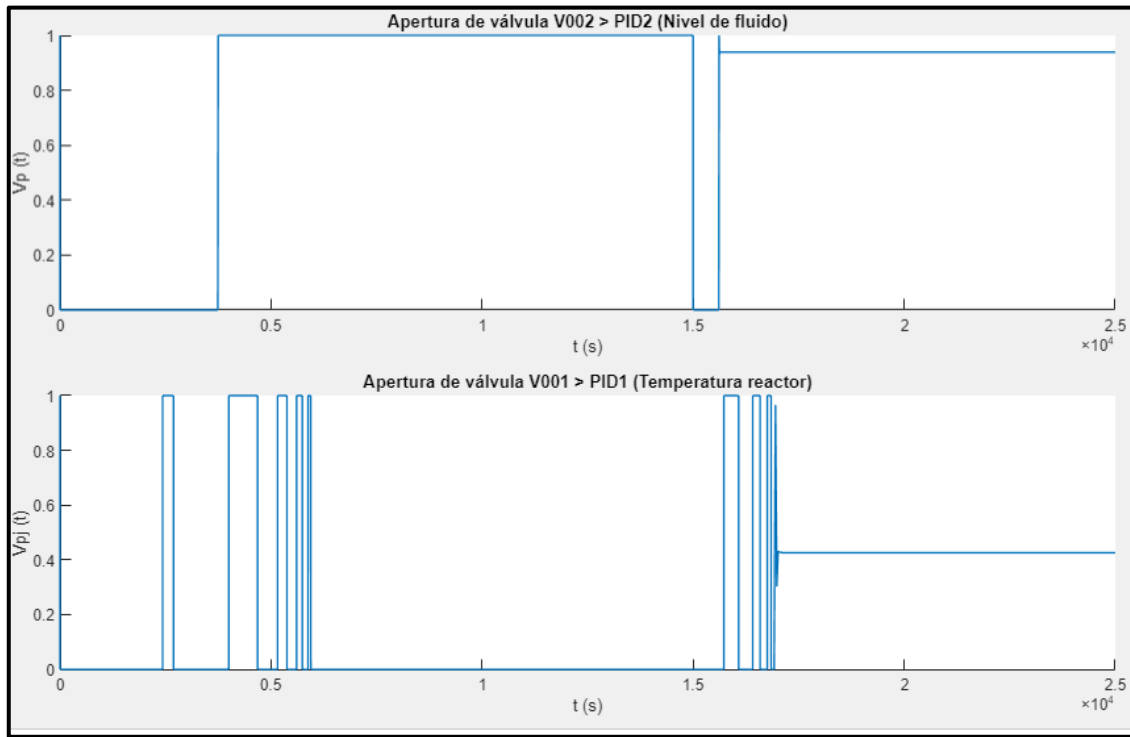
Realizado por: Vaca B., 2021.



**Figura 34-4:** Concentración del producto al incrementar 15% el flujo de entrada.

Realizado por: Vaca B., 2021.

La concentración es muy similar ante la presencia de la perturbación del flujo, ya que las concentraciones se mantienen iguales, este producto presenta una concentración del producto de 0.5467 lbmol/ft<sup>3</sup>.



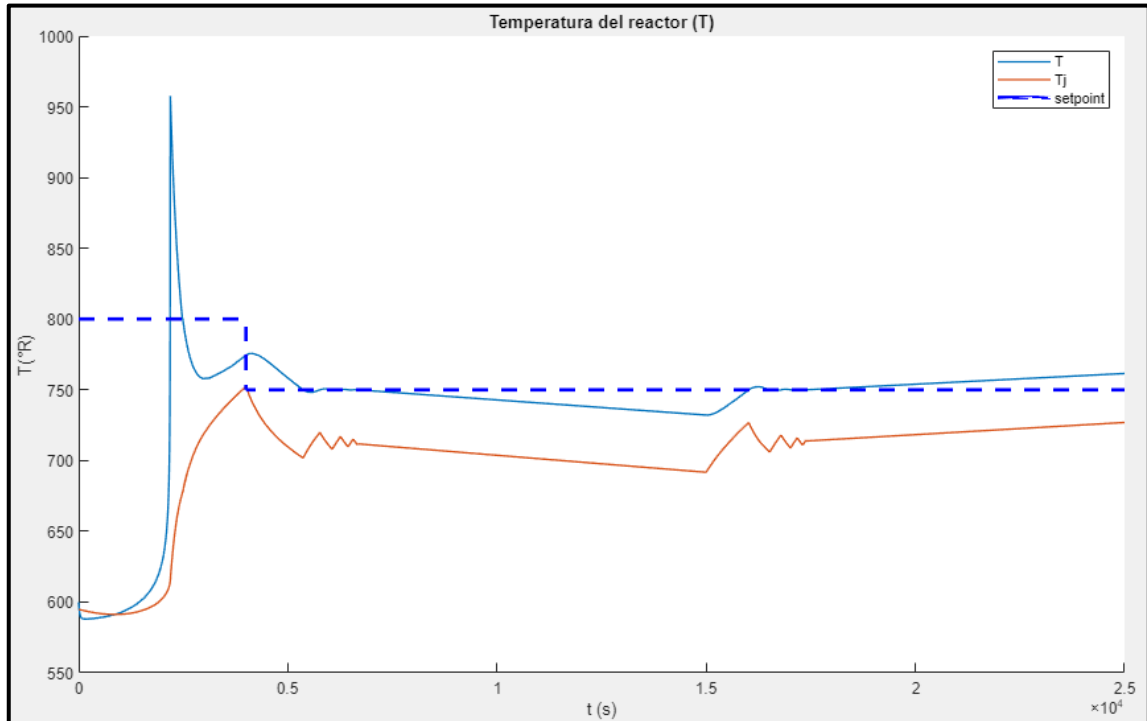
**Figura 35-4:** Grado de aperturas de las válvulas del nivel y temperatura al incrementar 15% el flujo de entrada.

**Realizado por:** Vaca B., 2021.

En la figura 35-4, en la apertura de la válvula V002 del nivel es mayor en comparación al que se observa en la figura 27-4, ya que aquí existe un incremento en el flujo a la entrada y por ende el flujo de salida deberá ser mayor por su grado de apertura; para la válvula V001 de la temperatura se muestra un juego de cierre y apertura ya que existe un pico de incremento de temperatura que sobrepasa el Set Point debido al calor de que genera la reacción, posterior a esto se cierra totalmente la válvula y es por ello que su temperatura disminuya hasta que el nivel aumente según su punto de control y corregir el grado de apertura de la válvula para mantener el Set Point.

#### 4.4.7. Incremento de la concentración en un 20%

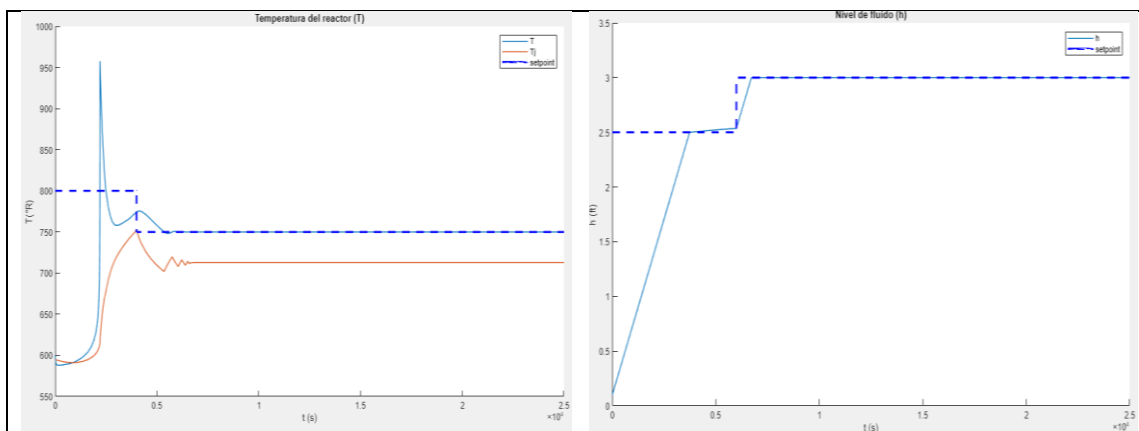
Se realiza un aumento en la concentración a 0.6 lbmol/ft<sup>3</sup> en el segundo 12.



**Figura 36-4:** Temperatura del reactor y chaqueta al incrementar la concentración en un 20%.

Realizado por: Vaca B., 2021.

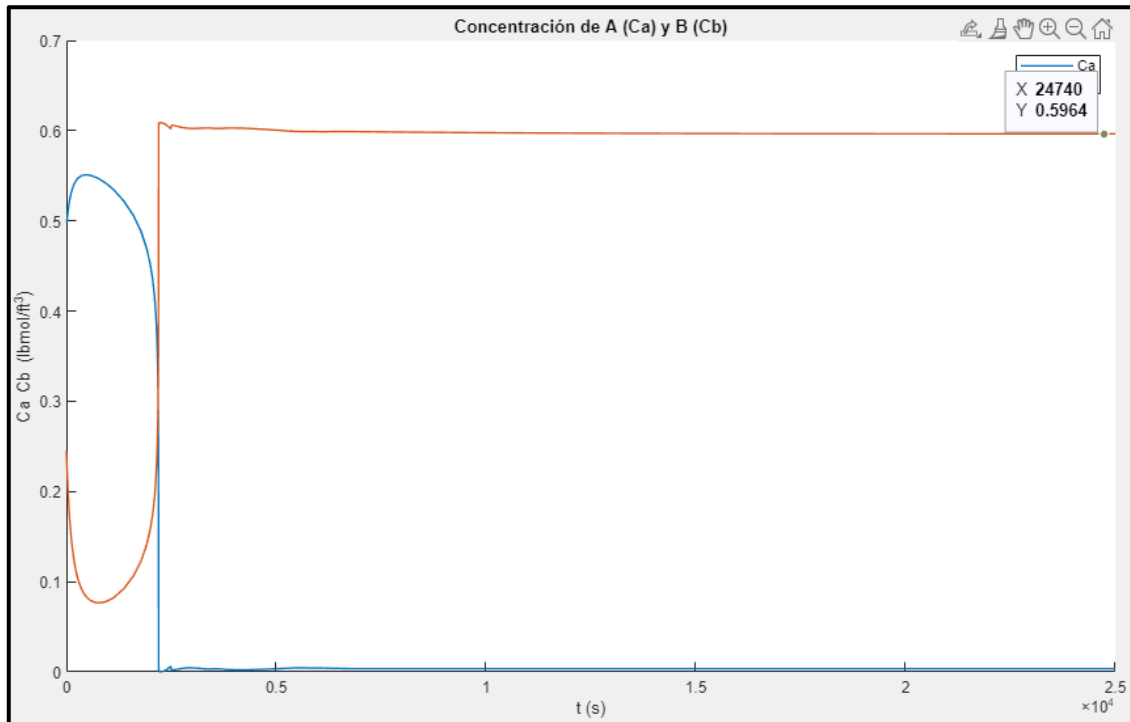
El control final no logra mantener la temperatura el Set Point deseado, ya que el nivel sufre un incremento desde el segundo 15000 como se observa en la figura 33-4, y por esta razón la temperatura también sube y no logra realizar el control correctamente.



**Figura 37-4:** Control de temperatura y cambio del SP del nivel.

Realizado por: Vaca B., 2021.

Reduciendo el tiempo de control final para el nivel a 6000 segundos, se logra controlar la temperatura, ya que el modelo cuenta con más tiempo para poder estabilizar y controlar la temperatura del reactor dentro del tiempo establecido para la simulación, otra opción sería aumentar el tiempo de la simulación.



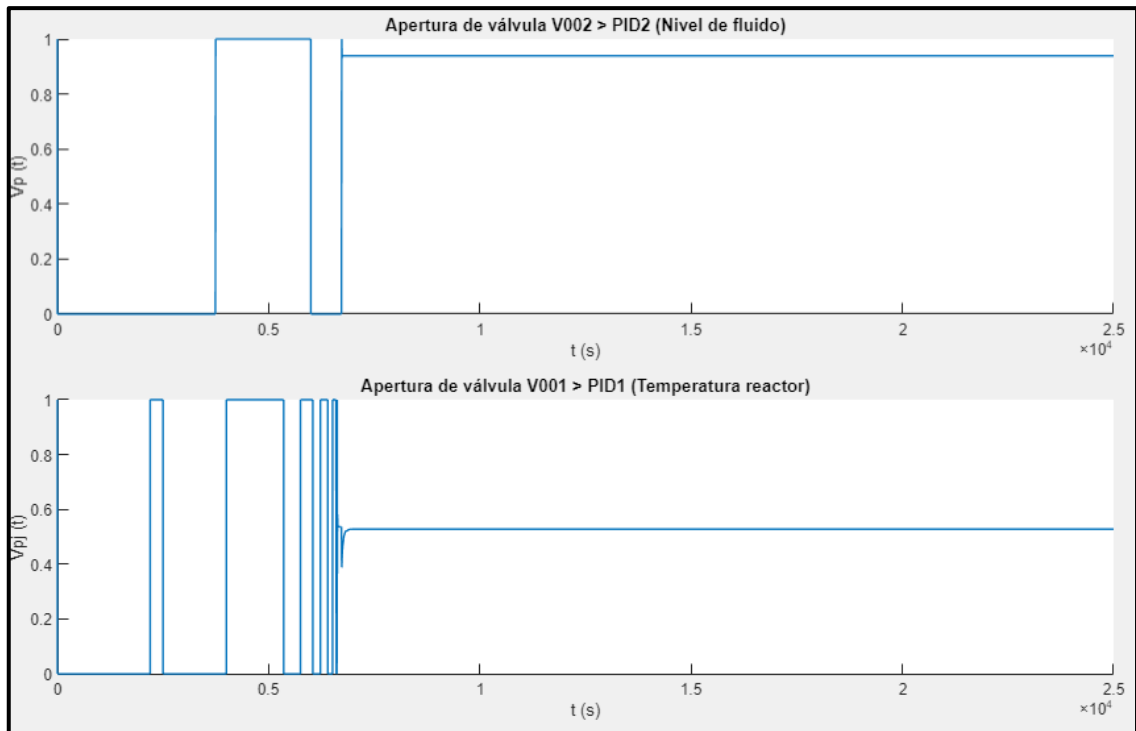
**Figura 38-4:** Concentración del producto al incrementar la misma en un 20%.

**Realizado por:** Vaca B., 2021.

En un tiempo de simulación de 25000 segundos al incrementar la concentración en el segundo 12 a 0.6 lbmol/ft<sup>3</sup>, la concentración del producto es de 0.5964 lbmol/ft<sup>3</sup>.

El grado de apertura de la válvula para el control del nivel es de 1 para el primer Set Point y de 0.939 para mantener el nivel a 3 pies, mientras que para la temperatura la válvula se abre en su totalidad para el primer Set Point y para el control final empieza a abrir y cerrar hasta equilibrar la temperatura, manteniendo la apertura final en 0.528 como se muestra en la figura 39-4.





**Figura 39-4:** Grado de apertura de las válvulas al incrementar la concentración en un 20%.

Realizado por: Vaca B., 2021.

## CONCLUSIONES

- Se modeló, simuló y controló un reactor de tanque agitado continuo (CSTR) en base a las ecuaciones diferenciales obtenidas mediante balances de masa y energía, consiguiendo de esta forma los gráficos como resultados de la simulación y un control de acuerdo a los establecidos por los parámetros de SP y constantes de control.
- Se identificó las variables que rigen y controlan el equipo, lo que permitió determinar las ecuaciones diferenciales que definen al mismo, así como los parámetros y constantes obtenidas a partir de revisión bibliográfica y cálculos mediante software como también las condiciones iniciales y constantes del mismo.
- Se realizó la modelación del equipo utilizando Simulink de MATLAB, mediante la utilización de diagramas de bloques, aquí se insertó todas las ecuaciones diferenciales que se obtuvieron de los balances de masa y energía, se declaró variables, parámetros y constantes que fueron útiles para que la simulación se ejecute.
- Se simuló el comportamiento del reactor logrando controlar el nivel y temperatura final a 3 pies y 750°R respectivamente, obteniendo una concentración de producto de 0.547 lbmol/pies<sup>3</sup> y un grado de apertura de las válvulas del control de nivel y temperatura de 0.816 y 0.361 respectivamente después del Set Point final, con el resultado de la concentración se validó la interfaz con el modelo para una reacción de primer orden del tipo  $A \rightarrow B$  para un reactor CSTR.
- Se desarrollo una interfaz didáctica que sea fácil de usar y de licencia abierta la cual le permita al usuario editar parámetros, variables, constantes, según el objeto de estudio para una reacción de primer orden.
- Se creó un manual de usuario sobre la interfaz didáctica creada, en el cual se explica detalladamente como instalar la aplicación y su funcionamiento, explicando lo necesario para su correcto manejo y uso por parte de docentes y de estudiantes, con el fin de que pueda llegar a varios usuarios.

## RECOMENDACIONES

- Realizar el modelado basado en un artículo científico en el cual se detallen los datos de parámetros y variables que correspondan a un mismo equipo con el fin de obtener una base comparativa con los resultados finales.
- Crear un modelo matemático que me permita simular un reactor CSTR para una reacción de segundo y tercer orden.
- Aplicar un lazo de control para las concentraciones las cuales delimitarán cuanto reactivo se consume y cuanto producto se desea formar según la configuración de los Set Points.
- Desarrollar un apartado en el cual se pueda modificar el grado de apertura de las válvulas a conveniencia y a partir de esto realizar cálculos con el fin de obtener los resultados para la temperatura y nivel.
- Diseñar una interfaz didáctica en la que se muestre animaciones gráficas sobre lo que ocurre en un reactor según el objeto que se ponga en estudio, con el fin de hacerlo más estético, interactivo e intuitivo.
- Implementar en la aplicación la opción de poder realizar la conversión de unidades del sistema inglés al sistema internacional o viceversa, tanto en la parte de edición como en los resultados.

## GLOSARIO

**Reactor Químico:** Unidad de proceso diseñada para llevar a cabo una o varias reacciones química o procesos en los que unos reactivos se convierten en unos productos (Benites, 2011, p.3).

**Exotérmico:** Una reacción química exotérmica es la que al producirse libera energía en forma de calor o luz principalmente. Esto significa que parte de la energía contenida en sus enlaces queda liberada en la formación del nuevo compuesto (Portal Académico del CCH, 2017).

**Velocidad de reacción:** la cantidad de sustancia que se transforma en una determinada reacción por unidad de volumen y tiempo (Izquierdo et al., 2008, p.21).

**Concentración química:** Es la cantidad en que se encuentran las sustancias que se disuelven (solute) en relación a la o las sustancias que lo disuelven (solvente). En este sentido, la cantidad de soluto siempre será menor al solvente para que se considere una solución (Significados.com, 2017).

**Reactivo químico:** Es una sustancia que permite revelar la presencia de una sustancia diferente y que, a través de una interacción, da lugar a un nuevo producto (Pérez y Merino, 2015).

**Producto químico:** Son compuestos químicos producidos por procesos químicos en el laboratorio o de manera industrial y pueden ser sustancias puras o mezclas de sustancias (Pérez y Gardey, 2015).

**Ecuación diferencial:** Una ecuación diferencial es una ecuación que relaciona de manera no trivial a una función desconocida y una o más derivadas de esta función desconocida con respecto a una o más variables independientes (Fay, 2012, p.14).

**Parámetro:** Elemento o dato importante desde el que se examina un tema, cuestión o asunto (Pérez y Gardey, 2009).

**Variable:** variable es una palabra que representa a aquello que varía o que está sujeto a algún tipo de cambio. Se trata de algo que se caracteriza por ser inestable, inconstante y mudable (Raffino, 2020).

**Constante:** una magnitud que no cambia con el paso del tiempo. Valor de tipo permanente (Fay, 2012, p.87).

**Estado estacionario:** es cuando las variables que definen su comportamiento, respecto del tiempo, permanecen invariantes, es decir que estas no cambian (Rodríguez, 2010, p.4).

**Set Point:** Es un valor prefijado, es el valor deseado de la variable de proceso (Lourenço, 1942, p.14).

## BIBLIOGRAFÍA

**ALICI, S. y EDGAR, T.F.** Nonlinear dynamic data reconciliation via process simulation software and model identification tools. (2002). *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 41, no. 16, pp. 3984-3992. ISSN 08885885. DOI 10.1021/ie010781s.

**ARACIL, J. y GÓMEZ, F.** Introducción a Matlab y Simulink. (2007). *Matlab y Simulink*, pp. 1-24.

**BENITES, N.R.** *Control de temperatura de un reactor químico utilizando estrategias de control óptimo y adaptativo*. (2011). S.l.: s.n.

**COLLADO, S.H.** Modelado y simulación de la evolución de valores en sociedades humanas con agentes software. [en línea], (2007). Disponible en: <http://eprints.ucm.es/10080/>.

**FAY, D.** *Ecuaciones Diferenciales*. (2012). S.l.: s.n. ISBN 9786077331155.

**IZQUIERDO, J.F., CUNILL, F., TEJERO, J., IBORRA, M. y FITÉ, C.** Cinética de las reacciones. (2008). *Fisicoquímica*, pp. 602-603.

**KUMAR, V., SINGH, J., KUMAR, Pankaj y KUMAR, Piyush,** Environmental Technology & Innovation Response surface methodology based electro-kinetic modeling of biological and chemical oxygen demand removal from sugar mill effluent by water hyacinth ( *Eichhornia crassipes* ) in a Continuous Stirred Tank Reactor ( *C. Environmental Technology & Innovation* [en línea], (2019). vol. 14, pp. 100327. ISSN 2352-1864. DOI 10.1016/j.eti.2019.100327. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100327>.

**LORANDI, A., HERMIDA, G., LADRÓN, E. y HERNÁNDEZ, J.** Controladores PID y controladores difusos. *Revista de la Ingeniería Industrial* [en línea], (2011). vol. 5, no. 1, pp. 13. ISSN 19402163. Disponible en: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38507387/Revista\\_Controladores\\_PID\\_y\\_difusos.pdf?1439922212=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DControladores\\_PID\\_y\\_Controladores\\_Difuso.pdf&Expires=1596667105&Signature=W2LfEGcjhzdVbNjxE93uLbx0-2VOX4V](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38507387/Revista_Controladores_PID_y_difusos.pdf?1439922212=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DControladores_PID_y_Controladores_Difuso.pdf&Expires=1596667105&Signature=W2LfEGcjhzdVbNjxE93uLbx0-2VOX4V).

**LOURENÇO, J.** SINTONIA DE CONTROLADORES P.I.D. (1942). , pp. 1-13.

**MALDONADO GRANADOS, L.F.** *El modelamiento matemático en la formación del ingeniero.* (2013). S.l.: Universidad Central, Universitaria de Investigación y Desarrollo, Universidad Pedagógica Nacional, Universidad Hebrea de Jerusalén. ISBN 9789582601966.

**MANUEL F. PÉREZ POLO.** COMO OBTENER Y SIMULAR OSCILACIONES MANTENIDAS EN REACTORES CONTINUOS TIPO TANQUE AGITADOS. (2004). *Departamento de Física Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante.*, pp. 1-11.

**MATHWORKS.** Desarrollar apps mediante App Designer. [en línea]. (2021). [Consulta: 5 marzo 2021]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/app-designer.html>.

**MEJIA, J.** Historia de la Industria 4.0- Logicbus S.A de C.V. [en línea]. (2018). [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <https://www.logicbus.com.mx/historia-industria-4.0.php>.

**PALENCIA, A., FABREGAS, J. y CARPINTERO, J.** Modelado , simulación y control de un reactor en la producción de cloruro de aluminio Modeling , simulation and control of a reactor for the production of aluminum chloride. (2012). *Prospectiva*, vol. 10, no. 2, pp. 31-36.

**PEÑA, E.T., PÉREZ, A.R., MIRANDA, A.J. y SÁNCHEZ, J.H.** Modelado de un reactor químico tipo CSTR y evaluación del control predictivo aplicando Matlab-Simulink Modeling to a CSTR reactor and evaluation of a predictive control using Matlab-Simulink. (2008). *Ingeniería Uc*, vol. 15, pp. 97-112.

**PÉREZ., M.A., HIDALGO., A.P. y BERENGUER., E.P.** Introduccion a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. (2007). , pp. 1-69.

**PÉREZ, J. y GARDEY, A.** Definición de parámetro. [en línea]. (2009). [Consulta: 16 mayo 2021]. Disponible en: <https://definicion.de/parametro/>.

**PÉREZ, J. y GARDEY, A.** Definición de productos químicos. [en línea]. (2015). [Consulta: 16 mayo 2021]. Disponible en: <https://definicion.de/productos-quimicos/>.

**PÉREZ, J. y MERINO, M.** Definición de reactivo. [en línea]. (2015). [Consulta: 16 mayo 2021]. Disponible en: <https://definicion.de/reactivo/>.

**PORTAL ACADÉMICO DEL CCH.** Reacción exotérmica y endotérmica. [en línea]. (2017).

[Consulta: 16 julio 2021]. Disponible en:  
<https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad1/reaccionesQuimicas/reaccionexotermicaendotermica>.

**RAFFINO, M.** Variable. [en línea]. (2020). [Consulta: 11 junio 2021]. Disponible en:  
<https://concepto.de/variable/>.

**RODRÍGUEZ, R.** Cinética rápida. [en línea], (2010). pp. 1-33. Disponible en:  
[http://depa.fquim.unam.mx/proteinas/mdcb/press/tpc2014\\_2.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/proteinas/mdcb/press/tpc2014_2.pdf).

**SARGENT, R.G.** Verification and validation of simulation models. (2013). *Journal of Simulation* [en línea], vol. 7, no. 1, pp. 12-24. ISSN 17477786. DOI 10.1057/jos.2012.20. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1057/jos.2012.20>.

**SIGNIFICADOS.COM.** Concentración química. [en línea]. (2017). [Consulta: 18 mayo 2021]. Disponible en: <https://www.significados.com/concentracion-quimica/>.

**SILVA, F.** Marco Legal del Software Libre en Ecuador – ASLE. [en línea]. (2015). [Consulta: 12 abril 2021]. Disponible en: <https://www.asle.ec/marco-legal-del-softwarelibre-en-ecuador/>.

**TORRES, V.** Estado e Industrialización en Ecuador: Modernización, fricciones y conflictos en los años cincuenta. (2012). pp. 13.

**UNODC.** Directrices para la validación de métodos analíticos y la calibración del equipo utilizado para el análisis de drogas ilícitas en materiales incautados y especímenes biológicos. [en línea], (2010). Disponible en:  
[https://www.unodc.org/documents/scientific/Validation\\_Manual\\_STNAR41\\_Ebook\\_S.pdf?fbclid=IwAR3IIYZJRWgHNgrmgWBzd63n1XQAio96gn2fXvqwb3K8t3h8ppBs3c3BNtU](https://www.unodc.org/documents/scientific/Validation_Manual_STNAR41_Ebook_S.pdf?fbclid=IwAR3IIYZJRWgHNgrmgWBzd63n1XQAio96gn2fXvqwb3K8t3h8ppBs3c3BNtU).

**URQUÍA, A. y MARTÍN, C.** *Modelado y simulación de eventos discretos - Urquía Moraleda Alfonso, Martín Villalba Carla - google libros* [en línea]. (2013). S.l.: s.n. [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en:  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BZBGAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=modelado+y+simulaci3n+en+software&ots=WP62jcPEJz&sig=i4\\_MMGetAGc6jmXiMKpsFngFDts#v=onepage&q=modelado+y+simulaci3n+en+software&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BZBGAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=modelado+y+simulaci3n+en+software&ots=WP62jcPEJz&sig=i4_MMGetAGc6jmXiMKpsFngFDts#v=onepage&q=modelado+y+simulaci3n+en+software&f=false).

**VELÁSQUEZ, S. y VELÁSQUEZ, R.** Modelado con variables aleatorias en simulink utilizando

simulación montercarlo. (2012). *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 16, no. 64, pp. 203-211.  
ISSN 1316-4821.

**VERA, L.A. y BENÍTEZ, A.** ISSN: 2395-8944 Escuela Superior de Ingeniería Pesquera  
Alternativas para la elaboración de modelos matemáticos José Trinidad Ulloa Ibarra , Jaime.  
(2015). no. 1.



## ANEXOS

### ANEXO A: Manual de usuario



# MANUAL DE USUARIO V1.0

ESPOCH – ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



Email: [brayan-rod1@hotmail.com](mailto:brayan-rod1@hotmail.com)  
Autor: Brayan Rodrigo Vaca Martínez  
Director de tesis: Ing. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos  
Miembro de tesis: Ing. Darío Fernando Guamán Lozada



## INTRODUCCIÓN

### ¿Qué es CSTR SIM?



CSTR SIM es una aplicación que permite simular un sistema de control multivariables sobre un reactor tipo CSTR de forma continua. El modelo del reactor simula una reacción sencilla de tipo  $A \rightarrow B$  exotérmica.

### ¿Funciones principales de CSTR SIM?

Las funciones que puede cumplir las siguientes funciones:

- Simular una reacción química exotérmica en estado transitorio de primer orden, de la forma  $A \rightarrow B$ .
- Configurar los elementos de control, con el objetivo de mejorar la respuesta en presencia de perturbaciones. Los elementos de control tomados en cuenta: Controladores PID de nivel y temperatura, válvulas proporcionales, setpoints para temperatura y altura y las perturbaciones.
- Configurar parámetros estructurales que definen: volumen de reactor, volumen de chaqueta, áreas de transferencia de calor, etc.

### Convenciones del documento

ICONO	DESCRIPCIÓN
	<b>NOTAS:</b> Las notas enfatizan en información que puede ser de interés y utilidad para el usuario.
	<b>PRECAUCION:</b> Describe una situación o practica con las que el usuario debe tener cuidado, para evitar consecuencias no deseadas.

## PROCEDIMIENTO

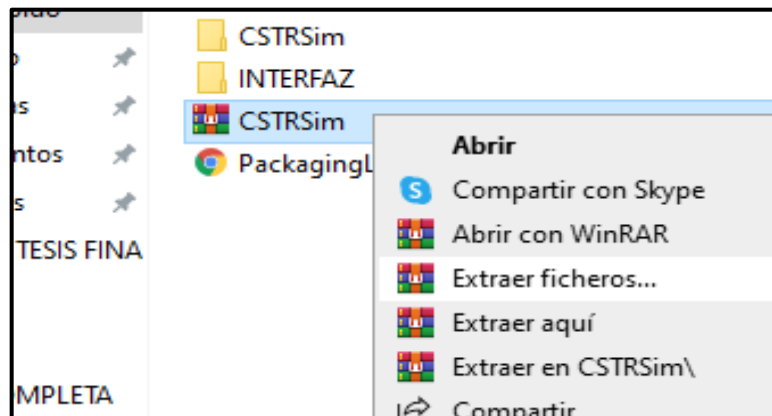
### Instalación

Para la instalación de la aplicación se puede aplicar dos opciones:

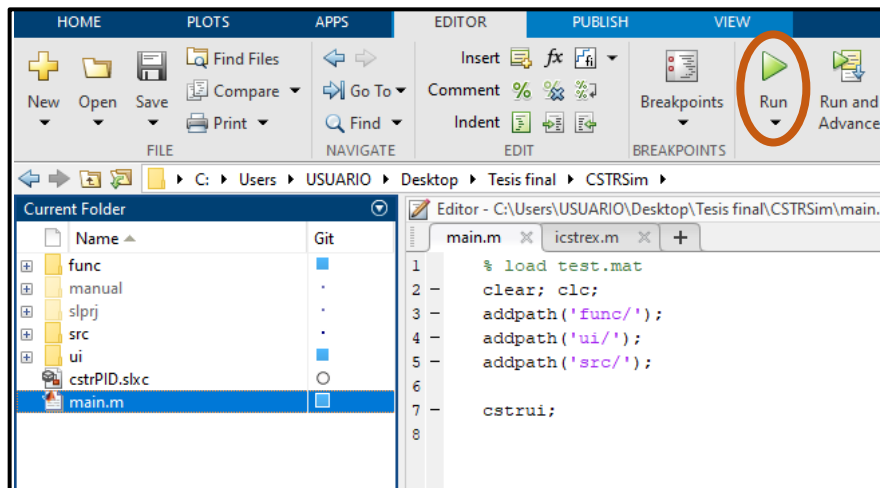
*Usar el código fuente:*

Para ello y deben seguir los siguientes pasos:

1. Descargar y descomprimir el archivo “CSTRSim.rar” en un directorio, preferiblemente el disco C.



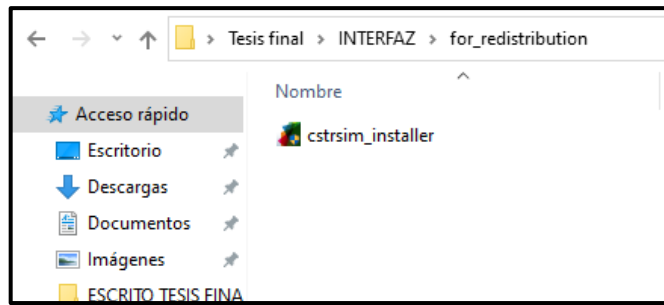
2. Abrir MATLAB 2020 o superior, y navegar con el explorador hasta la carpeta donde se descomprimió el archivo “.rar”.
3. Abrir el archivo “main.m” con MATLAB y ejecutarlo.



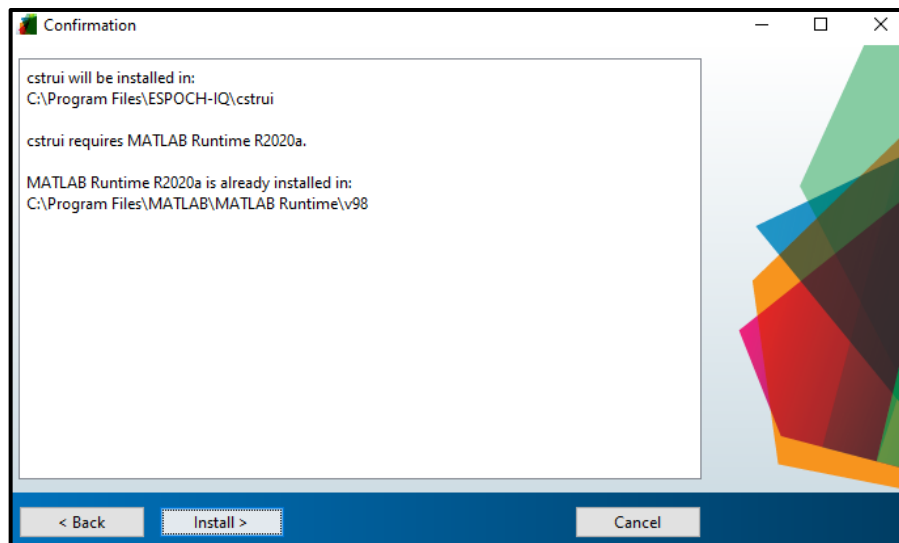
*Instalar como App:*

Para instalar la aplicación como una App de MATLAB, debes seguir los siguientes pasos:

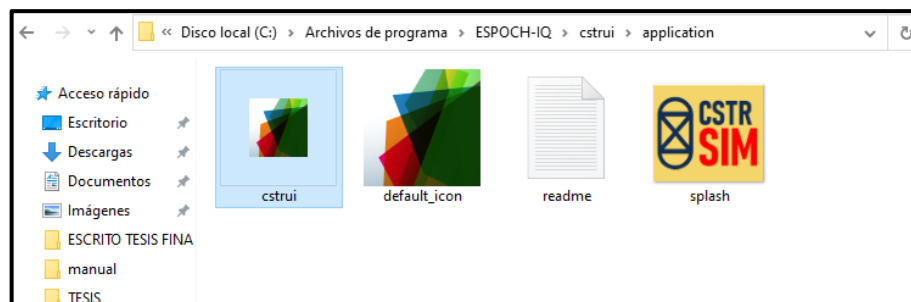
1. Descargar y descomprimir el archivo INTERFAZ.
2. Ubicar el archivo cstrsim\_installer, que se encuentra dentro de la carpeta for\_redistribution y ejecutarlo.



3. Seguir los pasos de instalación haciendo clic en el botón next.
4. Para comenzar la instalación de la aplicación seleccionar Install en la ventana de confirmación.



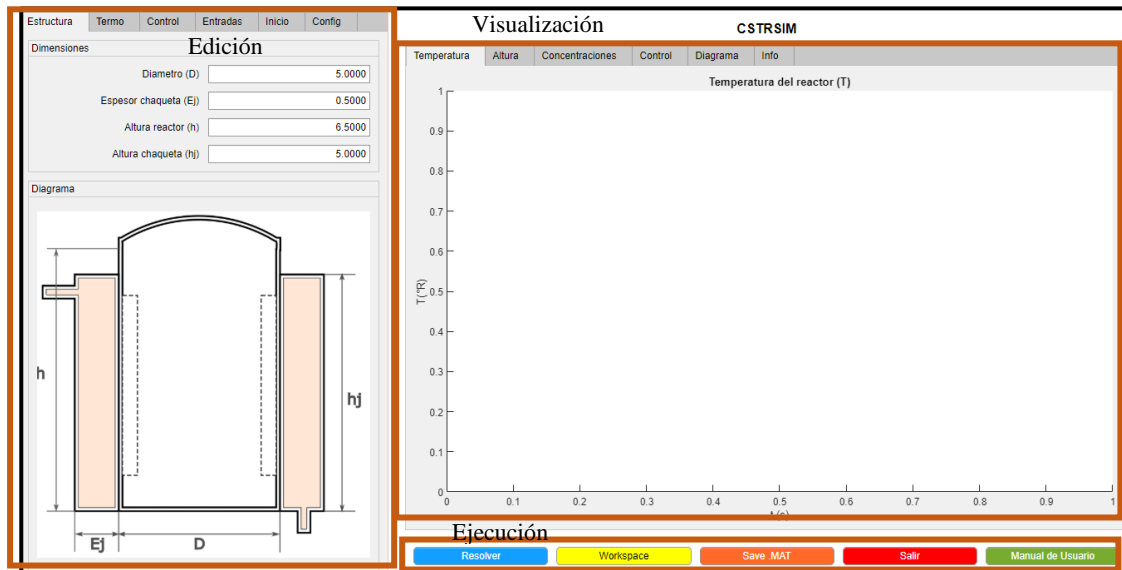
5. Para finalizar la instalación dar clic en el botón Finish.
6. Para abrir la aplicación, ubicar la carpeta ESPOCH-IQ, dentro de archivos de programa del disco local C.
7. Abrir la carpeta cstrui, posteriormente la carpeta application y ejecutar el archivo cstrui para iniciar la aplicación.



### Configuración

La aplicación en su pantalla inicial del programa muestra las tres secciones de controles. La primera sección corresponde a los controles de edición, en ella se puede cambiar los parámetros

para: estructura del reactor CSTR, propiedades termodinámicas, control de procesos, condiciones iniciales y la simulación.



La sección de controles de visualización muestra: los resultados de la simulación para temperaturas de reactor y chaqueta, el volumen del reactor; la altura de fluido dentro del reactor; la variación de la concentración del reactivo A y producto B; la apertura de las válvulas del sistema de control; el diagrama del reactor CSTR y la información del programa.

Como ultimo esta la sección de ejecución que tiene los botones para: resolver para ejecutar la simulación, enviar los resultados al workspace, guardar los valores con Save Mat, el botón salir y manual de usuario que despliega un documento en el cual se detalla como operar la aplicación.



**PRECAUCION:** El botón de resolución de la simulación se debe clicar una sola vez y esperar obtener resultados. Con cada variación de parámetros se debe ejecutar la simulación de nuevo.

### **Edición**

- *Parámetros Estructurales*

El reactor se supone que es cilíndrico con una chaqueta igualmente cilíndrica que lo recubre, de esto se plantea los siguientes parámetros.

En esta ventana todos los parámetros se pueden editar según la geometría del reactor de estudio, estos son:

D: Diámetro del cilindro interno del reactor (ft).

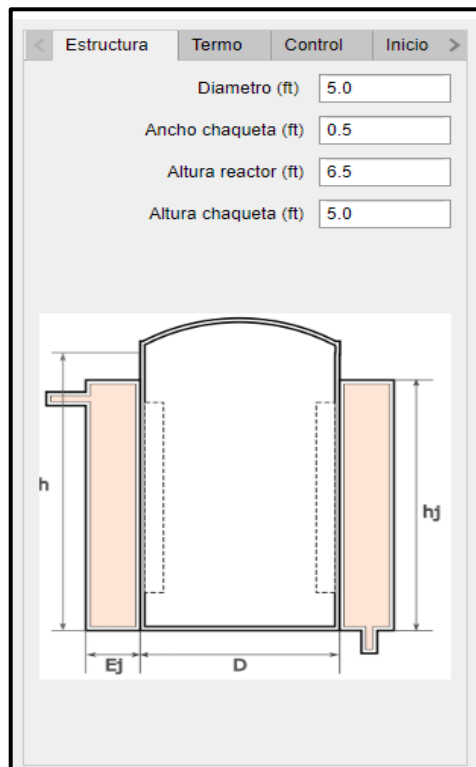
Ej: es el espesor de la chaqueta (ft).

h: Altura del cilindro interno del reactor (ft).

hj: Altura de la chaqueta que recubre al reactor (ft).

Estos parámetros permiten calcular constantes que forman parte de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del reactor CSTR. Estas constantes son:

- Área de la sección transversal del reactor:
- Área de transferencia de calor del reactor:
- Volumen de la chaqueta:



- *Parámetros termodinámicos*

Los parámetros físicos, químicos y térmicos que se requieren para el modelo se han dividido en tres secciones: referentes a la reacción, al proceso de transferencia de calor y las constantes físicas.

Estructura	Termo	Control	Entradas	Ir
<b>Transferencia</b>				
Coefficiente GTC ( $\mu$ )			150.00	
Densidad MRP ( $\rho$ )			50.00	
Densidad LE ( $\rho_j$ )			62.30	
Calor esp. MRP ( $C_p$ )			0.7500	
Calor esp. LE ( $C_{pj}$ )			1.0000	
Gravedad esp. MRP ( $G_w$ )			0.8000	
Gravedad esp. LE ( $G_j$ )			0.9900	
<b>Reacción</b>				
Energía Activación (E)			3e+04	
Calor Rx ( $\lambda$ )			-3e+04	
Factro pre exp. ( $k_0$ )			1.966e+07	
<b>Constantes físicas</b>				
Factor conv. ( $gc$ )			32.2	
Gravedad (g)			32.2	
Const. Gas Ideal (R)			1.985875	

#### *Reacción:*

Permiten calcular la constante cinética de la reacción  $A \rightarrow B$ , estos parámetros pueden ser modificados según las características de la reacción puesta a estudio, estas son:

E: Energía de activación de la reacción (BTU/lbmol)

$\lambda$ : Entalpia de reacción (BTU/lbmol).

$K_0$ : Factor pre exponencial ( $s^{-1}$ ).

#### *Transferencia de calor:*

En esta sección los parámetros a continuación pueden ser editados según la necesidad del usuario, siendo:

$\rho$ : Densidad de la mezcla de reactivo, producto y agua (MRPA) ( $lbm/ft^3$ ).

$\rho_j$ : Densidad del líquido de enfriamiento ( $lbm/ft^3$ ).

$C_p$ : Calor específico de MRPA (Btu/lbm °R)

$C_{pj}$ : Calor específico del líquido de enfriamiento (Btu/lbm °R)

G: Gravedad específica de MRPA (Adimensional)

$G_j$ : Gravedad específica del líquido de enfriamiento (Adimensional),

$\mu$ : Coeficiente de transferencia de calor global (Btu/h °R  $ft^2$ ).

#### *Constantes físicas:*

En esta sección los parámetros no se pueden cambiar ya que son constantes y factores de conversión que se mantienen, estos son:

$gc$ : Factor de conversión. ( $lbm\ ft/ lbf\ s^2$ )

g: Constante de la gravedad. (ft/s<sup>2</sup>)

R: Constante de los gases ideales 1.9858 (Btu L/mol°R).

- *Parámetros de control*

- *SetPoint (SP)*

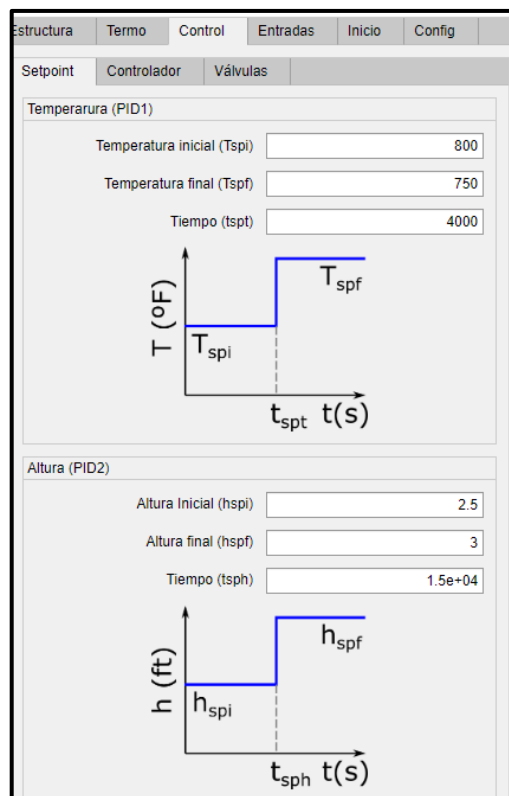
Dentro de los parámetros de control tenemos la subsección de SP, donde se especifica la temperatura del reactor y la altura deseados. En este modelo los SP ingresan como saltos unitarios. Es decir, que existe un cambio abrupto de valores de SP durante la simulación. Todo depende de la configuración que el usuario consigne.

*Temperatura (PID1):*

Tomando como referencia la figura a continuación, se observa que el valor de la temperatura inicial es 800°R, y en el segundo 4000 este valor cambia 750°R.

*Altura de fluido (PID2):*

Para la altura como se observa los siguientes parámetros, siendo estos, un valor inicial de 2.5 ft, el cual cambia a 3 ft en el segundo 15000.



**NOTA:** Si se requiere probar el efecto que tiene la variación de un solo punto de consigna se puede colocar para el otro setpoint un tiempo de salto igual a 0 segundos. Esto hace que permanezca constante durante toda la simulación.

- *Controladores*

En el modelo del reactor CSTR hay dos variables son controladas: temperatura del reactor y el nivel o altura del fluido. Para ello se utilizan dos controladores PID, nombrados PID1 y PID2. Para ambos controladores 4 parámetros son necesario:



Kp: Constante proporcional

Ki: Constante integral

Kd: Constante derivativa

N: Constante de filtro.

The screenshot shows a control software interface with a menu bar (Estructura, Termo, Control, Entradas, Inicio, Config) and a sub-menu (Setpoint, Controlador, Válvulas). It displays two PID controllers:

**Temperatura (PID1)**

K Proporcional (kp1)	-1.038e+04
K Integral (ki1)	0
K Derivativo (kd1)	-945.1
Const. Filtro (N1)	1.685e+04

$$K_{p1} \left\{ 1 + K_{i1} \frac{1}{s} + K_{d1} \frac{N_1}{1 + \frac{N_1}{s}} \right\}$$

**Altura (PID2)**

K Proporcional (kp2)	-3545
K Integral (ki2)	0
K Derivativo (kd2)	0
Const. Filtro (N2)	100

$$K_{p2} \left\{ 1 + K_{i2} \frac{1}{s} + K_{d2} \frac{N_2}{1 + \frac{N_2}{s}} \right\}$$


**NOTA:** Los valores de las constantes de cada controlador se pueden obtener usando la herramienta PID Tuner de MATLAB. Usando el modelo de Simulink *cstr\_pid.slx*.

#### - Válvulas

En el modelo del reactor CSTR las variables controladas son: El flujo de salida del reactor (F) y el flujo de entrada de líquido de enfriamiento a la chaqueta (Fj). Para controlar estas variables se requiere de válvulas de control proporcionales, mismas que en el modelo reciben los nombres: V001 para el control de F, y V002 para el control de Fj.

Estructura Termo Control Entradas Inicio Config

Setpoint Controlador Válvulas

Altura (V002)

Coef. valvula V002 (cv)

$$f(t) = C_v V_p(t) \sqrt{\frac{\rho g h(t)}{144 g_c G}}$$

Temperatura (V001)

Coef. valvula V001 (cvj)

Caída de presión (dpj)

$$f_j(t) = C_{vj} V_{pj}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_j}{G_j}}$$

- *Parámetros de entrada*

Las entradas del proceso comprenden dos grupos: flujos de entrada y las perturbaciones. Para el caso de esta simulación las entradas corresponden a las temperaturas del flujo de alimentación y la temperatura del líquido de enfriamiento. Las perturbaciones corresponden al flujo volumétrico de alimentación y la concentración del reactivo A en ella.

Las perturbaciones al igual que los SP ingresa como saltos unitarios, con el objetivo de observar la respuesta del sistema de control a dichos cambios. El proceso de configuración sigue el mismo principio que para los SP.

Estructura Termo Control Entradas Inicio Config

Perturbaciones Fijas

Flujo de entrada (F)

Tiempo salto F0 (tsf0)

Flujo inicial F0 (f0i)

Flujo final final (f0f)

Concentración de A (CA)

Tiempo salto Ca0 (tca0)

Concent. A inicial (ca0i)

Concent. A final (ca0f)

- *Condiciones iniciales del proceso*

Como se presentará en la sección de los modelos matemáticos del reactor CSTR, ecuaciones diferenciales describen el proceso, por lo tanto, se necesitan cinco condiciones iniciales para integrar estas ecuaciones.

Las condiciones iniciales del proceso son las siguientes:

$h_0$ : Altura de fluido en el reactor al inicio del proceso.

$Ca_0$ : Concentración del reactivo A al inicio del proceso.

$Cb_0$ : Concentración del producto B al inicio del proceso.

T: Temperatura del reactor al inicio del proceso.

$T_j$ : Temperatura del líquido de enfriamiento dentro de la chaqueta al inicio del proceso.

Estructura	Termo	Control	Entradas	Inicio	Config
			Altura liq. reactor ( $h_0$ )	<input type="text" value="0.1"/>	
			Concentracion A ( $Ca_0$ )	<input type="text" value="0"/>	
			Concentracion B ( $Cb_0$ )	<input type="text" value="0"/>	
			Temperatura liq. reactor ( $T_0$ )	<input type="text" value="80"/>	
			Temperatura chaqueta ( $T_j$ )	<input type="text" value="70"/>	

- *Parámetros de configuración de la simulación*

Algunos parámetros de la simulación son controlables desde la interface de usuario:

Tiempo inicial: 0 segundos por lo general.

Tiempo final: Tiempo final de la simulación en segundos.

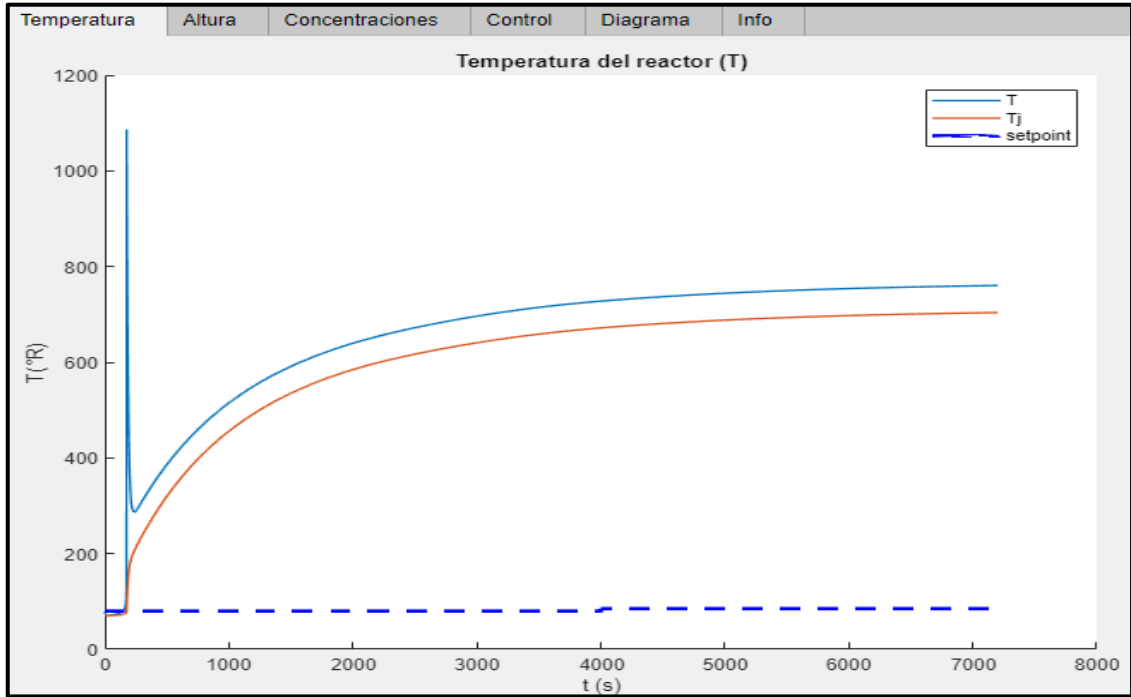
Tamaño de paso: El tamaño del paso en cada iteración del solver de Simulink.

Estructura	Termo	Control	Entradas	Inicio	Config
			Inicio ( $t_0$ )	<input type="text" value="0"/>	
			Final ( $t_f$ )	<input type="text" value="7200"/>	
			Tamaño salto (sps)	<input type="text" value="0.03"/>	

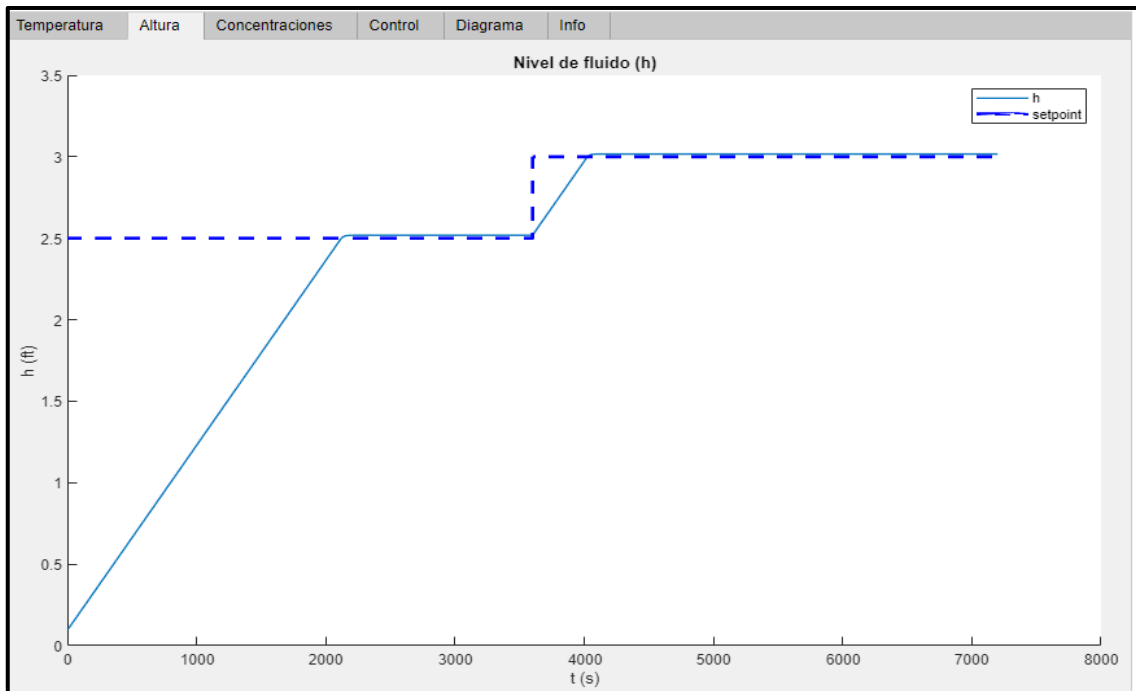
### **Visualización de resultados**

Los resultados se muestran en las ventanas de visualización, como ejemplo de esto tenemos los resultados de un modelo puesto a simulación.

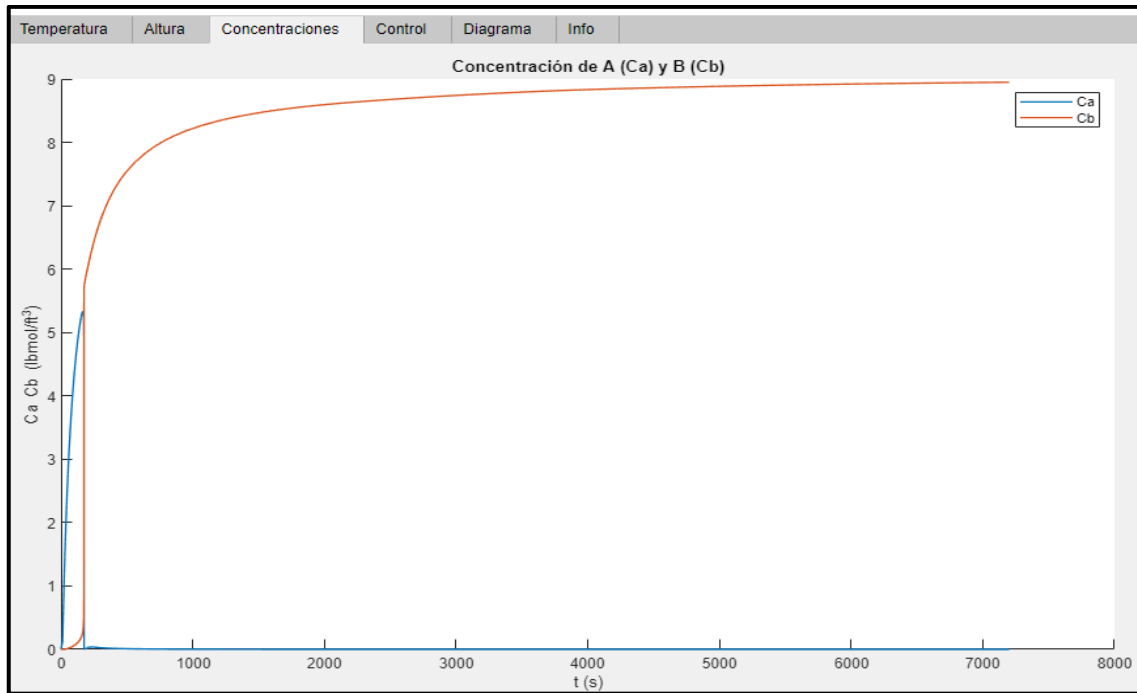
- *Resultado de la temperatura:*



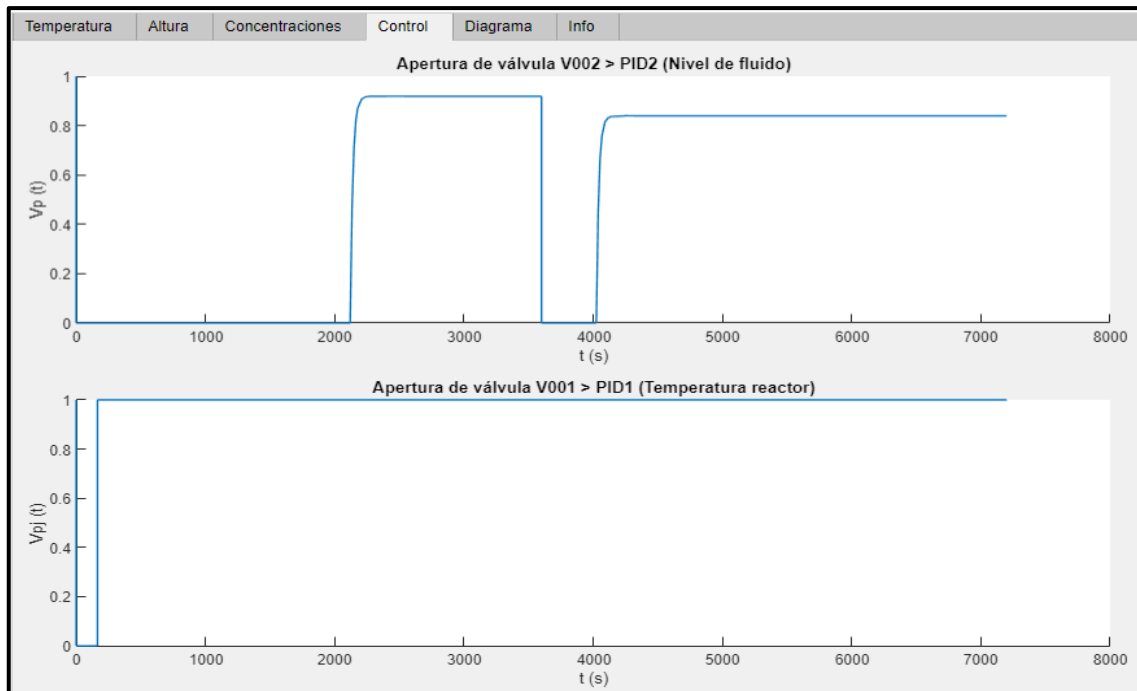
- *Resultado para la Altura:*



- *Resultado para la concentración:*



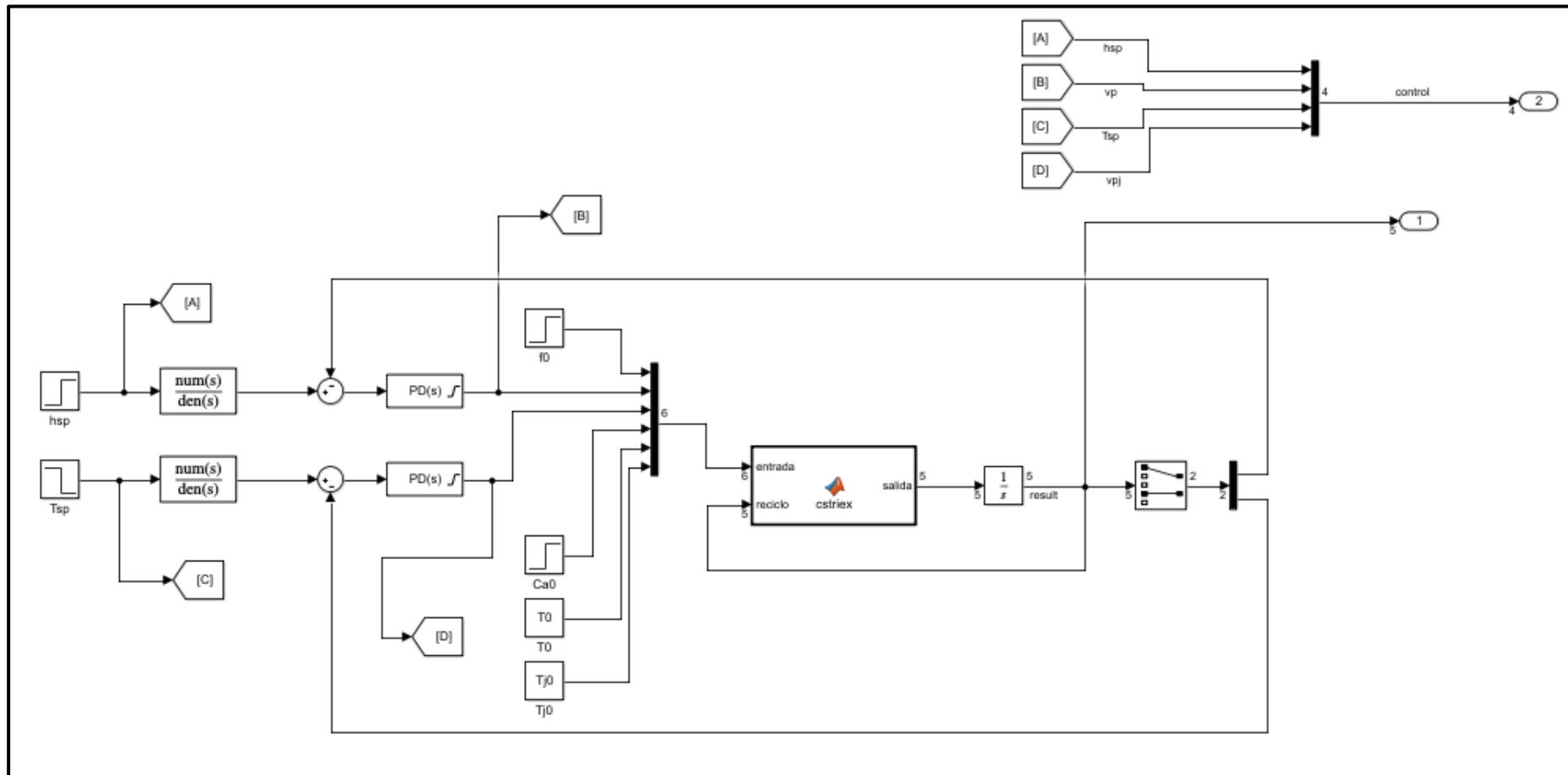
- *Resultado del control de válvulas:*



**NOTA:** Los resultados se deben interpretar en función de la configuración del caso realizada. Parámetros como los estructurales tiene gran incidencia en los resultados al igual que las condiciones iniciales.

# FUNCIONALIDAD

## Modelo Simulink



El proceso este modelado en Simulink usando un bloque Matlab Función, donde se encuentran codificadas las siguientes ecuaciones:

$F = k_7 \sqrt{h} v_p(t)$	Flujo de salida reactor
$F_j = k_8 v_{pj}(t)$	Fujo de salida chaqueta
$k_T = k_0 e^{-\frac{k_6}{T}}$	Constante cinética
$\frac{dh}{dt} = k_1(F_0 - F)$	Nivel de fluido
$\frac{dC_a}{dt} = \frac{k_1}{h} F_0(C_{a0} - C_a) - k_t C_a$	Concentración de A
$\frac{dC_b}{dt} = k_t C_a - \frac{k_1 F_0}{h} C_b$	Concentración de B
$\frac{dT}{dt} = \frac{k_1 F_0}{h} (T_0 - T) - \frac{k_2}{h} (T - T_j) - k_3 k_t C_a$	Temperatura reactor
$\frac{dT_j}{dt} = k_4 F_j (T_{j0} - T_j) + k_5 (T - T_j)$	Temperatura chaqueta

Las dimensiones importantes para el modelo son:

$A = \frac{\pi D^2}{4}$	Sección transversal reactor
$A_{tc} = \pi D h_j$	Área transferencia de calor
$V_j = \left[ \frac{\pi(D + 2E_j)}{4} - A \right] h_j$	Volumen de la chaqueta

Siendo las constantes las siguientes:

$$k_1 = \frac{1}{448.83 A}$$

$$k_2 = \frac{\mu A_{tc}}{A \rho C_p * 3600}$$

$$k_3 = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

$$k_4 = \frac{1}{V_j}$$

$$k_5 = \frac{\mu A_{tc}}{\rho_j C_{pj} V_j * 3600}$$

$$k_6 = \frac{E}{R}$$

$$k_7 = \frac{c_v \sqrt{\rho g}}{144 G_w g_c}$$

$$k_8 = \frac{\sqrt{\frac{\Delta P_j}{G_j}} c_{vj}}{448.83}$$

## Parámetros que se pueden editar en la aplicación

<i>Nombre del Parámetro</i>	<b>Valor sugerido o rango</b>	<b>Unidades</b>
<i>Diámetro</i>	3 a 6	Pies
<i>Espesor de la chaqueta</i>	10% al 20% del diámetro	Pies
<i>Altura del reactor</i>	3 a 6	Pies
<i>Altura de la chaqueta</i>	Menor a la altura del reactor	Pies
<i>Coefficiente de transferencia de calor (mu)</i>	150 a 176	Btu/h°Rpie <sup>2</sup>
<i>Densidad de la mezcla (rho)</i>	40 a 62.2	Lbm/pie <sup>3</sup>
<i>Densidad del flujo en la chaqueta (rhoj)</i>	62.3 a 62.4	Lbm/pie <sup>3</sup>
<i>Calor específico de la mezcla A+B (Cp)</i>	0.75 a 1	Btu/lbm°R
<i>Calor específico del agua fría de la chaqueta (Cpj)</i>	0.75 a 1	Btu/lbm°R
<i>Gravedad específica de la mezcla A+B (Gw)</i>	Densidad del flujo con relación al agua	Adimensional
<i>Gravedad específica del flujo en la chaqueta (Gj)</i>	Densidad del flujo de la chaqueta con relación al agua	Adimensional
<i>Energía de activación (E)</i>	13606 a 30000	Btu/lb <sub>mol</sub>
<i>Calor de reacción (lambda)</i>	-13606 a -30000	Btu/lb <sub>mol</sub>
<i>Factor pre-exponencial de Arrhenius (k0)</i>	1.966 x 10 <sup>7</sup>	s <sup>-1</sup>
<i>Flujo de entrada al reactor (f0i).</i>	2 a 10	Gpm
<i>Flujo de perturbación entrada al reactor (f0f).</i>	5 a 15	Gpm
<i>Tiempo de perturbación del flujo</i>	4000 a 15000	S
<i>Concentración inicial de A (CA0i).</i>	0.1 a 9	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
<i>Concentración perturbación de A (CA0f)</i>	0.2 a 9	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
<i>Tiempo de la perturbación de la concentración.</i>	4000	S
<i>Temperatura del flujo de entrada. (T0)</i>	530 a 600	°R
<i>Temperatura del flujo en la chaqueta (Tj0)</i>	594 a 650	°R
<i>Altura del líquido en el reactor.</i>	Superior 0.0001	Gpm
<i>Concentración inicial de A (CA0).</i>	0.1 en adelante	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
<i>Concentración inicial de B (CB0).</i>	0 en adelante	lb <sub>mol</sub> /pies <sup>3</sup>
<i>Temperatura del Reactor</i>	600 a 750	°R
<i>Temperatura de la chaqueta</i>	594.6 a 600	°R
<i>Coefficiente de la válvula V002 (Cv)</i>	1.15 a 5.28	Gpm/psi <sup>0.5</sup>
<i>Coefficiente de la válvula V001 (Cvj)</i>	5.28 a 9.86	Gpm/psi <sup>0.5</sup>
<i>Caída de presión (dpj)</i>	2 a 14	Psi
<i>Tiempo del Set Point de h</i>	4000 a 15000	s



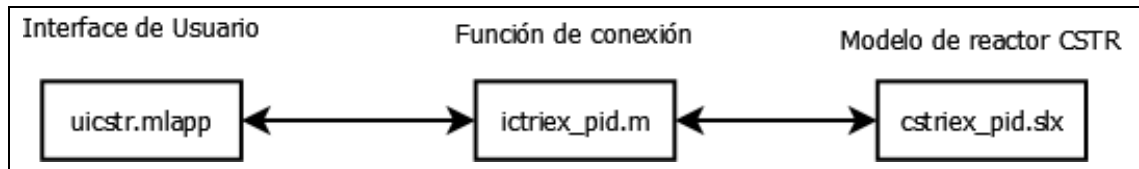
<i>Altura del Set Point inicial de h</i>	2.5	Pies
<i>Altura del Set Point final de h</i>	3	Pies
<i>Tiempo del Set Point de la Temperatura</i>	4000 a 15000	S
<i>temperatura del Set Point inicial</i>	800 a 850	°R
<i>temperatura del Set Point final</i>	700 a 750	°R
<i>Tiempo inicial de simulación</i>	0	S
<i>Tiempo final de la simulación</i>	Superior a 7200 para evidenciar cambios en el comportamiento	S



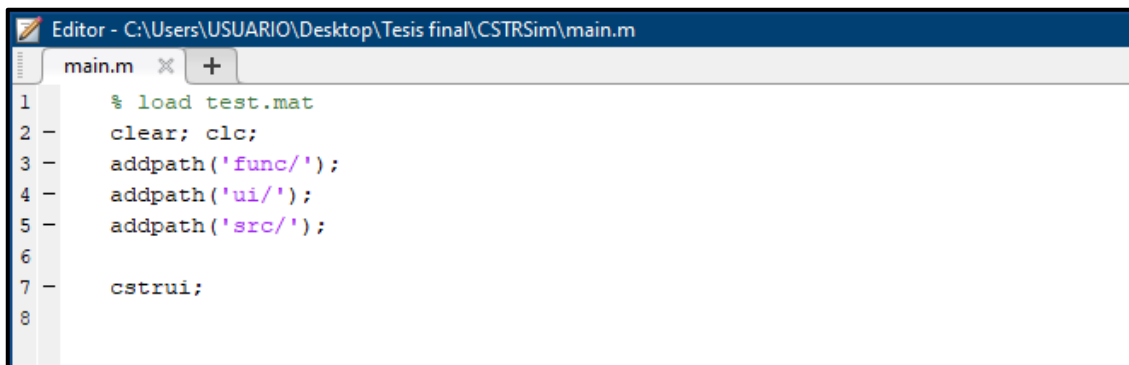
**NOTA:** Los valores de las constantes de cada controlador también son editables, para obtener estos valores se sugiere obtenerlos usando la herramienta PID Tuner de MATLAB. Usando el modelo de Simulink *cstr\_pid.slx*.

### ¿Como funciona el software?

La aplicación consta de tres partes: el modelo de simulink “*cstriex\_pid.slx*” (figura 17), una función de interconexión o interfaz “*ictriex.m*” y una interfaz gráfica de usuario “*uicstr.mlapp*”. El funcionamiento del sistema es el siguiente: La interfaz toma la información del usuario y la envía a la función interface, esta a su vez llama al modelo de Simulink que devuelve los resultados a la función interfaz y este a su vez a la interfaz grafica



## ANEXO B: Distribución de archivos de código fuente



```
Editor - C:\Users\USUARIO\Desktop\Tesis final\CSTRSim\main.m
main.m x +
1 % load test.mat
2 - clear; clc;
3 - addpath('func/');
4 - addpath('ui/');
5 - addpath('src/');
6
7 - cstrui;
8
```

Realizado por: Vaca B., 2021.

## ANEXO C: Código fuente de Simulink

```
function salida = cstriex(entrada, reciclado, constantes)

% Entradas
f0 = entrada(1,1);
vp = entrada(2,1);
vpj = entrada(3,1);
Ca0 = entrada(4,1);
T0 = entrada(5,1);
Tj0 = entrada(6,1);

% Reciclo
h = reciclado(1);
Ca = reciclado(2);
Cb = reciclado(3);
T = reciclado(4);
Tj = reciclado(5);

% Constant
k0 = constantes(1);
k1 = constantes(2);
k2 = constantes(3);
k3 = constantes(4);
k4 = constantes(5);
k5 = constantes(6);
k6 = constantes(7);
k7 = constantes(8);
k8 = constantes(9);

% Flujo de salida del reactor
f = k7*sqrt(h)*vp;
```

```

% Flujo de entrada de agua - chaqueta
fj = k8*vpj;

% La constante cinética
kt = k0*exp(-k6/T);

% Balance de masa general
dh = k1*(f0 - f);

% Balance del componente A
dCa = (((k1*f0)/h)*(Ca0-Ca))-(kt*Ca);

% Balance del componente B
dCb = (kt*Ca)-(k1*f0*Cb)/h;

% Balance de energía en el reactor
dT = ((k1*f0)/h)*(T0-T) - ((k2/h)*(T-Tj)) - (k3*kt*Ca);

% Balance de energía en la chaqueta
dTj = (k4*fj*(Tj0-Tj)) +(k5*(T-Tj));

salida = [dh; dCa; dCb; dT; dTj];

```

## ANEXO D: código fuente de App Design

```
properties (Access = private)
    model % Estructura del modelo
    data;
end

methods (Access = private)

    function plotResults(app)

        % Borrar grafica
        app.UIAxes.cla;
        app.UIAxes2.cla;
        app.UIAxes3.cla;
        app.UIAxes4.cla;
        app.UIAxes5.cla;

        % Resultados de temperatura
        hold(app.UIAxes, "on");
        plot(app.UIAxes, app.model.time, app.model.result(:,4),...
            app.model.time, app.model.result(:,5), 'LineWidth', 1);
        plot(app.UIAxes, app.model.time, app.model.control(:,3), ...
            'LineWidth', 2, 'Color', 'b', "LineStyle","--");
        legend(app.UIAxes, 'T', 'Tj', 'setpoint');

        % Resultados de nivel de fluido
        hold(app.UIAxes2, "on");
        plot(app.UIAxes2, app.model.time, app.model.result(:,1),...
            'LineWidth', 1);
        plot(app.UIAxes2, app.model.time, app.model.control(:,1), ...
            'LineWidth', 2, 'Color', 'b', "LineStyle","--");
        legend(app.UIAxes2, 'h', 'setpoint');

        % Resultados de concentracion
        hold(app.UIAxes3, "on");
        plot(app.UIAxes3, app.model.time, app.model.result(:,2),...
            app.model.time, app.model.result(:,3), 'LineWidth', 1);
        legend(app.UIAxes3, 'Ca', 'Cb');

        % Resultados de valvula 1
        hold(app.UIAxes4, "on");
        plot(app.UIAxes4, app.model.time, app.model.control(:,2),...
```

```

plot(app.UIAxes4, app.model.time, app.model.control(:,2),...
      'LineWidth', 1);

% Resultados de valvula 2
hold(app.UIAxes5, "on");
plot(app.UIAxes5, app.model.time, app.model.control(:,4),...
      'LineWidth', 1);

end

function runSim(app)

    app.toggleUIC('off', 'Simulando...');

    %Create a function to run the simulation
    simInp = Simulink.SimulationInput('cstrPID');

    simInp = simInp.setModelParameter('StartTime', num2str(app.data.cfg(1)))
    simInp = simInp.setModelParameter('Stoptime', num2str(app.data.cfg(2)));

    simInp = simInp.setVariable('kp1', app.data.cont(4));
    simInp = simInp.setVariable('kd1', app.data.cont(5));
    simInp = simInp.setVariable('ki1', app.data.cont(6));
    simInp = simInp.setVariable('N1', app.data.cont(7));

    simInp = simInp.setVariable('kp2', app.data.cont(8));
    simInp = simInp.setVariable('kd2', app.data.cont(9));
    simInp = simInp.setVariable('ki2', app.data.cont(10));
    simInp = simInp.setVariable('N2', app.data.cont(11));

    simInp = simInp.setVariable('Tspi', app.data.cont(12));
    simInp = simInp.setVariable('Tspf', app.data.cont(13));
    simInp = simInp.setVariable('tsp_t', app.data.cont(14));

    simInp = simInp.setVariable('hspl', app.data.cont(15));
    simInp = simInp.setVariable('hspf', app.data.cont(16));
    simInp = simInp.setVariable('tsp_h', app.data.cont(17));

    simInp = simInp.setVariable('t_sf0', app.data.input(1));
    simInp = simInp.setVariable('f0i', app.data.input(2));
    simInp = simInp.setVariable('f0f', app.data.input(3));

```

```

simInp = simInp.setVariable('t_cao', app.data.input(4));
simInp = simInp.setVariable('Ca0i', app.data.input(5));
simInp = simInp.setVariable('Ca0F', app.data.input(6));

simInp = simInp.setVariable('T0', app.data.input(7));
simInp = simInp.setVariable('Tj0', app.data.input(8));

simInp = simInp.setVariable('inicial', app.data.ini');

% Control
cv = app.data.cont(1); % gmp/psi^1.5 Coeficiente válvula V001
cvj = app.data.cont(2); % gmp/psi^1.5 Coeficiente válvula V002
dPj = app.data.cont(3); % psi Caída de presión en la válvula V002

% Prop. térmicas
mu = app.data.termo(1); % Btu/h°F ft2 Coeficiente de transferencia calor
rho = app.data.termo(2); % lbm/ft3 Densidad de la solución
cp = app.data.termo(3); % Btu/lbm °F Calor específico de la solución
lambda = app.data.termo(4); % Btu/lbmol Calor de reacción
rhoj = app.data.termo(5); % lbm/ft3 Densidad del fluido de enfriamiento
cpj = app.data.termo(6); % Btu/lbm °F Calor específico del fluido de enfriamiento
E = app.data.termo(7); % Btu/lbmol Energía de activación de la reacción
R = app.data.termo(8); % Btu L/mol°R Constante de los gases ideales
gw = app.data.termo(9); % ADM Gravedad específica solución
gj = app.data.termo(10); % ADM Gravedad específica del fluido de enfriamiento

% Const. físicas
gc = app.data.termo(11); % lbm ft/ lbf s^2 factor de conversión
g = app.data.termo(12); % ft/s2 Constante de la gravedad

% Estructura
D = app.data.estr(1); % ft Diametro del cilindro
Ej = app.data.estr(2); % ft Espesor de la chaqueta
h = app.data.estr(3); % ft Altura del cilindro
hj = app.data.estr(4); % ft Altura de la chaqueta

% CALCULO DE CONSTANTES
% Structure parameters calculation
A = (pi()*(D)^2)/4; % ft2 Area trans. del reactor
Atc = pi()*D*hj; % ft2 Area trans. de calor
vi = (((pi()*(D+2*Ej)^2)/4)-A)*hj; % ft3 Volumen de la chaqueta

```

```

% Constantes
k0 = app.data.termo(13); % s^-1 C
k1 = 1/(448.83*A); % ft^-2
k2 = (mu*Atc)/(A*rho*cp); %
k3 = (lambda/(rho*cp));
k4 = 1/vj;
k5 = (mu*Atc)/(rhoj*cpj*vj);
k6 = (E/R);
k7 = cv*sqrt((rho*g)/(144*gw*gc));
k8 = sqrt(dPj/gj)*cvj;

constantes = [k0, k1, k2, k3, k4, k5, k6, k7, k8];

simInp = simInp.setVariable('constantes', constantes);

simInp = simulink.compiler.configureForDeployment(simInp);

simout = sim(simInp);

output = simout.yout;

tiempo = simout.tout;
resultado = output.signals(1).values;
cont = output.signals(2).values;

app.model.time = tiempo;
app.model.control = cont;
app.model.result = resultado;

app.toggleUIC('on', 'Resolver');

end

function toggleUIC(app, state, label)
% toggle the state of the uicontrols in the app
uics = findall(app.UIFigure);
for idx = 1:length(uics)
    uic = uics(idx);
    if isprop(uic, 'Enable')
        uic.Enable = state;
    end
end

```

```

        % update the simulate button text
        app.ResolverButton.Text = label;
        drawnow; % flush the ui events queue
    end % toggleUIC

end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

    % Button pushed function: ResolverButton
    function ResolverButtonPushed(app, event)

        % 1. Obtener la informacion de la Ui y construi las matrices

        % Estructural
        app.data.estr = [app.DiametroDEditField.Value, ...
            app.EspesorchaquetaEjEditField.Value, ...
            app.AlturareactorhEditField.Value, ...
            app.AlturachaquetahjEditField.Value];

        % Control
        app.data.cont = [app.CofvalvulaV002cvEditField.Value, ...
            app.CeofvalvulaV001cvjEditField.Value, ...
            app.CaidadepresindpjEditField.Value, ...
            app.KProporcionalkp1EditField.Value, ...
            app.KDerivativokd1EditField.Value, ...
            app.KIntegralki1EditField.Value, ...
            app.ConstFiltroN1EditField.Value, ...
            app.KProporcionalkp2EditField.Value, ...
            app.KDerivativokd2EditField.Value, ...
            app.KIntegralki2EditField.Value, ...
            app.ConstFiltroN2EditField.Value, ...
            app.TemperaturainicialTspiEditField.Value, ...
            app.TemperaturafinalTspfEditField.Value, ...
            app.TiempotsptEditField.Value, ...
            app.AlturaInicialhspiEditField.Value, ...
            app.AlturafinalhspfEditField.Value, ...
            app.TiempotsphEditField.Value];
    end
end

```



```

% Termodinamica
app.data.termo = [app.CoeficienteGTCmuEditField.Value, ...
    app.DensidadMRPrhoEditField.Value, ...
    app.CalorespMRPCpEditField.Value, ...
    app.CalorRxlambdeditField.Value, ...
    app.DensidadLErhojEditField.Value, ...
    app.CalorespLEcpcjEditField.Value, ...
    app.EnergiaactivaEeditField.Value, ...
    app.ConstGasIdealREditField.Value, ...
    app.GravedadespMRPGwEditField.Value, ...
    app.GravedadesPLEGjEditField.Value, ...
    app.FactorconvgcEditField.Value, ...
    app.GravedadgEditField.Value, ...
    app.Factropreexpk0EditField.Value];

% Iniciales
app.data.ini = [app.Alturaliqreactorh0EditField.Value, ...
    app.ConcentracionACa0EditField.Value, ...
    app.ConcentracionBCb0EditField.Value, ...
    app.TemperaturaliqreactorT0EditField.Value, ...
    app.TemperaturachaquetaTj0EditField.Value];

% Entradas
app.data.input = [app.TiemposaltoF0tsf0EditField.Value, ...
    app.FlujoinicalF0f0iEditField.Value, ...
    app.Flujofinalfinalf0f0EditField.Value, ...
    app.TiemposaltoCa0tca0EditField.Value, ...
    app.ConcentAinicialca0iEditField.Value, ...
    app.ConcentAfinalca0fEditField.Value, ...
    app.TemperaturaflujoT0EditField.Value, ...
    app.TemperaturalRTj0EditField.Value];

% Config
app.data.cfg = [app.Iniciot0EditField.Value, ...
    app.FinaltfEditField.Value, ...
    app.TamaosaltoSpsEditField.Value];

% 2. Correr la simulacion
[tiempo, cont, resultado] = icstrex(app.data.estr,app.data.cont,
    app.data.termo,app.data.ini, app.data.input,app.data.cfg);
app.runSim;

```

```
% 3. Graficar los resultados
app.plotResults;

end

% Button pushed function: WorkspaceButton
function WorkspaceButtonPushed(app, event)
    assignin('base','model',app.model);
end

% Button pushed function: SaveMATButton
function SaveMATButtonPushed(app, event)
    [file,path,~] = uiputfile('*.m','File Selection','test.m');

    saveres(strcat(path,file), app.data.estr, app.data.cont, app.data.termo,
        app.data.ini, app.data.input, app.data.cfg, app.model);

end

% Button pushed function: SalirButton
function SalirButtonPushed(app, event)
    app.delete;
end
end
```

## ANEXO E: Workspace de MATLAB

Workspace	
Name ▲	Value
A	19.6350
Atc	78.5398
Ca0f	1.6000
Ca0i	0.8000
cfg	[0,7200,0.0300]
constantes	[10.2800,1.1347e-04,80.0000,-1200,0.0231,29.1843,755.3346,3.5228,14.0857]
control	<i>1x17 double</i>
cp	1
cpj	1
cv	5.2800
cvj	9.8600
D	5
dPj	2
E	1500
Ej	0.5000
entrada	[10,5,10,12,0.8000,1.6000,80,77]
est	[5,0.5000,6.5000,5]
f0f	10
f0i	5
g	32.2000
gc	32.2000
gj	0.9800
gw	0.7800
h	6.5000
hj	5
hspf	3
hspi	2.5000
inicial	[2;0.8000;0;80;77]
termo	<i>1x12 double</i>
Tj0	77
tsp_h	3600
tsp_t	4000
Tspf	85
Tspi	80
vj	43.1969

Workspace	
Name ▲	Value
k0	10.2800
k1	1.1347e-04
k2	80.0000
k3	-1200
k4	0.0231
k5	29.1843
k6	755.3346
k7	3.5228
k8	14.0857
kd1	-0.1000
kd2	0.0500
ki1	-0.4000
ki2	0
kp1	-35
kp2	-50
lambda	-60000
mu	1000
N1	100
N2	100
R	1.9859
rho	50
rhoj	62.3000
sps	0.0300
T0	80
t_ca0	12
t_fin	7200
t_ini	0
t_sf0	10