



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN  
SEPARADOR TRIFÁSICO DE PETRÓLEO COMO  
HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA INGENIERÍA DE  
PETRÓLEOS”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA: ANA DANIELA GUANGA CUADRADO**

**DIRECTOR: Ing. DARÍO FERNANDO GUAMÁN LOZADA MSc.**

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Ana Daniela Guanga Cuadrado

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, Ana Daniela Guanga Cuadrado, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 14 de septiembre de 2021



**Ana Daniela Guanga Cuadrado**

**060483090-1**

**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 SEPARADOR TRIFÁSICO DE PETRÓLEO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS”**, realizado por la señorita: **ANA DANIELA GUANGA CUADRADO**, 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. Marco Raúl Chuiza Rojas MSc. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-14
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada MSc. <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	_____	2021-09-14
Ing. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos MSc. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-14

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a Dios, el ser que me ha regalado la vida y la salud para ir cumpliendo cada uno de mis objetivos y ahora culminar mis estudios universitarios. A los ángeles que me cuidan desde el cielo, mis abuelitos: Humberto, Juanita, Segundo Juan de Dios y Rosita. A mis padres Edgar y Anita quienes han sido mi luz y mi guía en todos los momentos de mi vida. A mis compañeros en el tren de la vida, a mis hermanos Vinicio y Diego. A mis sobrinos Juan Diego, Martín, Felipe y Joaquín quienes con sus ocurrencias han hecho que sonría pese a las dificultades.

Ana Daniela

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios quien me ha concedido la salud y la vida, ya que sin ellos nada sería posible. A mis padres Edgar Guanga y Anita Cuadrado quienes me han brindado su amor incondicional, valores y enseñanzas para poder culminar esta importante etapa de mi vida.

Agradezco a mis hermanos Vinicio y Diego por su apoyo, cariño y consejos, sin duda alguna gracias a sus valiosas huellas he podido seguir sus pasos. A mis cuñadas y a toda mi familia que siempre han estado al pendiente de mis pequeños y grandes pasos a lo largo de mi vida y de mi carrera universitaria. A Gabriel por su cariño y apoyo incondicional. A todos los docentes que a lo largo de la carrera impartieron sus conocimientos, paciencia y sabiduría.

Finalmente, un agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, cuna del saber, formadora de profesionales dispuestos a trabajar por el desarrollo y progreso del país.

Ana Daniela

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	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
2.2.	Bases Teóricas.....	7
2.2.1.	<i>Separación de Petróleo</i> .....	7
2.2.1.1.	Separador Trifásico de crudo.....	7
2.2.1.2.	Proceso de separación.....	8
2.2.1.3.	Principios de Separación.....	9
2.2.1.4.	Zonas de Separación.....	10
2.2.1.5.	Composición del Crudo.....	11
2.2.2.	<i>Software MATLAB</i> .....	12
2.2.2.1.	<i>Generalidades de Matlab</i> .....	12
2.2.2.2.	<i>Simulink</i> .....	14
2.2.2.3.	<i>Interfaz Gráfica de Usuario</i> .....	17

2.2.3.	<b>Sistema de Control</b> .....	19
2.2.3.1.	<i>Válvulas de Control</i> .....	20
2.2.3.2.	<i>Controladores</i> .....	21
2.3.	<b>Marco Legal</b> .....	22
2.3.1.	<i>Normativa para el uso de tecnologías</i> .....	22

### CAPÍTULO III

3.	<b>METODOLOGÍA</b> .....	23
3.1.	<b>Determinación de parámetros</b> .....	24
3.1.1.	<i>Selección del modelo del separador</i> .....	24
3.1.2.	<i>Parámetros del proceso</i> .....	25
3.1.2.1.	<i>Parámetros estructurales</i> .....	25
3.1.2.2.	<i>Parámetros de entrada</i> .....	26
3.1.2.3.	<i>Condiciones de operación</i> .....	33
3.1.2.4.	<i>Parámetros para el sistema de control</i> .....	34
3.1.2.5.	Propiedades de los fluidos .....	34
3.2.	<b>Formulación del Modelo</b> .....	37
3.2.1.	<i>Cálculo del Volumen Total del Separador</i> .....	37
3.2.2.	<i>Cálculo del Volumen por Secciones del Separador</i> .....	38
3.2.2.1.	<i>Volumen de la Cámara de Separación</i> .....	38
3.2.2.2.	<i>Volumen del Colector de Crudo</i> .....	39
3.2.3.	<i>Términos</i> .....	40
3.2.4.	<i>Balances de Masa</i> .....	44
3.2.4.1.	<i>Balance de Líquido en la cámara de Separación</i> .....	44
3.2.4.2.	<i>Balance de Agua en la cámara de Separación</i> .....	45
3.2.4.3.	<i>Balance de Crudo en la Cámara de Separación</i> .....	46
3.2.4.4.	<i>Balance de Crudo en el Colector</i> .....	46
3.2.4.5.	<i>Balance del Gas</i> .....	47
3.2.5.	<b>Sistema de Control</b> .....	50
3.2.5.1.	<i>Flujo de salida de agua de la Cámara de Separación</i> .....	51
3.2.5.2.	<i>Flujo de salida de crudo del Colector</i> .....	52
3.2.5.3.	<i>Flujo de salida del Gas</i> .....	53
3.2.6.	<b>Ecuaciones adicionales para el modelo</b> .....	55
3.2.6.1.	<i>Flujo de Crudo en el Colector</i> .....	55
3.2.6.2.	<i>Relación entre agua y crudo en la cámara de separación</i> .....	56
3.3.	<b>Simulación en Matlab</b> .....	56



<b>3.3.1.</b>	<b><i>Creación de las principales funciones en Matlab</i></b> .....	57
3.3.1.1.	<i>Función Main</i> .....	57
3.3.1.2.	<i>Función Hemivolt</i> .....	57
3.3.1.3.	<i>Función Hemivols</i> .....	58
3.3.1.4.	<i>Función Hemihead</i> .....	58
3.3.1.5.	<i>Matlab Function</i> .....	58
3.3.1.6.	<i>Función wilsonCorr</i> .....	59
3.3.1.7.	<i>Función cubicPR</i> .....	59
3.3.1.8.	<i>Función flashWilson</i> .....	59
<b>3.3.2.</b>	<b><i>Simulación en Simulink</i></b> .....	60
3.3.2.1.	<i>Input</i> .....	60
3.3.2.2.	<i>Recycle</i> .....	61
3.3.2.3.	<i>Data</i> .....	62
3.3.2.4.	<i>Output</i> .....	62
3.3.2.5.	<i>Esquema de la Simulación utilizando Simulink</i> .....	63
3.3.2.6.	<i>Parámetros empleados en la simulación</i> .....	64
<b>3.3.3.</b>	<b><i>Corrección de errores en la simulación</i></b> .....	64
<b>3.4.</b>	<b><i>Creación de una Interfaz Gráfica de Usuario</i></b> .....	65
3.4.1.	<i>Diseño de las pantallas a visualizarse en la Aplicación</i> .....	65
3.4.2.	<i>Programación del Código interno</i> .....	65
<b>3.5.</b>	<b><i>Validación de datos obtenidos en la Simulación</i></b> .....	67

## **CAPÍTULO IV**

<b>4.</b>	<b>GESTIÓN DEL PROYECTO</b> .....	68
<b>4.1.</b>	<b>Cronograma</b> .....	68
<b>4.2.</b>	<b>Presupuesto</b> .....	69
<b>4.3.</b>	<b>Recursos materiales</b> .....	69
<b>4.4.</b>	<b>Análisis de los Resultados</b> .....	69
4.4.1.	<i>Caso 1</i> .....	69
4.4.1.1.	<i>Nivel de los fluidos</i> .....	73
4.4.1.2.	<i>Presión del Gas</i> .....	75
4.4.1.3.	<i>Apertura de las válvulas de control</i> .....	76
4.4.1.4.	<i>Caudal de los líquidos</i> .....	77
4.4.1.5.	<i>Caudal del Gas</i> .....	79
4.4.1.6.	<i>Volumen de los líquidos en las cámaras del separador</i> .....	80
4.4.2.	<i>Caso 2</i> .....	80

4.4.2.1.	<i>Nivel de los fluidos</i> .....	83
4.4.2.2.	<i>Presión del Gas</i> .....	85
4.4.2.3.	<i>Apertura de las válvulas de control</i> .....	86
4.4.2.4.	<i>Caudal de los líquidos</i> .....	87
4.4.2.5.	<i>Caudal del Gas</i> .....	88
4.4.2.6.	<i>Volumen de los líquidos en las cámaras del separador</i> .....	89
4.4.3.	<i>App que será utilizada como herramienta didáctica</i> .....	90
4.4.4.	<i>Validación de flujos de ingreso y composiciones en la fase líquida y vapor</i> .....	90
<b>CONCLUSIONES</b> .....		92
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		93
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Elementos presentes en el crudo .....	11
<b>Tabla 2-2:</b>	Características del software Matlab .....	12
<b>Tabla 3-2:</b>	Características de Simulink.....	15
<b>Tabla 5-2:</b>	Componentes de un Sistema de Control.....	19
<b>Tabla 6-2:</b>	Legislación sobre la utilización del software .....	22
<b>Tabla 1-3:</b>	Parámetros estructurales del separador. ....	25
<b>Tabla 2-3:</b>	Parámetros de entrada al separador .....	26
<b>Tabla 3-3:</b>	Condiciones de Operación del separador .....	33
<b>Tabla 4-3:</b>	Parámetros que intervienen en el sistema de control del separador.....	34
<b>Tabla 5-3:</b>	Propiedades de los fluidos .....	35
<b>Tabla 6-3:</b>	Variables por controlar en el separador.....	50
<b>Tabla 7-3:</b>	Entradas al modelo del Separador.....	60
<b>Tabla 8-3:</b>	Tipo de Controlador empleado en el sistema de control .....	61
<b>Tabla 9-3:</b>	Parámetros calculados necesarios para las ecuaciones diferenciales .....	62
<b>Tabla 10-3:</b>	Nomenclatura de las variaciones de Nivel obtenidos en Simulink .....	62
<b>Tabla 11-3:</b>	Propiedades que almacenan las funciones empleadas en la interfaz.....	66
<b>Tabla 1-4:</b>	Cronograma del proyecto.....	68
<b>Tabla 2-4:</b>	Presupuesto del proyecto. ....	69
<b>Tabla 3-4:</b>	Constantes de equilibrio y composiciones para el caso 1 .....	72
<b>Tabla 4-4:</b>	Flujos de ingreso para el caso 1 .....	73
<b>Tabla 5-4:</b>	Constantes de equilibrio y composiciones para el caso 2.....	82
<b>Tabla 6-4:</b>	Flujos de ingreso para el caso 2 .....	83
<b>Tabla 7-4:</b>	Validación de las composiciones de la fase líquida y vapor.....	91
<b>Tabla 8-4:</b>	Validación de los flujos de entrada al separador .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b>	Separación de Fases .....	8
<b>Figura 2-2:</b>	Crecimiento del agua vs tiempo .....	9
<b>Figura 3-2:</b>	Zonas o secciones de un separador trifásico de crudo .....	10
<b>Figura 4-2:</b>	Pantalla del escritorio del software Matlab .....	14
<b>Figura 5-2:</b>	Parámetros para la simulación .....	17
<b>Figura 6-2:</b>	Entorno de trabajo de App Designer .....	18
<b>Figura 1-3:</b>	Metodología del trabajo .....	23
<b>Figura 2-3:</b>	Separador con cabezas hemisféricas .....	25
<b>Figura 3-3:</b>	Separador con especificaciones para el cálculo del volumen total .....	37
<b>Figura 4-3:</b>	Cámara de separación con especificaciones para calcular volumen .....	38
<b>Figura 5-3:</b>	Colector con especificaciones para el cálculo de volumen.....	39
<b>Figura 6-3:</b>	Separador con especificaciones para calcular el volumen ocupado por el gas ..	47
<b>Figura 7-3:</b>	Presión ejercida antes y después de la válvula de control de agua .....	51
<b>Figura 8-3:</b>	Presión ejercida antes y después de la válvula de control de crudo.....	52
<b>Figura 9-3:</b>	Presión ejercida antes y después de la válvula de control de gas .....	53
<b>Figura 10-3:</b>	Flujo de crudo en el colector .....	55
<b>Figura 11-3:</b>	Altura del fluido total en la cámara de separación .....	56
<b>Figura 12-3:</b>	Procedimiento para la simulación .....	57
<b>Figura 13-3:</b>	Esquema de la Simulación utilizando Simulink .....	63
<b>Figura 14-3:</b>	Parámetros empleados en la simulación.....	64
<b>Figura 15-3:</b>	Diseño de las pantallas a visualizarse en la aplicación.....	65
<b>Figura 16-3:</b>	Diagrama utilizado en Dwsim para la validación.....	67
<b>Figura 1-4:</b>	Parámetros utilizados en la simulación para el caso 1 .....	70
<b>Figura 2-4:</b>	Parámetros utilizados en la simulación para el caso 1 .....	71
<b>Figura 3-4:</b>	Parámetros utilizados en la simulación para el caso 2.....	81
<b>Figura 4-4:</b>	Ejecución de la aplicación TPS.....	90
<b>Figura 5-4:</b>	Ventanas de la aplicación TPS.....	90

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-4:</b>	Nivel de fluidos en las cámaras del separador.....	73
<b>Gráfico 2-4:</b>	Presión del gas en el separador .....	75
<b>Gráfico 3-4:</b>	Grado de apertura de la válvula de crudo V002 .....	76
<b>Gráfico 4-4:</b>	Grado de apertura de la válvula de agua V001 .....	76
<b>Gráfico 5-4:</b>	Grado de apertura de la válvula de gas V003.....	77
<b>Gráfico 6-4:</b>	Caudal de entrada y salida de líquidos del separador .....	77
<b>Gráfico 7-4:</b>	Caudal de entrada y salida de gas del separador .....	79
<b>Gráfico 8-4:</b>	Volumen de líquidos en la cámara de separación y colector .....	80
<b>Gráfico 9-4:</b>	Nivel de fluidos en las cámaras del separador.....	83
<b>Gráfico 10-4:</b>	Presión del gas en el separador .....	85
<b>Gráfico 11-4:</b>	Grado de apertura de la válvula de crudo V002 .....	86
<b>Gráfico 12-4:</b>	Grado de apertura de la válvula de agua V001 .....	86
<b>Gráfico 13-4:</b>	Grado de apertura de la válvula de gas V003.....	87
<b>Gráfico 14-4:</b>	Caudal de entrada y salida de líquidos del separador .....	87
<b>Gráfico 15-4:</b>	Caudal de entrada y salida de gas del separador .....	88
<b>Gráfico 16-4:</b>	Volumen de líquidos en la cámara de separación y colector .....	89

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** MANUAL DE USUARIO
- ANEXO B:** CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “*MAIN.M*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO
- ANEXO C:** CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “*HEMIVOLT.M*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO
- ANEXO D:** CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “*HEMIVOLS.M*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO
- ANEXO E:** CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “*HEMIHEAD.M*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO
- ANEXO F:** CÓDIGO DE “*MATLAB FUNCTION*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO
- ANEXO G:** CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “*WILSONCORR.M*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO
- ANEXO H:** CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “*CUBICPR.M*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO
- ANEXO I:** CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “*FLASHWILSON.M*”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
<i>BPD</i>	Barriles de petróleo por día
<i>F</i>	Flujo volumétrico de alimentación
<i>g</i>	Constante de la Gravedad
<i>k<sub>d</sub></i>	Parámetro de ajuste derivativo
<i>k<sub>i</sub></i>	Parámetro de ajuste integral
<i>k<sub>p</sub></i>	Parámetro de ajuste proporcional
<i>Kv<sub>c</sub></i>	Coefficiente de la válvula de crudo
<i>Kv<sub>g</sub></i>	Coefficiente de la válvula de gas
<i>Kv<sub>w</sub></i>	Coefficiente de la válvula de agua
<i>MMSCFD</i>	Millones de pies cúbicos estándar por día
<i>N</i>	Constante de Filtro
<i>P</i>	Proporcional
<i>PID</i>	Control Proporcional Integral Derivativo
<i>T</i>	Temperatura
<i>t<sub>0</sub></i>	Tiempo inicial de la simulación
<i>t<sub>f</sub></i>	Tiempo final de la simulación
<i>TPS</i>	Separador Trifásico de Petróleo
<i>V</i>	Flujo volumétrico de gas
<i>vi</i>	Valor de inicio de una posible perturbación
<i>vs</i>	Valor final de una posible perturbación

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar el modelado, simulación y control de un Separador Trifásico de Petróleo (TPS) como herramienta didáctica para Ingeniería de Petróleos. Primero se determinan los parámetros que rigen el proceso, siendo estos, datos estructurales del equipo, condiciones de operación, propiedades del agua, crudo, gas, y flujos de entrada. Una vez que se establecen los parámetros necesarios se realiza el modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales. Para realizar la simulación se utilizó el software Matlab donde se aplicó una programación funcional. Para el control del sistema se trabajó con Simulink empleando el bloque Matlab Function que facilitó importar el modelo desarrollado en Matlab, esta herramienta facilitó el control del nivel de los fluidos y presión del gas al utilizar controladores Proporcional Integral Derivativo (PID) y un Proporcional. Con la herramienta App Designer se creó la aplicación TPS que permite interactuar al usuario con la simulación del equipo. La aplicación se instala en el ordenador con pasos sencillos detallados en un manual de usuario. Los flujos de entrada de crudo y gas se establecen mediante cálculos flash, y fueron validados utilizando el paquete termodinámico Wilson del simulador de procesos Dwsim. Se obtuvieron siete gráficas donde se ilustra el nivel de los fluidos, la presión del gas, apertura de las válvulas de control de: agua, crudo y gas, además volúmenes de las cámaras del equipo y los caudales de los líquidos y del gas. Se concluye que las herramientas del software Matlab permitieron desarrollar el modelado, la simulación y control del separador trifásico de crudo, y a su vez permitieron crear una aplicación de interacción con el usuario. Se recomienda simular el proceso desde las condiciones del estado estacionario para analizar los cambios que pudieren efectuarse en las variables de estudio como fueron el nivel y la presión.

**Palabras clave:** <APP DESIGNER>, <INGENIERÍA DE PETRÓLEOS>, <MATLAB(SOFTWARE)>, <MODELO MATEMÁTICO>, <PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)>, <SEPARADOR TRIFÁSICO DE PETRÓLEO (TPS)>, <SIMULACIÓN>, <SIMULINK(SOFTWARE)>.



1749-DBRA-UTP-2021



## SUMMARY

The aim of this work was to develop the modeling, simulation, and control of a Three-Phase Separator (TPS) for oil, as a didactic tool for Petroleum Engineering. First, the parameters that govern the process were determined, such as equipment structural data, operating conditions, water properties, oil, gas, and input flows. Once the necessary parameters are established, the mathematical model based on differential equations is carried out. To conduct the simulation, Matlab software was used, where a functional programming was applied. To control the system, it was necessary to use Simulink applying Matlab Function block which facilitated the process of importing the model developed in Matlab, this tool facilitated the control of fluids level and gas pressure by using controllers such as Proportional-Integral-Derivative (PID) and Proportional. With the App Designer tool, the TPS application was created which allows the user to interact with the equipment simulation. The application is installed on the computer with simple steps detailed in a user manual. The oil and gas input flows are established by flash calculations which are validated using Wilson thermodynamic package of Dwsim process simulator. Seven graphs were obtained where fluids level; Control valves opening of gas pressure, water, oil, and gas; As well as volumes of the equipment chambers and the flow rates of the liquids and gas are shown. It is concluded that the Matlab software tools allowed to develop the modeling, simulation, and control of the three-phase separator of oil and, at the same time allowed to create an application for interaction with the user. It is recommended to simulate the process from the steady-state conditions to analyze the changes that could be made in the study variables such as level and pressure.

**Keywords:** <APP DESIGNER>, <PETROLEUM ENGINEERING>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <MATHEMATICAL MODEL>, <PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)>, <THREE-PHASE SEPARATOR FOR OIL (TPS)>, <SIMULATION>, <SIMULINK (SOFTWARE)>.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

El crudo es el resultado de restos de plantas y animales prehistóricos enterrados en el barro primigenio de océanos, lagos y pantanos, a lo largo de miles de años, capas de barro y desechos orgánicos han sido sometidos a elevadas presiones y temperaturas, formando el petróleo (Agencia Internacional para Investigación del Cáncer, 1988, p.120).

En el país antes que se realice el transporte del crudo hasta los diferentes centros de refinación o exportación, el fluido extraído de los yacimientos que está compuesto de petróleo, agua y gas, es trasladado hasta la estación de facilidades de producción, lugar donde es tratado, al igual que otros flujos que provienen de los diferentes pozos de producción. Primero, cada pozo productor posee líneas de flujo, las cuales se conectan a la estación por un manifold o batería de distribución, desde donde el fluido es enviado a los separadores de producción, y como su nombre lo indica separará agua y gas del petróleo, con el objetivo de obtener una corriente de crudo libre de los mencionados componentes (Poveda et al., 2013, p.78).

De acuerdo con el análisis de Gil et al., (2015, p.2), con el nacimiento y desarrollo de la información digital se determinó la evolución en áreas diversas del conocimiento humano. Una de las áreas más fascinantes que formó parte de este desarrollo es la Ingeniería Química, en especial en la simulación de procesos. En el año de 1950 se efectúan los primeros intentos de un modelado matemático, el primero en aparecer fue el lenguaje Fortran (FORmula TRANslating), años más adelante, en 1970 el primer simulador de procesos denominado Flowtran, marcaría el comienzo de un arduo trabajo de investigación.

A finales de la década de 1970 aparece una simple calculadora matricial escrita en Fortran, se trata del software MATLAB, el mismo que en sus inicios no era un lenguaje de programación, esta calculadora fue construida sobre una docena de subrutinas de las bibliotecas de software de matriz EISPCK Y LINPACK. Más tarde, ya en 1984 aparece el lenguaje de programación cuando Matlab se convierte en un producto comercial, de esa manera se siguen incorporando nuevas herramientas de importancia al programa, en 1987, aparece el soporte integrado para la solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias (Moler y Little, 2020, p.1).

El comportamiento de los procesos químicos estacionarios puede ser modelados mediante la utilización de diversos softwares dependiendo del análisis que se requiera. En la actualidad los programas informáticos que son empleados en la simulación tienen amplia cobertura en el estudio de comportamientos dinámicos, así como en los sistemas de control y su respuesta a las perturbaciones existentes, además hoy en día se dispone de softwares para realizar: el análisis de

propiedades, optimización de procesos, dimensionamiento de equipos y una variedad de investigaciones acorde a los requerimientos (Gil et al., 2015, p.2).

De esta manera, el mundo de la tecnología ha sido una pieza clave en las diferentes áreas del aprendizaje, en casi todos los procesos que se llevan a cabo en el diario vivir se encuentra la Ingeniería Química y un campo muy interesante es el petrolífero.

## **1.2. Planteamiento del problema**

El petróleo también denominado oro negro o crudo a través de los años se ha constituido uno de los hilos de la economía y la política mundial, con aplicaciones energéticas pero con un papel fundamental en los ingresos económicos de países petroleros (Pinedo, 2005, p.38).

El fluido que se extrae de los pozos de petróleo está compuesto de agua, crudo y gas, cada uno de estos componentes reciben el nombre de fases.

Estas fases que están integrando al producto extraído del subsuelo hacen que se obtenga un crudo sin especificaciones de venta y calidad, al ingresar el petróleo al proceso de refinación el gas contenido presenta contaminantes los mismos que envenenan a los catalizadores utilizados en el procesamiento de crudo. Al contener gran cantidad de agua se presentan algunos inconvenientes, entre ellos: los equipos empleados en el refinamiento y transporte pueden verse afectados por el fenómeno de corrosión y causar debido a la presencia de sales, otro inconveniente que es la disminución del precio del petróleo, además de la disminución en la eficiencia de los procesos de transferencia de calor y la generación de daños internos en columnas de destilación, debido a que se produce una vaporización violenta (Delgado et al., 2013, p.59).

Estas problemáticas mencionadas serán factores claves en la comercialización y refinado del crudo ya que definen la optimización de recursos.

En los últimos años la utilización de programas que faciliten la comprensión de procesos industriales ha ganado campo en la ingeniería, sin embargo, esta tecnología en la mayoría de los casos es de tipo comercial y no puede ser utilizado a menos de que se obtenga una licencia del desarrollador.

Además, no se fomenta el uso de softwares que faciliten la comprensión de procesos que se llevan a cabo en la práctica, la implementación de estos programas en las instituciones es muy escaso.

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

El producto extraído del subsuelo necesita ser separado en petróleo, agua y gas por lo que es importante el uso de un equipo que facilite este proceso, un separador trifásico permite obtener un crudo con especificaciones de venta ya que los campos petrolíferos envían un gran volumen para ser refinado mientras que el restante es destinado a la exportación. Al disminuir el porcentaje de gas y agua se mejora la calidad del crudo y favorece a que los equipos que permiten su transporte, almacenamiento y procesamiento no se deterioren.

La tecnología ha permitido que exista una variedad de programas que contribuyen a la simulación de procesos y funcionamiento de equipos. En los últimos meses la educación virtual ha ganado una posición importante en la vida cotidiana. Existe una variedad de softwares que permiten reproducir de forma virtual los procesos. Es así como la educación se debe apoyar en herramientas más didácticas donde se estudie y analice las variables que han de intervenir en los diferentes sistemas de estudio.

Por tal motivo se desarrollará en primera instancia un modelado matemático, el mismo que permita obtener las ecuaciones y parámetros que rigen el sistema, posteriormente la simulación del separador trifásico de petróleo, donde se efectúe un correcto sistema de control, para finalmente crear una interfaz gráfica de usuario, la cual permita al estudiante utilizar una aplicación donde podrá interactuar con las variables y observar los cambios que se efectúen.

Es así como el presente trabajo de titulación servirá de análisis o guía para la ejecución de trabajos desarrollados por estudiantes de la carrera de Ingeniería Química o de otras carreras que así lo crean útil y necesario.

## **1.4. Objetivos**

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

Desarrollar el modelado, simulación y control de un separador trifásico de petróleo como herramienta didáctica para Ingeniería de Petróleos.

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

- Modelar matemáticamente el proceso de separación tomando en consideración las diferentes variables y parámetros que rigen el proceso.
- Programar el sistema de control del separador trifásico mediante software para su utilización como herramienta didáctica en la Ingeniería de petróleo.
- Elaborar un manual que se utilice como guía de usuario para aplicarlo en la validación técnica del sistema.

## **1.5. Alcance**

El trabajo de titulación al ser una propuesta tecnológica utiliza herramientas basadas en el avance de la tecnología, las mismas que permiten desarrollar el modelado, simulación y control del sistema. El modelado del sistema se lo obtiene una vez que se programa las ecuaciones en el software Matlab, para el control del sistema se utiliza la herramienta Simulink, y para la compilación y diseño de la interfaz gráfica de usuario, App Designer, la misma que permite obtener una aplicación ejecutable en el ordenador. Para la validación de datos utilizados en la simulación se manejó el software Dwsim.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Estado del Arte

En todo el mundo el petróleo se ha constituido como una fuente primaria de energía, de manera indirecta una gran cantidad de productos que no son combustibles derivan del crudo, además más del 30% de la energía que consume la población proviene de este importante recurso natural. Debido a su compleja composición, el petróleo requiere atravesar numerosos procesos para su transformación por ello su inversión también será elevada para obtener combustibles de consumo directo a partir de una mezcla de hidrocarburos de origen fósil (Delgado et al.,2013,p. 58).

Una vez que el crudo es extraído de los pozos su procesamiento implica su separación de otros compuestos presentes, es decir, agua y gas. Al tener estos tres componentes como corrientes separadas facilita la ejecución de cualquier tratamiento técnico, esto porque procesar fluidos monofásicos es menos desafiante que hacerlo con fluidos constituidos por varias fases (Manning y Thompson, 1991; citados en Al-Mhanna, 2018, p.1).

Aunque el mecanismo de separación del equipo al parecer es un proceso simple, la realidad es que la complejidad de su diseño surge debido a la gran cantidad de parámetros que afectan el rendimiento del separador, entre algunos se menciona: la longitud, el tiempo de residencia, el diámetro del equipo, sus partes internas como la posición y altura del deflector (walas, 1998; Smith, 2005; citados en Mostafaiyan et al., 2014, p.28).

Generalmente los separadores tienen que manejar corrientes de varios pozos de producción, por tal motivo Simmons et al, mencionan que:

*Se requiere que estos equipos sean muy flexibles para operar las variaciones de la tasa de flujo y la composición de la mezcla, un problema inherente es que los patrones de flujo intermitente, como el flujo slug que ingresan al recipiente pueden crear dificultades de control de la interfaz debido a las grandes variaciones del nivel de líquido, con el tiempo y la sedimentación de los sólidos significa que los recipientes pueden bloquearse. (Simmons et al, 2002, p.471)*

La simulación de un proceso químico se ha de ejecutar una vez se cuente con un modelo matemático, dicho modelo involucra ecuaciones algebraicas diferenciales lineales y no lineales, balances de masa y energía (Gil et al.,2015; citado en Al-Mhanna, 2018, p.3). Los estudios llevados a cabo en los últimos años tienen un enfoque en la simulación del separador trifásico de crudo aplicando el método de la dinámica computacional de fluidos, la misma que se ha constituido en una herramienta alternativa en la comunidad industrial debido al desarrollo de modelos físicos y

numéricos más robustos y al gran avance en términos de recursos informáticos (Kharoua et al., 2013, p.102).

Es así que Feng et al., (2007; citado en Liang et al., 2013, p.1) analizó como influyen los diferentes factores en la eficiencia de la separación y considera que ellos son: el diámetro de las partículas del gas, la viscosidad del líquido, el contenido del gas y finalmente el rendimiento.

Otro estudio realizado por Du (2005,pp.54-55; citado en Liang et al., 2013, p.1) incrementó la precisión en la medida de petróleo y gas asociado, mediante una nueva tecnología de medición, en donde se incluye la aplicación combinada de un medidor de flujo másico, un medidor de flujo de gas y un microordenador.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Separación de Petróleo**

#### *2.2.1.1. Separador Trifásico de crudo*

Se hace referencia a un equipo que separa los fluidos del pozo en gas y dos tipos de líquidos: petróleo y agua. La forma de estos separadores puede ser: esféricos, verticales u horizontales. Este tipo de separador se denomina separador de agua libre porque su uso principal es retirar dicha agua que podría causar problemas como corrosión y formación de hidratos o emulsiones compactas que son difíciles de descomponer. A un separador de agua libre se le denomina separador trifásico, porque puede separar gas, petróleo y agua libre (Schlumberger, 2020).

El separador trifásico y el FWKO (“free-water knockout”) son dos términos usados para describir recipientes de presión cuyo diseño es de utilidad para separar y remover el agua libre contenida en el petróleo y cuyo principio es la separación por efecto de asentamiento por gravedad, en donde el agua queda en el fondo del equipo y el crudo en la parte superior, el gas se separa en la entrada del equipo por evaporación, de esta manera el término “separador trifásico” se emplea cuando existe una gran cantidad de gas a separar, en tanto que el término “FWKO”, se utiliza cuando el gas a separar se encuentra en pequeñas cantidades en relación a la cantidad de agua y petróleo (Reyes y Gaviria, 2019, p.60).

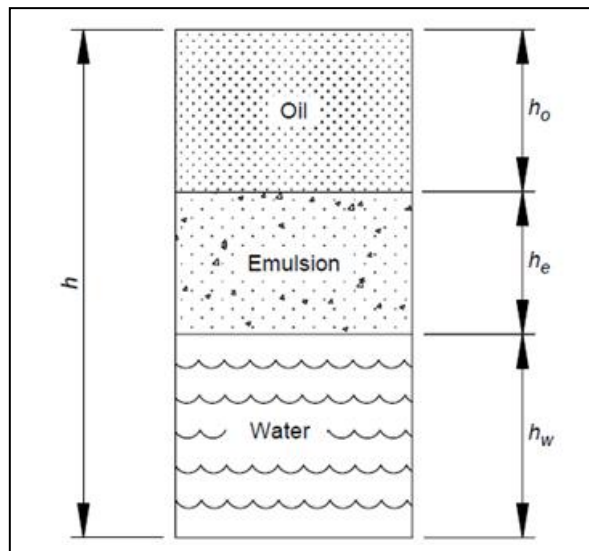


### 2.2.1.2. Proceso de separación

Uno de los procesos más complejos es la separación de mezclas, ya que están formadas por flujos multifásicos, y estos a su vez por múltiples componentes, también se debe a la diferencia de densidades, presiones de vapor, y otras características (Proaño,2015, p.8).

La mezcla ingresa al separador y, si existe, choca contra un aditamento interno, lo que permite que cambie el momentum de la mezcla, provocando una separación de las fases, luego en la sección de decantación actúa la fuerza de la gravedad (Requena y Rodríguez, 2006, p.32). Esto se produce por la diferencia de densidades entre las fases individuales. Evidentemente la separación de la fase de gas es relativamente sencilla, esto se debe a las grandes diferencias de densidad, pero existe una problemática atenuante que es la presencia de gotas del líquido en el gas (York et al., 2001; citado en Jaworski y Meng, 2009, p.48).

Además, los sólidos que puedan estar contenidos en el fluido no presentan inconvenientes, siempre y cuando los sistemas de eliminación de sólidos no se averíen. Por tal motivo otra dificultad es una separación eficiente del agua y el aceite, esto porque su relación de densidad relativa es cercana a uno (Jaworski y Meng, 2009, p.48).



**Figura 1-2:** Separación de Fases

**Fuente:** Arnold y Stewart, 2008a, p.245.

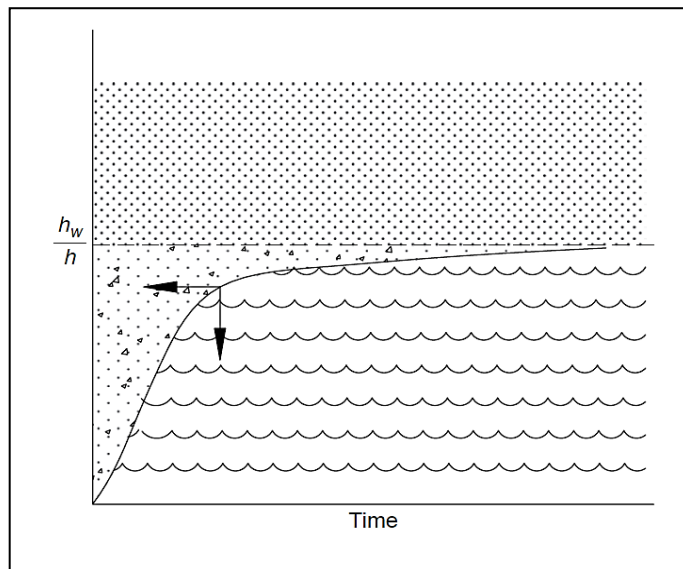
Donde:

- $h_o$  Nivel de crudo en la zona secundaria
- $h_e$  Nivel de emulsión en la zona secundaria
- $h_w$  Nivel de agua en la zona secundaria
- $h$  Nivel del fluido en la zona secundaria

En la figura 1-2, se puede visualizar los niveles de agua, emulsión y crudo desde el fondo de la cámara de separación o zona secundaria.

Después de un período de tiempo, el cambio en la altura del agua será insignificante, el agua que se obtiene por sedimentación se denomina “agua libre” (Arnold y Stewart, 2008a, p.245). Esto se puede observar en la figura 2-2.

El crudo queda por encima de la capa de agua que se forma y por efecto cascada se empieza a llenar la zona final, también denominada vertedero o colector.



**Figura 2-2:** Crecimiento del agua vs tiempo

Fuente: Arnold y Stewart, 2008a, p.245.

### 2.2.1.3. Principios de Separación

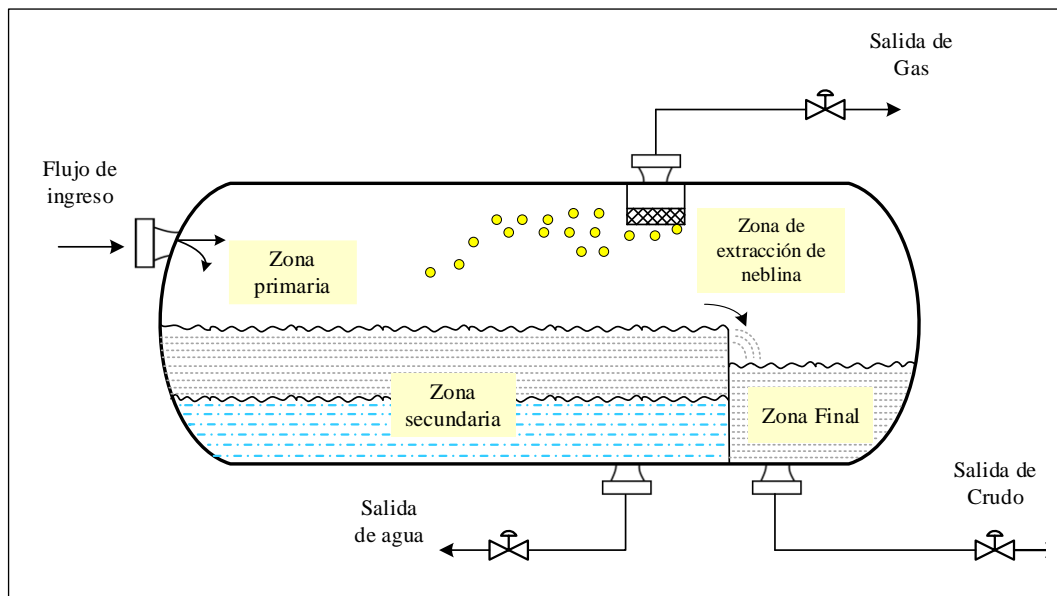
Los principios que se llevan a cabo en el proceso de separación son: el momentum o cantidad de movimiento, la fuerza de la gravedad y la coalescencia. La separación emplea uno o más de estos principios, y se lleva a cabo siempre y cuando las fases sean inmiscibles y de diferentes densidades.

- **Momentum o Cantidad de Movimiento:** Los fluidos cuyas densidades son distintas tienen momentum diferente. Si una corriente que posee dos fases cambia bruscamente de dirección, la gran velocidad o el fuerte momentum adquirido por las fases, no permiten que las partículas de la fase pesada se muevan tan rápido como las partículas de la liviana, es así que se lleva a cabo la separación (Chávez, 2015, p.20).
- **Fuerza de la Gravedad:** Aquellas moléculas que no fueron separadas por el cambio de momentum quedan suspendidas en la zona secundaria, permaneciendo expuestas a la fuerza de arrastre del líquido y a la fuerza de la gravedad. Una vez que las partículas se equilibran y

que la fuerza de la gravedad es mayor que la del arrastre del fluido la partícula empieza almacenarse en el fondo del separador (Chávez, 2015, p.20).

- **Coalescencia:** Este principio permite que las gotas pequeñas de líquido que no han sido separadas en las zonas o secciones anteriores se unan para formar gotas más grandes, superar las tensiones superficiales individuales y que se puedan separarse por gravedad (Viñan,2013, p.2). Por lo general este principio se aplica en la zona de extracción de neblina.

#### 2.2.1.4. Zonas de Separación



**Figura 3-2:** Zonas o secciones de un separador trifásico de crudo

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

**Zona primaria:** En esta sección existe un cambio en la dirección del flujo, el cambio de dirección puede efectuarse de dos maneras: el primero con una entrada tangencial de los fluidos al equipo o instalando de manera adecuada una placa desviadora a la entrada, los cambios abruptos en la dirección del flujo y en la velocidad hacen que las gotas más grandes de líquido incidan en el desviador y caigan por acción de la gravedad (Acharya y Casimiro, 2020, p.262; Arnold y Stewart, 2008b, p.154). Cualquiera de las dos opciones que se aplique, da como resultado la separación inicial de gas y líquido (Arnold y Stewart, 2008b, p.154).

**Zona secundaria:** En esta zona, ubicada en el fondo del equipo, la fase líquida y de gas fluyen con bajas densidades y turbulencias, debido a esto se efectúa la separación por gravedad de las finas gotas de la fase gaseosa, siempre y cuando el tiempo de retención sea adecuado, pero éste se ve afectado por la densidad de los fluidos y la capacidad del separador. Además en esta sección se lleva a cabo la recolección de líquido donde las burbujas del gas arrastradas y otras gotas de

líquido se juntan a sus fases gracias a la gravedad y flotabilidad (Acharya y Casimiro, 2020, p.262; Arnold y Stewart, 2008b, p.154).

**Zona de extracción de neblina:** Las pequeñas gotas de líquido que no pudieron eliminarse en las zonas primaria y secundaria se separan de la fase gaseosa, se usa el efecto de fuerza centrífuga y/o choque como mecanismos de separación (Benítez y Olmedo, 2011, p.13). Es así que en ésta sección puede incorporarse, paletas, placas coalescentes y una almohadilla de malla de alambre, las mismas que facilitarán el choque de las finas gotas, permitiendo que puedan agruparse para formar grandes gotas y separarse de la fase de gas por acción de la gravedad (Acharya y Casimiro, 2020, p.262).

**Zona Final:** También denominada sección vertedero de crudo, el equipo tiene dicha área para almacenar el líquido resultante de la zona primaria, secundaria y terciaria, el petróleo rebosa y la sección del vertedero empieza a llenarse, el incremento de nivel en ésta área es lineal y depende del crecimiento de nivel en el área de separación y también del flujo de entrada (Viñan, 2013, pp.10-95).

#### 2.2.1.5. Composición del Crudo

El crudo constituye una mezcla no homogénea de hidrocarburos, pero también contiene cantidades variables de azufre, oxígeno, nitrógeno, compuestos minerales y gases. El petróleo se halla en la mayoría de los países, en condiciones geológicas y a profundidades diferentes, pero su composición oscila en límites específicos (Pinos, 2008, p.27).

Los componentes primordiales del petróleo son los hidrocarburos, que corresponden a compuestos químicos que contienen carbono e hidrógeno, estos representan entre el 50 y 98% en relación a la totalidad de su composición (Clark y Brown, 1977; citados en Botello et al., 2005, p.264).

En la siguiente tabla se puede observar los elementos básicos presentes en el petróleo:

**Tabla 1-2:** Elementos presentes en el crudo

Elemento	Porcentaje
Carbono	83-89
Hidrógeno	11-15
Azufre	0.1-6.0
Nitrógeno	0.1-1.5
Oxígeno	0.3-1.2

Fuente: Pinos, 2008, p.27.

La composición del petróleo caracteriza una propiedad física que es la densidad, mientras más liviano es el crudo, menor cantidad de carbono y mayor el de hidrógeno (Pinos, 2008, p.27).

## 2.2.2. Software MATLAB

### 2.2.2.1. Generalidades de Matlab

MATLAB proviene de Matrix Laboratory, en español Laboratorio de matrices, recibe este nombre ya que en sus inicios fue creado para el desarrollo de software matricial (Ataurima, 2013, p.7).

El software permite la resolución de problemas y el desarrollo de ilustraciones gráficas ya que posee numerosas herramientas integradas, el usuario ingresa una expresión y el programa responde inmediatamente arrojando un resultando, también se puede escribir programas y scripts, siendo estos grupos de comandos que de manera secuencial podrán ejecutarse (Attaway, 2019, p.3).

De acuerdo a las publicaciones de MathWorks, (2021b), el lenguaje del programa se basa en matrices, siendo la forma de expresión de las matemáticas computacionales, su amplia biblioteca de herramientas (Toolboxes) integradas le permite trabajar con algoritmos. Además, las gráficas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos.

El programa tiene versiones tanto para ediciones profesionales como para estudiantiles, es así que MathWorks anualmente lanza dos versiones del software, y se denota por el año y por las letras “a” o “b” (Attaway, 2019, p.4).

Algunas de la gran variedad de características que posee el simulador se visualizan en la tabla siguiente:

**Tabla 2-2:** Características del software Matlab

Característica	Descripción
Lenguaje	Gracias a su lenguaje de elevado nivel se puede efectuar cálculos de ingeniería y científicos.
Herramientas	Permite obtener gráficas que ayudan a la visualización de datos y crear diagramas personalizados.
Bibliotecas	Posee bibliotecas complementarias que posee una amplia variedad de aplicaciones ingenieriles y científicas.
Entorno de escritorio	Su entorno de escritorio mejorado facilita efectuar una exploración iterativa.

Interfaz	Cuenta con herramientas para crear aplicaciones de interfaz de usuario personalizadas.
	Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft® Excel®.
	Opciones para compartir programas de MATLAB con los usuarios finales con implementación libres de derechos.

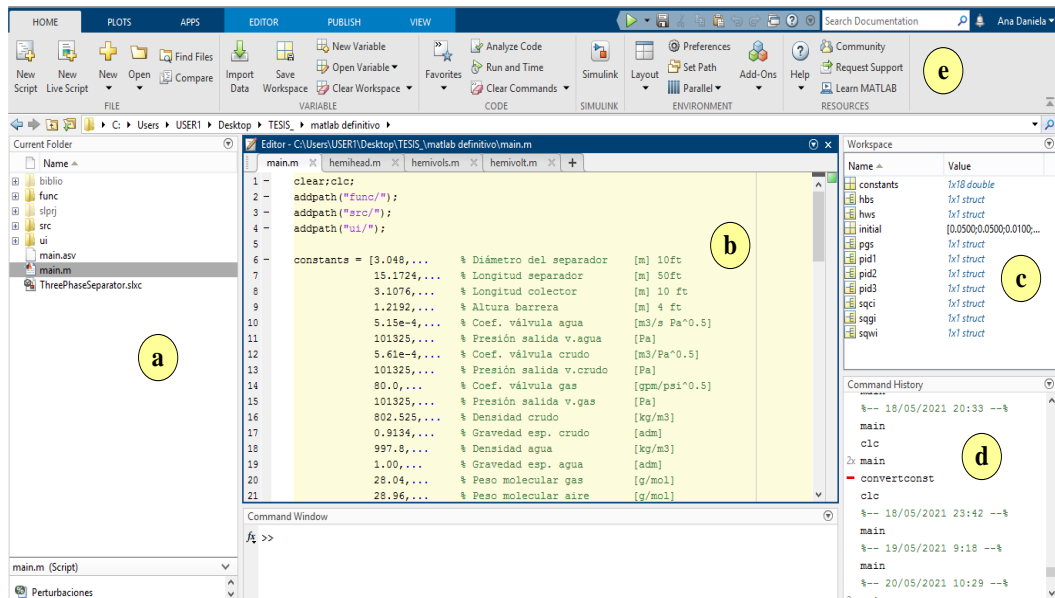
Fuente: MathWorks, 2021b.

Este paquete de software matemático y gráfico incluye un entorno de desarrollo integrado, es decir que consolida todas las herramientas básicas utilizadas por el programa, además posee varios tipos de programación (Attaway, 2019, p.4).

En el presente trabajo se aplicará una programación funcional y un tipo de dato avanzado denominado estructuras.

- **Programación Funcional:** Este tipo de programación resuelve todo basado en funciones, incluso se puede tener funciones anidadas, es decir una función dentro de otra función, además es procedural porque sigue una secuencia, el intérprete de Matlab lo ejecuta de arriba hacia abajo, un paso a la vez.
- **Estructuras:** Debido a que en Matlab se utiliza un lenguaje dinámico, en estas estructuras se puede agregar las propiedades que se consideren necesarias, pero esto también presenta una desventaja ya que deben expresarse exactamente como hayan sido agregadas, de lo contrario presentan un error.

En la figura 4-2 se muestra el escritorio de Matlab, cada sección tiene sus características y funcionalidades dentro del programa.



**Figura 4-2:** Pantalla del escritorio del software Matlab

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

- a) **Current Folder:** Este espacio facilita acceder a los archivos guardados en el ordenador, es decir muestra las diferentes carpetas y subcarpetas, el programa por defecto inicia con la que se usa con más frecuencia, además al lado derecho, el editor muestra exactamente donde se encuentra ubicada la carpeta y los archivos contenidos en ella (Ataurima, 2013, pp.13-15).
- b) **Command Window:** En esta ventana se ingresarán las líneas de comando que serán utilizadas en el sistema (Ataurima, 2013, pp.13-15).
- c) **Workspace:** Este panel indica todo el conjunto de variables que se van creando y a su vez almacenando en una sesión de Matlab. Si se utilizan funciones, el código del software se ejecuta y se cargan workspace almacenados (Ataurima, 2013, pp.13-15).
- d) **Command History:** En la ventana de command history se visualiza un registro de sentencias (instrucciones) que se hayan ejecutado en una sesión de Matlab (Ataurima, 2013, pp.13-15).
- e) **Interaz Ribbon:** Se refiere al conjunto de pestañas que permiten ir configurando y cambiando opciones de acuerdo con las necesidades del usuario.

#### 2.2.2.2. Simulink

La herramienta Simulink dispone de amplias bibliotecas de bloques que pueden ser personalizadas, ofrece un editor gráfico y un conjunto de solvers que sirven para modelar y simular sistemas dinámicos. Su entorno se basa en diagramas de bloque multidominio. Al tener conexión Simulink con Matlab, se puede incorporar algoritmos a los modelos de Simulink, y luego exportar los resultados de la simulación a Matlab (Ataurima, 2013, p.123).

Esta herramienta permite la simulación de sistemas dinámicos, por lo que en la obra de Aaturima, se menciona:

*Los sistemas dinámicos pueden ser simulados utilizando Simulink. En la mayoría de los casos, estos implican procesos lineales y no lineales dependientes del tiempo, que pueden ser descritos utilizando ecuaciones diferenciales (tiempo continuo) o ecuaciones en diferencia (tiempo discreto).* (Aaturima, 2013, p.123)

Po ello al describir un sistema dinámico utilizando diagramas de bloques y luego se simula la reacción del sistema a una señal de entrada, básicamente se realiza la búsqueda de la solución de la ecuación diferencial en la que el sistema se fundamenta.

En la tabla 3-2 se describen las principales características de la herramienta.

**Tabla 3-2:** Características de Simulink

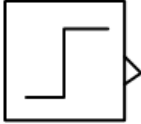
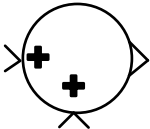
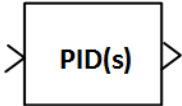

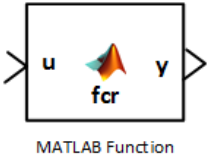
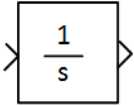


Característica	Descripción
Editor gráfico	El editor permite crear y gestionar los diagramas de bloques jerárquicos.
Motor de Simulación	El motor de simulación tiene solvers de ecuaciones diferenciales ordinarias de paso variables y paso fijo.
Bibliotecas	Para el modelo de sistemas discretos y continuos, dispone de una biblioteca de bloques.
Scope y data displays	Los resultados de la simulación pueden observarse mediante el uso de scope y display.
Herramientas	De gestión de proyectos y datos, que facilitan administrar los datos y archivos del modelo.
	De análisis de modelos, que permiten estudiar a los modelos para perfeccionar la estructura del diseño e incrementar la velocidad de simulación.
MATLAB Function	Ayuda a importar algoritmos de Matlab mediante modelos.
Legacy Code Tool	Para que a los modelos puede importarse código C y C++.

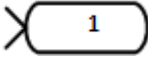
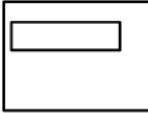
**Fuente:** Aaturima, 2013, p.123.



Algunos bloques de simulink son descritos en la siguiente tabla:

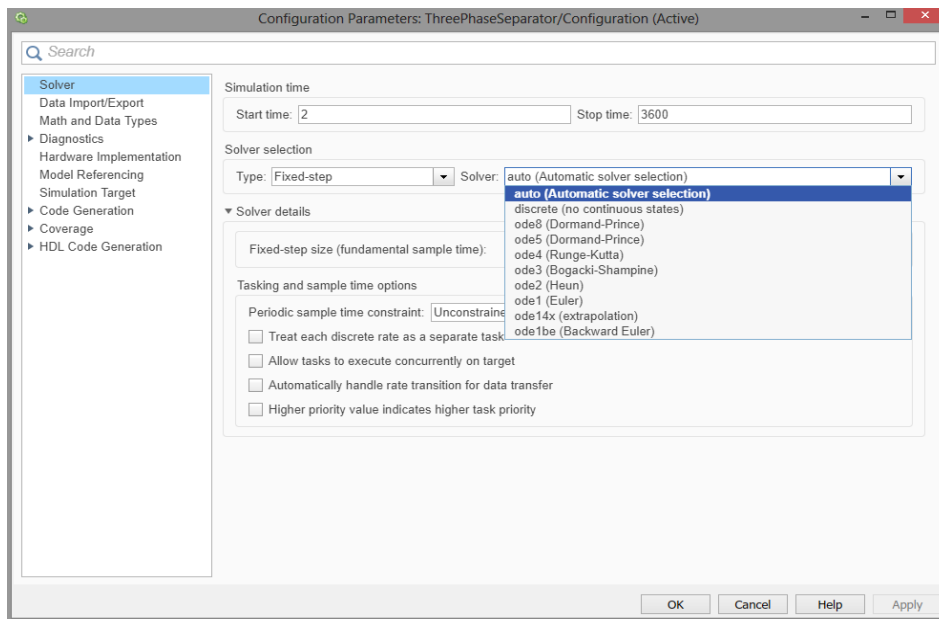
**Tabla 4-2:** Bloques utilizados en Simulink

Nombre del Bloque	Representación	Descripción
Step		Genera una función de paso. Su objetivo es expresar un valor como variable o como constante.
Add		Su finalidad es la de añadir o restar entradas.
PID Controller		El bloque de controlador PID ayuda a implementar un controlador PID (solo PID, PI, PD, P o solo I), permite controlar variables.
Scope		Muestra las señales generadas durante la simulación a través de gráficos.
MATLAB Function		Este bloque permite incluir código de Matlab mediante modelos en simulink
Integrator		El bloque integrador emite el valor de la integral de su señal de entrada con respecto al tiempo.
Mux		Su función es la de combinar señales de varias entradas con el mismo tipo de datos y emite una señal de salida.
Demux		Extrae la señal de una entrada y emite varias señales de salida por separadas.

Output		Crea un puerto de salida externa, es decir puede transportar los resultados hacia otra herramienta.
Display		Este bloque permite la visualización de valores.

Fuente: MathWorks, 2021a.

Los parámetros de la simulación son modificables en Simulink, es decir el usuario se dirige a la pestaña “Model Settings”, y por defecto en la pantalla inicial se observa la opción “Solver”, en donde se establece valores de: tiempo de la simulación y detalles del solver.



**Figura 5-2:** Parámetros para la simulación

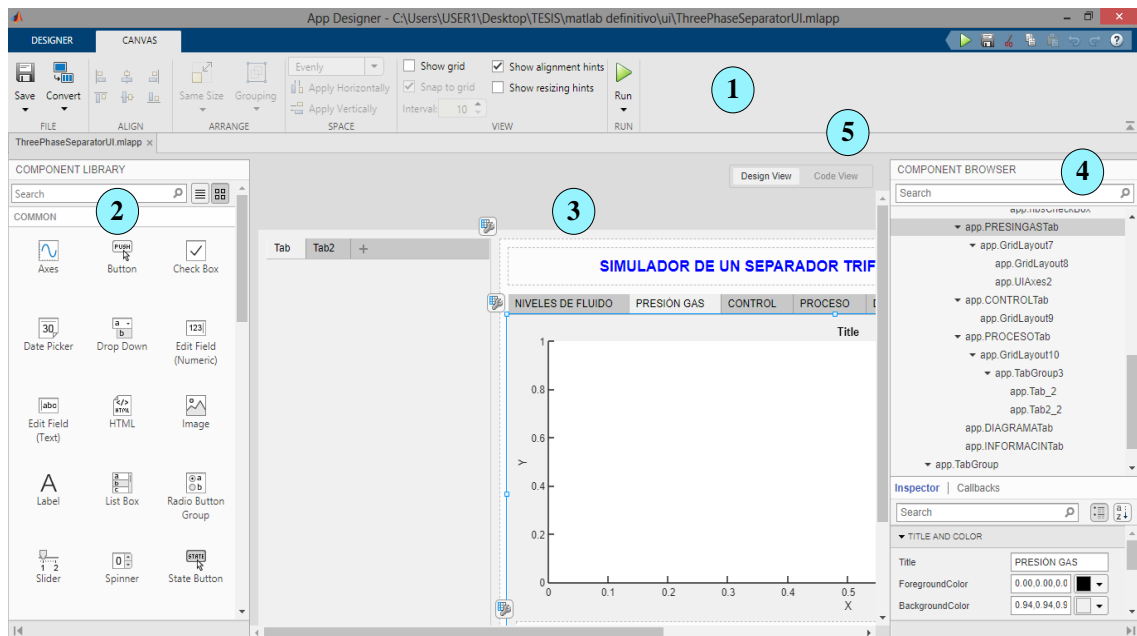
Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

En la figura 5-2 se observa que en el panel izquierdo llamado “Select” se despliega una variedad de parámetros que permiten ir modificando las opciones de acuerdo con los requerimientos de la simulación.

### 2.2.2.3. Interfaz Gráfica de Usuario

Matlab cuentan con herramientas que permiten realizar interfaces gráficas mediante entradas, se pueden insertar componentes como: botones, controles deslizantes, ventanas emergentes, menús,

entre otros. Las aplicaciones pueden crearse en Windows con una programación desde cero o utilizando el entorno de desarrollo de interfaz gráfica de usuario denominada GUIDE, el mismo que facilita diseñar la interfaz y Matlab genera automáticamente el código (Attaway, 2019, p.481). Desde la versión R2016a, se mejora el software y se crea App Designer, el mismo que permite realizar apps en la interfaz de usuario de Windows, de igual manera que GUIDE, App Designer también facilita al usuario diseñar gráficamente la aplicación y el código se genera de forma automática (Attaway,2019, p.481).



**Figura 6-2:** Entorno de trabajo de App Designer

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

En la figura 6-2 se observa el entorno de trabajo de la herramienta, se detalla a continuación:

1. **Barra de Herramientas:** En esta barra hay dos pestañas, la primera (designer) tiene varios botones para guardar, correr y compilar el ejecutable independiente de Matlab. Y la pestaña de canvas presenta opciones para guardar la aplicación, alinear los componentes seleccionados, entre otros.
2. **Component Library:** En esta sección hay una gran variedad de componentes que serán arrastrados hacia la plantilla, permite construir el diseño de la aplicación.
3. **Desing editor o plantilla:** Es el espacio donde se van a arrastrar botones, componentes o elementos para armar la aplicación.
4. **Component Browser:** Esta ventana contiene dos elementos principales:
  - a) **Árbol de ubicación:** Aquí aparecen los diferentes niveles de elementos que se van agregando al design editor, se observa que se forma una especie de árbol de ubicación que permite buscar los elementos cuando visualmente sea difícil encontrarlos.

- b) **Component Properties:** Esta ventana indica las propiedades de los objetos que se agregan a la plantilla, se puede modificar el tipo de letra, la alineación del texto, el tamaño de la fuente, entre varias propiedades que el usuario modifica.
5. **Pestaña Code View:** Facilita la visualización del código que se utiliza para crear la aplicación, existe una sección que contiene código que no es modificable por el usuario. Pero para agregar más funcionalidades se crea una sección privada donde el usuario si puede crear código modificable.

### 2.2.3. *Sistema de Control*

La finalidad del sistema de control de un proceso es mantener las diferentes variables en un valor determinado, estas variables pueden ser: flujos, presiones, temperaturas, entre otras. Los procesos tienden al cambio y se los denomina sistemas dinámicos, por ello las variables que rigen el sistema deben ser controladas, caso contrario puede existir peligros relacionados con: la seguridad, índices de producción y calidad del producto (Smith y Corripio, 1991, p.17).

La mayoría de las industrias existe una infinidad de equipos, los cuales a su vez tienen cientos de variables que deben mantenerse en un valor determinado, al presentarse perturbaciones sería ilógico tener una gran cantidad de operarios que realicen correcciones, por ello es indispensable que sea un control automático del proceso, es decir, que las variables sean controladas con la ayuda de instrumentos (Smith y Corripio, 1991, p.18).

En la tabla 5-2 se identifican los componentes básicos de un sistema de control y la funcionalidad que ha de cumplir cada uno.

**Tabla 5-2:** Componentes de un Sistema de Control

<b>Componentes de un Sistema de Control</b>	<b>Función</b>
Sensor	Mide la variable a ser controlada, está conectado físicamente al transmisor.
Transmisor	Capta la salida del sensor y la convierte en una señal muy intensa para transmitirla al controlador.
Controlador	Recibe la señal emitida por el transmisor y la compara con el set point (valor deseado), según el resultado de la comparación, decide que acción tomar para mantener al sistema en el valor deseado, acorde a la decisión envía otra señal al elemento final.

Elemento Final	En la mayoría el elemento final es una válvula, aunque no en todos los casos. Su función es la de actuar ante la señal emitida por el controlador.
----------------	--

Fuente: Smith y Corripio, 1991, p.19.

### 2.2.3.1. Válvulas de Control

Los elementos finales de un sistema son las válvulas de control, cuya funcionalidad es la de mantener en el set point (punto de ajuste) las variables que se deben controlar, es decir son reguladores de flujo. En la línea de proceso, la válvula actúa como una resistencia variable, a través del cambio de su apertura se modifica la resistencia al flujo y, en consecuencia, el flujo mismo (Smith y Corripio, 1991, p.180).

Si en un proceso se tiene interés para ver cómo responde el nivel, Smith y Corripio (1991, p.116), proponen la ecuación de la válvula, representada por la siguiente expresión.

$$q(t) = Cv(t) * Vp(t) \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{Sg}} \quad (1)$$

El diferencial de presión es igual a:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2)$$

Donde:

$q(t)$	Flujo volumétrico
$Cv(t)$	Coficiente de la válvula
$Vp(t)$	Apertura de la válvula
$\Delta P(t)$	Diferencial de presión
$Sg$	Gravedad específica del líquido que fluye a través de la válvula
$P_1$	Presión agua arriba (antes de la válvula)
$P_2$	Presión aguas abajo (después de la válvula)

- **Presión Hidrostática**

El principio de la presión hidrostática radica en la fuerza que un líquido ejerce, es decir, al encontrarse un fluido dentro de un recipiente, este ejerce presión en todas direcciones. La siguiente expresión se la utiliza para determinar la presión hidrostática:

$$P = \rho gh \quad (3)$$

Donde:

$P$	Presión hidrostática
$\rho$	Densidad del fluido
$g$	Constante de la gravedad ( $9.8 \text{ m/s}^2$ )
$h$	Nivel del fluido

#### 2.2.3.2. Controladores

“El objetivo de los controladores es tomar decisiones acerca de la manera en que se maneja la variable para mantenerla controlada en el punto de control” (Smith y Corripio, 1991, p.219).

- **Controlador Proporcional (P):** Este tipo de controlador es el más simple ya que necesitan de un único parámetro de ajuste ( $Kp$ ), pero presentan una desventaja que es la de operar con una desviación o también denominado “error de estado estacionario” en la variable que se controla (Smith y Corripio, 1991, p.180).
- **Controlador Proporcional Integral (PI):** El controlador proporcional integral aparece como una adición de inteligencia al controlador proporcional para eliminar su desviación, este nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste (Smith y Corripio, 1991, p.209).
- **Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID):** Al controlador proporcional integral se le añade otro modo de control denominado “acción derivativa”, conocida también como preactuación o rapidez de derivación y cuya finalidad es la de anticipar hacia dónde va el proceso (Smith y Corripio, 1991, p.212).

Es así como este controlador necesita del ajuste de tres parámetros:  $Kp, Ki, Kd$ , para conseguir un control adecuado.

## 2.3. Marco Legal

### 2.3.1. Normativa para el uso de tecnologías

**Tabla 6-2:** Legislación sobre la utilización del software

Normativa	Definición
Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación (2016) Del software de código cerrado y bases de datos	Artículo 132.- Adaptaciones necesarias para la utilización de software. “Sin perjuicio de los derechos morales del autor, el titular de los derechos sobre el software, o el propietario u otro usuario legítimo de un ejemplar del software, podrá realizar las adaptaciones necesarias para la utilización de este, de acuerdo con sus necesidades, siempre que ello no implique su utilización con fines comerciales” (Asamblea Nacional del Ecuador, 2016, p.29).
Constitución de la República del Ecuador Tecnología y Producción	Título II. Derechos. Sección Tercera: Comunicación e Información. Art. 16, numeral n°2. “Todas las personas tienen derecho al acceso universal a las tecnologías de información y comunicación” (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008, p.12). Titulo VI: Régimen de Desarrollo. Capítulo VI: Trabajo y Producción. Sección Cuarta: Democratización de los factores de producción. Art. 334, numeral n°3. “Impulsar y apoyar el desarrollo y la difusión de conocimientos y tecnologías orientados a los procesos de producción” (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008, p.138).

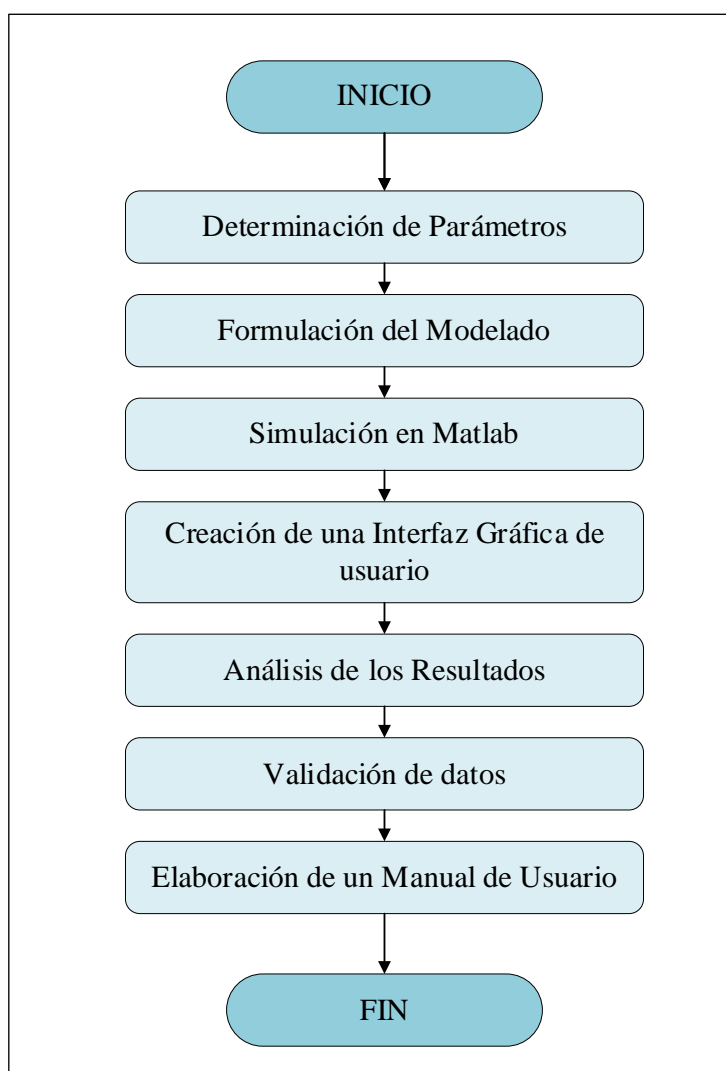
**Fuente:** Asamblea Nacional del Ecuador, 2008; 2016.

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

El presente tema de modelado, simulación y control de un separador trifásico de petróleo como herramienta didáctica para Ingeniería de petróleos, corresponde a una propuesta tecnológica, con el afán de contribuir al desarrollo del aprendizaje y el vínculo que debería existir entre los procesos reales y la teoría, a continuación, se detalla el método que se ha de efectuar para su desarrollo:



**Figura 1-3:** Metodología del trabajo

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.



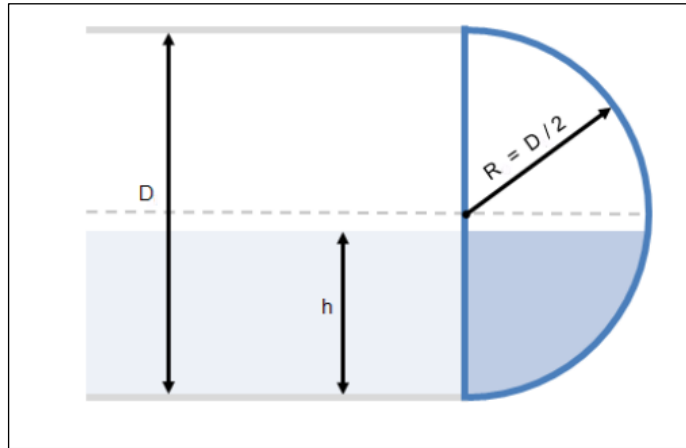
Como se muestra en la figura 1-3, las etapas a seguir para el desarrollo del trabajo se detallan a continuación:

- **Determinación de parámetros:** En este paso se considera el modelo del equipo, los parámetros estructurales, las condiciones a las cuales opera el separador, las propiedades de los fluidos, los datos de entrada y los parámetros para el sistema de control.
- **Formulación del modelado:** Primero se calcula el volumen total del separador, luego el volumen tanto de la cámara de separación y de la cámara de crudo o colector, además se plantea el modelo mediante ecuaciones diferenciales y las ecuaciones para el sistema de control.
- **Simulación en Matlab:** En esta sección se trabaja en la Simulación utilizando Matlab, en donde se consideran los parámetros y la formulación del modelo, las mismas que permitirán desarrollar el sistema de control utilizando Simulink.
- **Creación de una Interfaz Gráfica de usuario (App):** En la creación de la interfaz se utiliza App Designer, una herramienta que permite compilar la aplicación como independiente de Matlab.
- **Análisis de los resultados:** Una vez creada la aplicación, se pueden visualizar las gráficas de manera ordenada, las mismas que serán analizadas de acuerdo con los parámetros que se establezca para cada caso de estudio.
- **Validación de datos obtenidos en la Simulación:** Para la validación se utiliza el software Dwsim.
- **Elaboración de un Manual de Usuario:** En el manual, el usuario seguirá una secuencia de indicaciones que permitirán la instalación de la aplicación en su ordenador, a más de una explicación rápida del sistema.

### 3.1. Determinación de parámetros

#### 3.1.1. Selección del modelo del separador

La geometría del separador juega un rol importante en el modelado del equipo y posteriormente para la simulación del sistema, para el presente trabajo se consideró un separador horizontal con cabezas hemisféricas y una sección cilíndrica, para estas consideraciones geométricas existen fórmulas que permiten calcular el volumen de cada una de las secciones mencionadas, es decir, para determinar el volumen total se realiza la sumatoria de dichas zonas.



**Figura 2-3:** Separador con cabezas hemisféricas

Fuente: Neutrium, 2013.

### 3.1.2. Parámetros del proceso

#### 3.1.2.1. Parámetros estructurales

De acuerdo con el tipo de separador se puede definir los parámetros estructurales, los mismos que corresponden a un equipo de funcionamiento real perteneciente a una empresa privada ubicada en la Amazonía, dichos parámetros se especifican en la tabla 1-3.

Las unidades expresadas en la metodología serán expresadas tanto en el sistema internacional como en unidades de campo ya que con ambas se trabajará en la interfaz gráfica.

**Tabla 1-3:** Parámetros estructurales del separador.

Parámetro Estructural	Valor	Unidades SI	Valor	Unidades de Campo
Diámetro del separador	3.0480	<i>m</i>	10	<i>ft</i>
Longitud sección A	15.1724	<i>m</i>	50	<i>ft</i>
Longitud sección B	3.1076	<i>m</i>	10	<i>ft</i>
Altura de la barrera	1.2192	<i>m</i>	4	<i>ft</i>

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

### 3.1.2.2. Parámetros de entrada

**Tabla 2-3:** Parámetros de entrada al separador

Parámetro	Valor	Unidades SI	Valor	Unidades de Campo
Flujo de entrada de crudo	Los determina los cálculos flash, y dependen del Caso 1 o Caso 2.	$m^3/s$	Los determina los cálculos flash.	<i>BPD</i>
Flujo de entrada de agua	0.1374	$m^3/s$	74711	<i>BPD</i>
Flujo de entrada de gas	Los determina los cálculos flash, y dependen del Caso 1 o Caso 2.	$m^3/s$	Los determina los cálculos flash.	<i>MMSCFD</i>

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021

Mediante la composición del crudo es posible determinar las cantidades de L y V, es decir, las cantidades de flujo de entrada de crudo y flujo de entrada de gas. Esto gracias a los cálculos flash. El flujo de entrada de agua es un dato.

Los cálculos flash permiten determinar la cantidad de fluido hidrocarbonado que existe en la fase gaseosa o en la fase líquida.

En la industria petrolera los cálculos de equilibrio líquido-vapor con ecuaciones de estado son muy utilizados, además se los utiliza para simulaciones numéricas (Gammiero, 2013, p.101).

El procedimiento para determinar el flujo de entrada de crudo y gas al separador se detallan a continuación:

**a)** Lo primero es calcular la constante de equilibrio ( $k_i$ ) entre las fases líquido y gas,

$$k_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (4)$$

La constante de equilibrio indica la relación de la fracción molar del componente  $i$  en la fase gaseosa ( $y_i$ ), y la fracción molar del componente  $i$  en la fase líquida ( $x_i$ ) (Gammiero, 2013, p.103).

Según Fattah, (2012, p.141), hay varias maneras para estimar la constante de equilibrio. En este caso se la efectúa por medio de la Correlación de Wilson, se expresa a continuación:

$$k_i = \left(\frac{p_c}{p}\right) \exp \left[ 5.37(1 + w_c) \left(1 - \frac{t_c}{t}\right) \right] \quad (5)$$

Donde:

$p_c$	Presión crítica	$bar$
$p$	Presión del sistema	$bar$
$w_c$	Factor acéntrico	$adim$
$t_c$	Temperatura crítica	$K$
$t$	Temperatura del sistema	$K$

La composición de crudo fue tomada del libro *Surface Production Operations* de Arnold & Stewart, página 129. Los valores de  $p_c$ ,  $t_c$ , son tomados del Manual del Ingeniero Químico de Perry, sección 2, página 136. Mientras que los valores de  $w_c$  son tomados del simulador de procesos Dwsim.

b) Se realiza un balance total y un balance por componentes a partir de una alimentación (F)

### Balance de Masa

$$F = V + L \quad (6)$$

Donde:

$F$	Alimentación al equipo	$m^3/s$
$L$	Flujo de entrada de crudo	$m^3/s$
$V$	Flujo de entrada de gas	$m^3/s$

### Balance por Componentes

$$F z_i = L x_i + V y_i \quad (7)$$

Se reemplaza (4) en (7)

$$F z_i = L x_i + V(k_i * x_i) \quad (8)$$

$$F z_i = x_i(L + V k_i) \quad (9)$$

$$x_i = \frac{F_{zi}}{L + V k_i} \quad (10)$$

Se reemplaza (6) en (10)

$$x_i = \frac{F_{zi}}{F - V + V k_i} \quad (11)$$

$$x_i = \frac{F_{zi}}{F + V(k_i - 1)} \quad (12)$$

Donde:

$x_i$	Fracción molar del componente $i$ en la fase líquida	<i>adim</i>
$z_i$	Composición en fracción molar	<i>mol/s</i>
$k_i$	Constante de equilibrio del componente $i$ en las fases líquido-gas	<i>adim</i>

Simplificamos la ecuación al dividir los términos para  $F$

$$x_i = \frac{\frac{F_{zi}}{F}}{\frac{F}{F} + \frac{V}{F}(k_i - 1)} \quad (13)$$

$$x_i = \frac{z_i}{1 + \frac{V}{F}(k_i - 1)} \quad (14)$$

No se puede calcular directamente el valor de  $x_i$  porque no se conoce el valor de  $V/F$

$$\frac{V}{F} = a = \text{Volatilidad relativa} \quad (15)$$

c) Es así, que para calcular el valor de  $V/F$  se aplica:

$$\sum_{i=1}^r x_i = 1 \quad (16)$$

$$\sum_i y_i = \sum_i k_i x_i = 1 \quad (17)$$

De acuerdo con Skogestad (2008, p.65), una mejor opción es utilizar la combinación  $\sum_i(y_i - x_i) = 0$ , porque da como resultados una ecuación con buenas propiedades numéricas y es la llamada ecuación flash de Rachford & Rice, expresada a continuación:

$$\sum_{i=1}^r \frac{z_i (k_i - 1)}{1 + \frac{V}{F} (k_i - 1)} = 0 \quad (18)$$

Los valores deben satisfacer  $0 \leq \frac{V}{F} \geq 1$ ,  $r$  corresponde al número de componentes de la mezcla. Pero se debe considerar que se deben ir variando los valores de " $a$ ", hasta encontrar una raíz que cumpla con la condición de Rachford & Rice, según Gammiero (2013, p.104), el primer valor que tomará " $a$ " es igual a 0,5.

La raíz que se halle será el valor de " $a$ " donde la función sea igual a "**cero**", es decir donde se cumpla la condición de Rachford & Rice

**d)** Además, la ecuación a utilizarse debe estar simplificada para utilizarla en Matlab:

$$\sum_{i=1}^r \frac{\frac{z_i (k_i - 1)}{(k_i - 1)}}{\frac{1}{(k_i - 1)} + \frac{V (k_i - 1)}{F}} = 0 \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^r \frac{z_i}{\frac{1}{(k_i - 1)} + \frac{V}{F}} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{1}{(k_i - 1)} = Ki \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^r \frac{z_i}{Ki + a} = 0 \quad (22)$$

La ecuación (21) y (22) serán utilizadas en el modelado:

- e) Una vez hallado el valor de  $a = V/F$ , ya se puede calcular el valor de  $x_i$  e  $y_i$ , con la aplicación de las ecuaciones (14) y (4).
- f) Finalmente, es posible hallar el flujo de entrada de crudo y gas al separador, mediante las ecuaciones (15) y (6), expresadas de la siguiente manera:

$$V = a * F$$

$$L = F - V$$

El modelo de Rachford & Rice opera con moles, por tal motivo la alimentación ( $F$ ), el flujo de entrada de crudo ( $L$ ) y el flujo de entrada de gas ( $V$ ) están expresados en flujo molar y para convertir estos flujos en unidades del sistema internacional ( $m^3/s$ ), se utiliza el volumen molar de una mezcla, y para calcularlo se parte de la ecuación de estado cúbica de Peng Robinson. El procedimiento se detalla a continuación:

La siguiente expresión corresponde a la ecuación de estado cúbica de Peng Robinson

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (23)$$

$$A = \frac{a * P}{R^2 * T^2} \quad (24)$$

$$B = \frac{b * P}{R * T} \quad (25)$$

$$Z = \frac{P * V}{R * T} \quad (26)$$

Donde:

$Z$	Factor de compresibilidad	<i>adim</i>
$P$	Presión del sistema	<i>MPa</i>
$V$	Volumen molar	<i>cm<sup>3</sup>/mol</i>
$R$	Constante de los gases ideales	$8.314 \frac{J}{mol * K}$
$T$	Temperatura del sistema	<i>K</i>
$a$	Parámetro de atracción de Peng-Robinson	<i>adim</i>
$b$	Covolumen de Peng-Robinson	<i>adim</i>

1) Lo primero es calcular  $a$  y  $b$  de la ecuación de estado cúbica de Peng Robinson, y esto se determina a partir de la Regla de Mezcla, se expresa a continuación:

$$a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j a_{ij} \quad (27)$$

$$b = \sum_{i=1}^n X_i b_i \quad (28)$$

$$a_{ij} = (1 - k_{ij})(a_i a_j)^{1/2} \quad (29)$$

Donde:

$a$	Parámetro de atracción de Peng-Robinson para la mezcla	<i>adim</i>
$a_i$	Parámetro de atracción de Peng-Robinson del componente $i$	<i>adim</i>
$b$	Covolumen de Peng-Robinson para la mezcla	<i>adim</i>
$b_i$	Covolumen de Peng-Robinson del componente $i$	<i>adim</i>
$k_{ij}$	Parámetro de interacción binaria de Peng-Robinson	<i>adim</i>
$X_i = X_j$	Fracción molar del componente $i$ en la fase líquida	<i>adim</i>

➤ Pero a la vez para poder determinar  $a_i$ , (ecuación 29) y  $b_i$  (28) de las ecuaciones de la regla de mezclas se aplican las ecuaciones de estado de Peng-Robinson:

$$P = \frac{R * T}{V - b} - \frac{a(T)}{V(v + b) + b(V - b)} \quad (30)$$

$$a_i = a(T) = \alpha * a(T_c) \quad (31)$$

$$b_i = b = 0.07780 \frac{R * T_c}{P_c} \quad (32)$$

$$\alpha = \left( 1 + \kappa(1 - \sqrt{T/T_c})^2 \right) \quad (33)$$

$$a(T_c) = 0.45724 \frac{R^2 * T_c^2}{P_c} \quad (34)$$

$$\kappa = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (35)$$

Donde:

$P_c$	Presión crítica	<i>MPa</i>
-------	-----------------	------------



$T_c$	Temperatura crítica	$K$
$\omega$	Factor acéntrico	$adim$

2) Entonces se puede aplicar las ecuaciones de la regla de mezclas

$$a_{ij} = (1 - k_{ij})(a_i a_j)^{1/2}$$

➤ Para el cálculo del parámetro de interacción binaria de Peng-Robinson ( $k_{ij}$ ) se aplica la siguiente fórmula, tomada de Fateen et al, (2013, p.139), los parámetros ajustables  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , también son tomados del mencionado artículo.

$$k_{ij} = 1 - \frac{1}{2} \frac{b_j}{b_i} \sqrt{\frac{a_i}{a_j}} - \frac{1}{2} \frac{b_i}{b_j} \sqrt{\frac{a_j}{a_i}} + \frac{1}{2} \frac{b_j * R * T}{\sqrt{a_i a_j}} \frac{\theta_1}{T_{r1}^{\theta_2} * P_{r1}^{\theta_3}} \quad (36)$$

$b_i$  y  $b_j$  = Se determina a partir de la ecuación (32)

$a_i$  y  $a_j = a(T)$  = Se determina a partir de la ecuación (31)

Donde:

$P_r$	Presión Reducida	$MPa$
$T_r$	Temperatura reducida	$K$
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	Parámetros ajustables, si la mayoría de los componentes son alcanos	$adim$

➤ Una vez determinado  $k_{ij}$  se calcula:

$$a_{ij} = (1 - k_{ij})(a_i a_j)^{1/2}$$

➤ Y con ello se calcula  $a$

$$a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j a_{ij}$$

$X_i$  y  $X_j$  = Se determina a partir de la ecuación (14)

➤ Para la determinación de  $b$  se aplica la ecuación (32)

$$b = \sum_{i=1}^n X_i b_i$$

Una vez establecido a y b se puede determinar A y B de las ecuaciones (24) y (25), que corresponde a la ecuación de estado cúbica de Peng Robinson, ecuación (23)

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0$$

Se establecen los siguientes factores para encontrar raíces mediante el método *roots* de Matlab, el mismo que determina raíces de un polinomio de tercer orden.

$$m_1 = 1$$

$$m_2 = B - 1$$

$$m_3 = A - 3B^2 - 2B$$

$$m_4 = B^3 - B^2 + AB$$

El método *roots* arroja como resultado 3 raíces, la raíz de mayor valor corresponde al estado de vapor, mientras que la raíz de menor valor corresponde al estado líquido, la raíz de valor intermedio no tiene un significado físico por lo que no se la considera en los cálculos. Es decir, se determina  $z_1, z_2$  y  $z_3$ , las mismas que servirán para aplicar la ecuación (26) y hallar el volumen molar tanto del vapor como del líquido.

### 3.1.2.3. Condiciones de operación

**Tabla 3-3:** Condiciones de Operación del separador

Condición de operación	Valor	Unidades SI	Valor	Unidades de Campo
Temperatura	355.37	<i>K</i>	180	°F
Presión	413685	<i>Pa</i>	60	<i>Psi</i>

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

### 3.1.2.4. Parámetros para el sistema de control

Se definen los parámetros que intervienen en el sistema de control, es decir todos aquellos en donde se involucra a las tres válvulas del equipo.

**Tabla 4-3:** Parámetros que intervienen en el sistema de control del separador

Parámetro	Valor	Unidades SI	Valor	Unidades de Campo
Coefficiente válvula de agua (12 pulgadas)	5.15e-4	$m^3/s Pa^{0.5}$	564.67	$gpm/Psi^{0.5}$
Presión válvula de agua	101325	$Pa$	14.7	$Psi$
Coefficiente válvula de crudo (8 pulgadas)	7.15e-4	$m^3/s Pa^{0.5}$	614.90	$gpm/Psi^{0.5}$
Presión válvula de crudo	101325	$Pa$	14.7	$Psi$
Coefficiente válvula de gas (10 pulgadas)	7.293e-5	$m^3/s Pa^{0.5}$	80	$gpm/Psi^{0.5}$
Presión válvula de gas	101325	$Pa$	14.7	$Psi$

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

Como se puede observar en la figura 4-3, la presión que se considera para las tres válvulas del sistema es la presión ambiental, mientras que los coeficientes de las válvulas, en función de su tamaño son tomadas de un catálogo basado en Normativa ASME (EMERSON, 2018).

### 3.1.2.5. Propiedades de los fluidos

Varias de las propiedades de los fluidos que intervienen en el sistema son obtenidas a partir de cálculos y se visualizan en la siguiente tabla.

**Tabla 5-3:** Propiedades de los fluidos

Propiedad	Valor	Unidades SI	Valor	Unidades de Campo
Densidad del crudo	Los determina los cálculos flash, y dependen del Caso 1 o Caso 2	$kg/m^3$	Los determina los cálculos flash	$lb/ft^3$
Gravedad específica crudo		$adm$		$adm$
Densidad del agua	997.8	$kg/m^3$	62.29	$lb/ft^3$
Gravedad específica agua	1.00	$adm$	1.00	$adm$
Peso molecular de gas	28.04	$g/mol$	28.04	$g/mol$
Peso molecular de aire	28.96	$g/mol$	28.96	$g/mol$
Constante de gravedad	9.81	$m/s^2$	9.81	$m/s^2$

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

➤ **Densidad del crudo**

La densidad del líquido se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$rho_c = \frac{1}{V_l} (pml) \quad (37)$$

Donde:

$rho_c$	Densidad del crudo	$kg/m^3$
$V_l$	Volumen molar del crudo	$m^3/kmol$
$pml$	Peso molecular del crudo	$g/mol = kg/kmol$

➤ **Gravedad específica del crudo**

$$Sg_l = \frac{rhoc}{\rho_{agua,4^\circ C}} \quad (38)$$

Donde:

$Sg_l$	Gravedad específica del líquido (crudo)	<i>adim</i>
$rhoc$	Densidad del crudo	$kg/m^3$
$\rho_{agua,4^\circ C}$	Densidad de referencia (agua a 4°C)	$kg/m^3$

Las fórmulas siguientes también son consideradas para el modelado del cálculo flash, ver mayor detalle en el código de programación. Ver Anexo H.

➤ **Peso molecular del crudo**

$$pml = \sum PM_i * x_i \quad (39)$$

Donde:

$pml$	Peso molecular del crudo	$g/mol$
$PM_i$	Peso molecular de cada componente	$g/mol$
$x_i$	Fracción molar de cada componente en la fase líquida	<i>adim</i>

➤ **Densidad del Gas**

La densidad del gas se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$rhov = \frac{1}{V_v} (pmv) \quad (40)$$

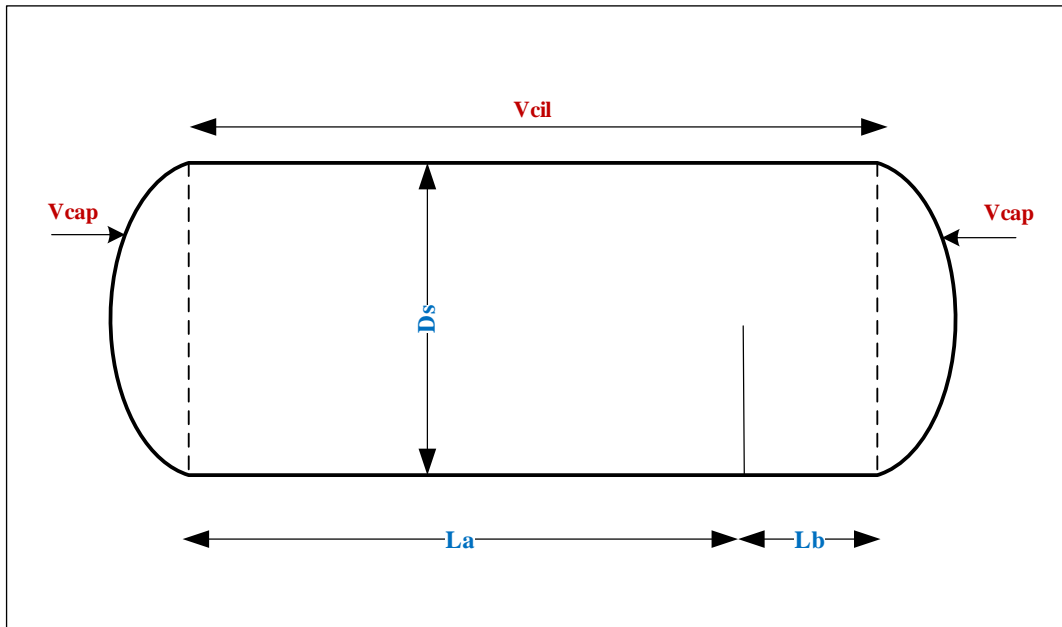
Donde:

$rhov$	Densidad del gas	$kg/m^3$
$V_v$	Volumen molar del gas	$m^3/kmol$
$pmv$	Peso molecular del gas	$g/mol$

### 3.2. Formulación del Modelo

#### 3.2.1. Cálculo del Volumen Total del Separador

Para el cálculo del volumen total del equipo se considera tanto la sección cilíndrica como las capas hemisféricas. La figura 3-3, representa las secciones.



**Figura 3-3:** Separador con especificaciones para el cálculo del volumen total

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$V_{cil}$	Volumen de la sección cilíndrica	$m^3$	$ft^3$
$V_{cap}$	Volumen de la sección hemisférica	$m^3$	$ft^3$
$L_a$	Longitud de la cámara de separación	$m$	$ft$
$L_b$	Longitud del colector	$m$	$ft$
$D_s$	Diámetro del separador	$m$	$ft$

$$V_T = V_{cil} + 2V_{cap} \quad (41)$$

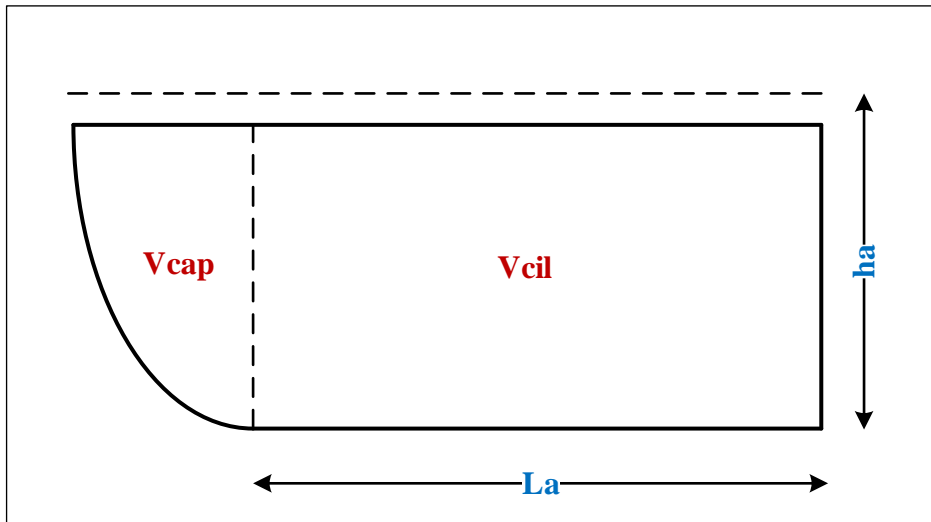
$$V_{cil} = \frac{\pi D_s^2}{4} (L_a + L_b) \quad (42)$$

$$V_{cap} = \frac{\pi D_s^3}{12} \quad (43)$$

$$V_T = \frac{\pi D_s^2}{4} (L_a + L_b) + \frac{\pi D_s^3}{6} \quad (44)$$

### 3.2.2. Cálculo del Volumen por Secciones del Separador

#### 3.2.2.1. Volumen de la Cámara de Separación



**Figura 4-3:** Cámara de separación con especificaciones para calcular volumen

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$h_a$  Nivel de fluido en la cámara de separación  $m$   $ft$

La siguiente ecuación representa al volumen total de la cámara de separación

$$V_T^a = V_{cil}^a + V_{cap}^a \quad (45)$$

Volumen de una sección cilíndrica en un recipiente horizontal

$$V_{cil}^a = L_a D_s^2 \left[ \frac{1}{4} \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_a}{D_s} \right) - \left( \frac{1}{2} - \frac{h_a}{D_s} \right) \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] \quad (46)$$

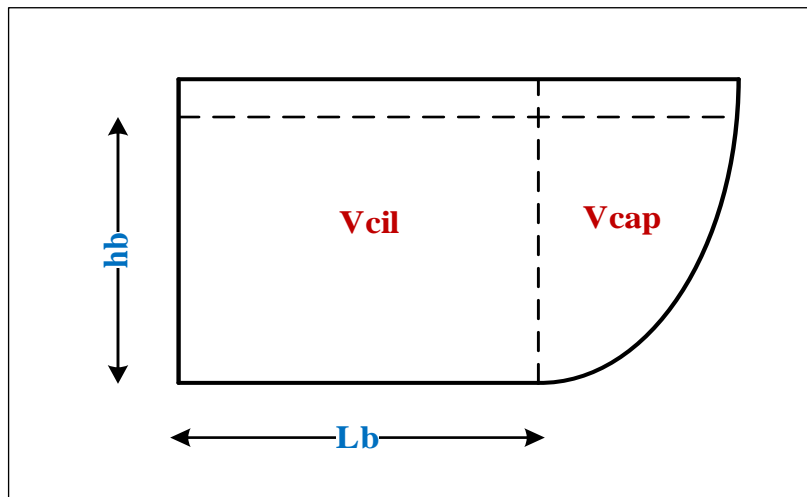
Volumen para una sección hemisférica en un recipiente horizontal

$$V_{cap}^a = D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 - 2 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^3 \right] \quad (47)$$

Volumen Total de la cámara de separación

$$V_T^a = L_a D_s^2 \left[ \frac{1}{4} \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_a}{D_s} \right) - \left( \frac{1}{2} - \frac{h_a}{D_s} \right) \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] + D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 - 2 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^3 \right] \quad (48)$$

### 3.2.2.2. Volumen del Colector de Crudo



**Figura 5-3:** Colector con especificaciones para el cálculo de volumen

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$h_b$  Nivel de crudo en el colector  $m$   $ft$

La siguiente ecuación representa al volumen total del colector de crudo

$$V_T^b = V_{cil}^b + V_{cap}^b \quad (49)$$

Volumen de una sección cilíndrica en un recipiente horizontal

$$V_{cil}^b = L_b D_s^2 \left[ \frac{1}{4} \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_b}{D_s} \right) - \left( \frac{1}{2} - \frac{h_b}{D_s} \right) \sqrt{\frac{h_b}{D_s} - \left( \frac{h_b}{D_s} \right)^2} \right] \quad (50)$$



Volumen para una sección hemisférica en un recipiente horizontal

$$V_{cap}^b = D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{h_b}{D_s} \right)^2 - 2 \left( \frac{h_b}{D_s} \right)^3 \right] \quad (51)$$

Volumen Total del Colector

$$V_T^b = L_b D_s^2 \left[ \frac{1}{4} \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_b}{D_s} \right) - \left( \frac{1}{2} - \frac{h_b}{D_s} \right) \sqrt{\frac{h_b}{D_s} - \left( \frac{h_b}{D_s} \right)^2} \right] + D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{h_b}{D_s} \right)^2 - 2 \left( \frac{h_b}{D_s} \right)^3 \right] \quad (52)$$

### 3.2.3. Términos

Tanto en la cámara de separación como en el colector de crudo se aplica el mismo procedimiento. En este caso se aplicará el procedimiento para la cámara de separación. Se parte de la ecuación (48).

$$V_T^a = L_a D_s^2 \left[ \frac{1}{4} \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_a}{D_s} \right) - \left( \frac{1}{2} - \frac{h_a}{D_s} \right) \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] + D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 - 2 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^3 \right]$$

El volumen (V) es una función de la altura (h), así se deriva V en función de h y se tiene:

$$\frac{dV_a}{dh_a} = \frac{dV_{a,cil}}{dh_a} + \frac{dV_{a,cap}}{dh_a} \quad (53)$$

$$\frac{dV_a}{dh_a} = W_1 + W_2 \quad (54)$$

En la ecuación (53) se observa que se derivará por secciones expresadas a continuación:

#### Sección cilíndrica

$$\frac{dV_{a,cil}}{dh_a} = L_a D_s^2 \left[ \frac{1}{4} \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_a}{D_s} \right) - \left( \frac{1}{2} - \frac{h_a}{D_s} \right) \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_{a,cil}}{dh_a} = & \frac{L_a D_s^2}{4} \frac{d}{dh_a} \left[ \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_a}{D_s} \right) \right] - \frac{L_a D_s^2}{2} \frac{d}{dh_a} \left[ \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] \\ & + L_a D_s \frac{d}{dh_a} \left[ h_a \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (56)$$

Separando para poder derivar:

$$A = \frac{L_a D_s^2}{4} \frac{d}{dh_a} \left[ \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_a}{D_s} \right) \right] \quad (57)$$

$$B = \frac{L_a D_s^2}{2} \frac{d}{dh_a} \left[ \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] \quad (58)$$

$$C = \frac{L_a D_s}{2} \frac{d}{dh_a} \left[ h_a \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] \quad (59)$$

La ecuación (56) ha sido separada en términos de  $A, B, C$  para que la resolución de la derivada sea más sencilla, al derivar dichos términos su nomenclatura se convierte en  $A', B', C'$ .

Se obtiene las respectivas derivadas:

$$A' = \frac{2}{D_s \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{2h_a}{D_s} \right)^2}} \quad (60)$$

$$B' = \frac{\frac{1}{D_s} - \frac{2h_a}{D_s^2}}{2 \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2}} \quad (61)$$

$$C' = \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} + h_a (B) \quad (62)$$

Ordenando términos:

$$\frac{dV_{a,cil}}{dh_a} = \frac{L_a D_s^2}{4} A' - \frac{L_a D_s^2}{2} B' + L_a D_s (C') \quad (63)$$

$$\frac{dV_{a,cil}}{dh_a} = L_a D_s^2 \left[ \frac{A'}{4} - \frac{B'}{2} + \frac{C'}{D_s} \right] \quad (64)$$

$$\frac{dV_{a,cil}}{dh_a} = W_1 \quad (65)$$

### Sección hemisférica

$$\frac{dV_{a,cap}}{dh_a} = D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 - 2 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^3 \right] \quad (66)$$

$$\frac{dV_{a,cap}}{dh_a} = D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \frac{d}{dh_a} \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 - 2 \frac{d}{dh_a} \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^3 \right] \quad (67)$$

Separando para poder derivar:

$$D = 3 \frac{d}{dh_a} \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 \quad (68)$$

$$E = 2 \frac{d}{dh_a} \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^3 \quad (69)$$

La ecuación (67) ha sido separada en términos de  $D, E$  para que la resolución de la derivada sea más sencilla, al derivar dichos términos su nomenclatura se convierte en  $D'$  y  $E'$ . Se obtiene las respectivas derivadas:

$$D' = \frac{2h_a}{D_s^2} \quad (70)$$

$$E' = \frac{3}{D_s} \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 \quad (71)$$

Ordenando términos:

$$\frac{dV_{a,cap}}{dh_a} = D_s^3 \frac{\pi}{12} [3D' - 2E'] \quad (72)$$

$$\frac{dV_{a,cap}}{dh_a} = W_2 \quad (73)$$

Simplificación final, donde se realiza la sumatoria de las ecuaciones (64) y (72)

$$\frac{dV_a}{dh_a} = W_1 + W_2 \quad (74)$$

$$\frac{dV_a}{dh_a} = L_a D_s^2 \left[ \frac{A'}{4} - \frac{B'}{2} + \frac{C'}{D_s} \right] + D_s^3 \frac{\pi}{12} [3D' - 2E'] \quad (75)$$

Para poder expresar la derivada obtenida en un término simplificado se lo denota por  $S(h)$ , que se lo denominará función forma.

$$\frac{dV_a}{dh_a} = S(h) \quad (76)$$

Se realiza algunas consideraciones que deben ser aplicadas en los balances de masa del sistema y simulación en Matlab.

Se aplica la regla de la cadena

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} * \frac{dh}{dt} \quad (77)$$

$$\frac{dV}{dh} = L_a D_s^2 \left[ \frac{A'}{4} - \frac{B'}{2} + \frac{C'}{D_s} \right] + D_s^3 \frac{\pi}{12} [3D' - 2E'] \quad (78)$$

Se reemplaza (78) en (77)

$$\frac{dV}{dt} = L_a D_s^2 \left[ \frac{A'}{4} - \frac{B'}{2} + \frac{C'}{D_s} \right] + D_s^3 \frac{\pi}{12} [3D' - 2E'] * \frac{dh}{dt} \quad (79)$$

$$\frac{dV}{dt} = S(h) * \frac{dh}{dt} \quad (80)$$

Derivadas Simplificadas:

$$A' = \frac{1}{\sqrt{h(D_s - h)}} \quad (81)$$

$$B' = \frac{D_s - 2h}{2D_s\sqrt{hD_s - h^2}} \quad (82)$$

$$C' = \frac{-4h^2 + 3D_sh}{2D_s\sqrt{hD_s - h^2}} \quad (83)$$

$$D' = \frac{2h_a}{D_s^2} \quad (84)$$

$$E' = \frac{3h^2}{D_s^3} \quad (85)$$

### 3.2.4. Balances de Masa

En esta etapa se realiza el balance de masa de los fluidos en las diferentes secciones del equipo ya que se trata de un sistema dinámico. En el modelo del separador tenemos ecuaciones diferenciales las mismas que se utilizan para el análisis de los niveles de fluidos y presión del gas.

#### 3.2.4.1. Balance de Líquido en la cámara de Separación

El balance de líquido, es decir tanto agua como crudo en la cámara de separación se observa a continuación:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (86)$$

$$\rho \frac{dV_a(t)}{dt} = \rho * q_{ci}(t) + \rho * q_{wi}(t) - \rho * q_{ca}(t) - \rho * q_{wo}(t) \quad (87)$$

La densidad del líquido se considera constante, además se reemplaza la ecuación (77) en la (87)

$$\frac{dV_a}{dh_a} * \frac{dh_a(t)}{dt} = q_{ci}(t) + q_{wi}(t) - q_{ca}(t) - q_{wo}(t) \quad (88)$$

Se reemplaza (76), función de forma  $S(h)$  en (88),

$$S(h_a) * \frac{dh_a(t)}{dt} = q_{ci}(t) + q_{wi}(t) - q_{ca}(t) - q_{wo}(t) \quad (89)$$

$$\frac{dh_a(t)}{dt} = \frac{q_{ci}(t) + q_{wi}(t) - q_{ca}(t) - q_{wo}(t)}{S(h_a)} \quad (90)$$

Donde:

$q_{ci}$	Caudal de crudo de ingreso a la cámara de separación	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$q_{wi}$	Caudal de agua de ingreso a la cámara de separación	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$q_{ca}$	Caudal de crudo de ingreso al vertedero (Efecto cascada)	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$q_{wo}$	Caudal de agua de salida de la cámara de separación, controlado por la válvula de agua	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$S(h_a)$	Función forma en la cámara de separación	$m^2$	$ft^2$

#### 3.2.4.2. Balance de Agua en la cámara de Separación

La dinámica del nivel de agua en la cámara de separación está definida por la siguiente ecuación:

$$\rho_w \frac{dV_w(t)}{dt} = \rho_w * q_{wi}(t) - \rho_w * q_{wo}(t) \quad (91)$$

La densidad del agua se considera constante, además se reemplaza la ecuación (77) en (91)

$$\frac{dV_w}{dh_w} * \frac{dh_w(t)}{dt} = q_{wi}(t) - q_{wo}(t) \quad (92)$$

Se reemplaza (76) función de forma  $S(h)$  en (92)

$$S(h_w) * \frac{dh_w(t)}{dt} = q_{wi}(t) - q_{wo}(t) \quad (93)$$

$$\frac{dh_w(t)}{dt} = \frac{q_{wi}(t) - q_{wo}(t)}{S(h_w)} \quad (94)$$

Donde:

$q_{wi}$	Caudal de agua de ingreso a la cámara de separación	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$q_{wo}$	Caudal de agua de salida de la cámara de separación, controlado por la válvula de agua	$m^3/s$	<i>BPD</i>

$S(h_w)$  Función forma del agua en la cámara de separación  $m^2$   $ft^2$

### 3.2.4.3. Balance de Crudo en la Cámara de Separación

La dinámica del nivel de crudo en la cámara de separación está definida por la siguiente ecuación:

$$\rho_c \frac{dV_c(t)}{dt} = \rho_c * q_{ci}(t) - \rho_c * q_{ca}(t) \quad (95)$$

La densidad del crudo se considera constante, además se reemplaza la ecuación (77) en (95)

$$\frac{dV_c}{dh_c} * \frac{dh_c(t)}{dt} = q_{ci}(t) - q_{ca}(t) \quad (96)$$

Se reemplaza (76) función de forma  $S(h)$  en (96)

$$S(h_c) * \frac{dh_c(t)}{dt} = q_{ci}(t) - q_{ca}(t) \quad (97)$$

$$\frac{dh_c(t)}{dt} = \frac{q_{ci}(t) - q_{ca}(t)}{S(h_c)} \quad (98)$$

Donde:

$q_{ci}$	Caudal de crudo de ingreso a la cámara de separación	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$q_{ca}$	Caudal de crudo de ingreso al vertedero (Efecto cascada)	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$S(h_c)$	Función forma del crudo en la cámara de separación	$m^2$	$ft^2$

### 3.2.4.4. Balance de Crudo en el Colector

La dinámica del nivel de crudo en el colector está definida por la siguiente ecuación:

$$\rho_b \frac{dV_b(t)}{dt} = \rho_b * q_{ca}(t) - \rho_b * q_{cb}(t) \quad (99)$$

La densidad del crudo se considera constante, además se reemplaza la ecuación (77) en (99)

$$\frac{dV_b}{dh_b} * \frac{dh_b(t)}{dt} = q_{ca}(t) - q_{cb}(t) \quad (100)$$

Se reemplaza (76) función de forma  $S(h)$  en (100)

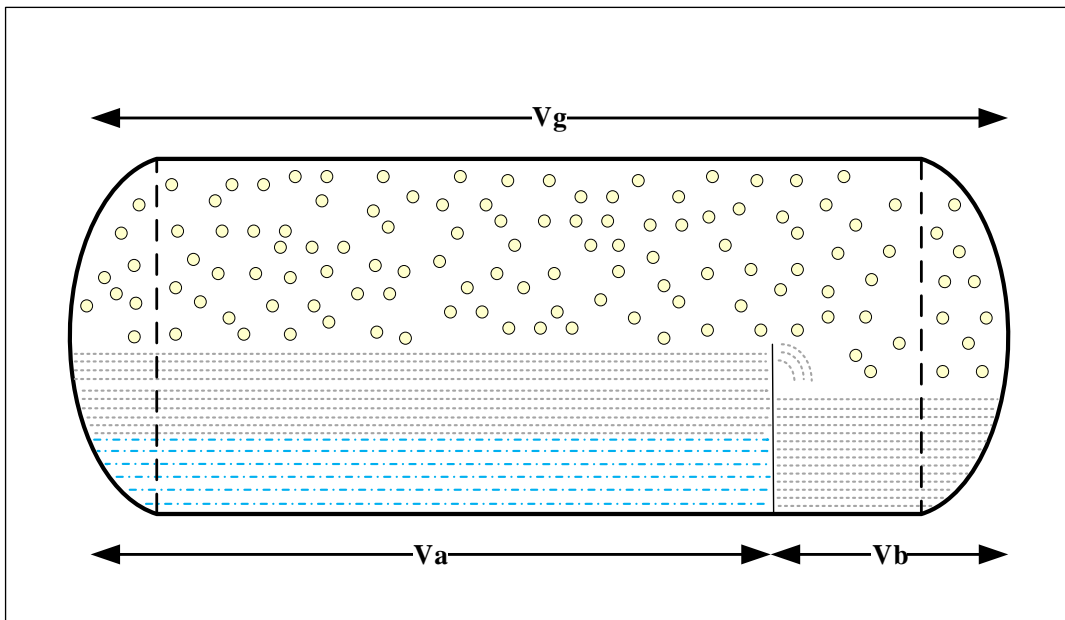
$$S(h_b) * \frac{dh_b(t)}{dt} = q_{ca}(t) - q_{cb}(t) \quad (101)$$

$$\frac{dh_b(t)}{dt} = \frac{q_{ca}(t) - q_{cb}(t)}{S(h_b)} \quad (102)$$

Donde:

$q_{ca}$	Caudal de crudo de ingreso al vertedero (Efecto cascada)	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$q_{cb}$	Caudal de crudo de salida del colector, controlado por la válvula de crudo	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$S(h_b)$	Función forma de crudo en el colector	$m^2$	<i>ft<sup>2</sup></i>

#### 3.2.4.5. Balance del Gas



**Figura 6-3:** Separador con especificaciones para calcular el volumen ocupado por el gas

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.



Donde:

$V_a$	Volumen de la cámara de separación	$m^3$	$ft^3$
$V_b$	Volumen del colector	$m^3$	$ft^3$

Antes de realizar el balance de masa del gas se deben tomar en cuenta importantes ecuaciones.

$$V_T = V_g + V_a + V_b \quad (103)$$

$$V_g = V_T - (V_a + V_b) \quad (104)$$

Donde:

$V_T$	Volumen Total del Separador	$m^3$	$ft^3$
$V_g$	Volumen ocupado por el gas	$m^3$	$ft^3$

Se considera la ecuación de los gases ideales, expresado de la siguiente manera:

$$PV_g = nRT \quad (105)$$

$$n_g = \frac{P_g V_g}{RT} \quad (106)$$

Se considera el volumen del separador, de la cámara de separación y del colector, es decir se reemplaza la ecuación (104) en la (106) y se tiene:

$$n_g = \frac{P_g}{RT} [V_T - (V_a + V_b)] \quad (107)$$

Se deriva con respecto al tiempo y se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{P_g}{RT} \left( \frac{dV_a}{dt} + \frac{dV_b}{dt} \right) + \frac{(V_T - V_a - V_b)}{RT} \frac{dP}{dt} \quad (108)$$

Se reemplaza (87) y (99) en (108)

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{P_g}{RT} [q_{ci}(t) + q_{wi}(t) - q_{ca}(t) - q_{wo}(t) + q_{ca}(t) - q_{cb}(t)] + \frac{(V_T - V_a - V_b)}{RT} \frac{dP}{dt} \quad (109)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{P_g}{RT} [q_{ci}(t) + q_{wi}(t) - q_{wo}(t) - q_{cb}(t)] + \frac{(V_T - V_a - V_b)}{RT} \frac{dP}{dt} \quad (110)$$

El flujo molar de gas de entrada y salida vienen dadas de la siguiente manera:

$$\dot{n}_i = \frac{P_g q g_i(t)}{RT} \quad (111)$$

$$\dot{n}_o = \frac{P_g q g_o(t)}{RT} \quad (112)$$

### Balance de Masa

El balance de masa del gas en el separador es:

$$\frac{dn}{dt} = \dot{n}_i - \dot{n}_o \quad (113)$$

De las ecuaciones (111) y (112) en (113), resulta:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{P_g q g_i(t)}{RT} - \frac{P_g q g_o(t)}{RT} \quad (114)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{P_g}{RT} [q g_i(t) - q g_o(t)] \quad (115)$$

Igualando las ecuaciones (110) y (115)

$$\frac{P_g}{RT} [q g_i(t) - q g_o(t)] = -\frac{P_g}{RT} [q_{ci}(t) + q_{wi}(t) - q_{wo}(t) - q_{cb}(t)] + \frac{(V_T - V_a - V_b)}{RT} \frac{dP}{dt} \quad (116)$$

Finalmente se obtiene el comportamiento dinámico

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_g [q g_i(t) - q g_o(t) + q_{ci}(t) + q_{wi}(t) - q_{wo}(t) - q_{cb}(t)]}{(V_T - V_a - V_b)} \quad (117)$$

Donde:

$P_g$  Presión del gas

$Pa$

$Psi$

$qg_i$	Caudal del gas de ingreso al separador	$m^3/s$	MMSCFD
$qg_o$	Caudal del gas de salida del separador	$m^3/s$	MMSCFD

### 3.2.5. Sistema de Control

El sistema de control se basa en el modelo matemático, y según Proaño (2015, p.42) , dicho modelo debe representar con cierto grado de aproximación el comportamiento dinámico de las principales variables de interés.

Este sistema de control ayudará a que las variables de interés lleguen al set point (valor deseado), y se envíen señales para que el controlador tome una decisión y el elemento final (válvula) se abra o se cierre.

En el separador trifásico se controlará las variables expresadas a continuación:

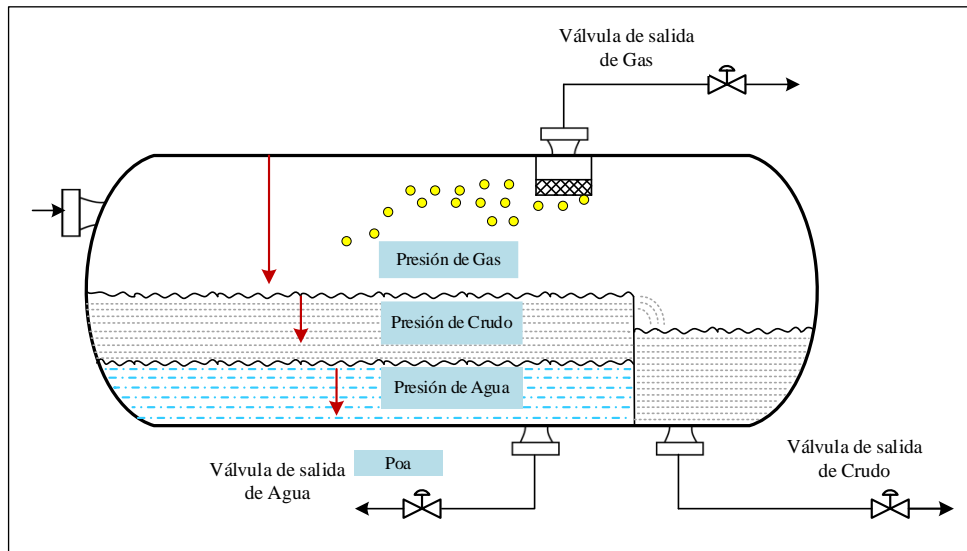
**Tabla 6-3:** Variables por controlar en el separador

Variable por controlar	Parámetro por controlar	Razón
Nivel	Agua en la cámara de separación	Al mantenerse constante el nivel de agua, el crudo va acumulándose sobre éste, llega al estado estacionario y mediante efecto cascada pasa hacia el colector sin la presencia de trazas de agua
Nivel	Crudo en el colector	Debido al modelado, el nivel de crudo en el colector no se iguala con el nivel de fluido en la cámara de separación, es decir al llegar al set point la válvula de crudo se abre.
Presión	Gas	Por motivo de seguridad y además a mayor presión, mayor flujo de caudal de salida de crudo y agua.

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

A continuación, se expresan las ecuaciones de las válvulas que permitirán controlar las variables de interés expresadas en la tabla 6-3.

### 3.2.5.1. Flujo de salida de agua de la Cámara de Separación



**Figura 7-3:** Presión ejercida antes y después de la válvula de control de agua

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

En la figura 7-3, se observa la presión que ejercen los líquidos y el gas sobre la válvula de control de agua, es decir la presión aguas arriba, así como la de salida que corresponde a la presión aguas abajo o presión después de la válvula ( $P_{oa}$ ). La presión que ejercen el crudo y el agua es una presión hidrostática descrita en la ecuación (3).

El caudal de salida de agua de la cámara de separación que atraviesa por la válvula de control viene por la siguiente ecuación:

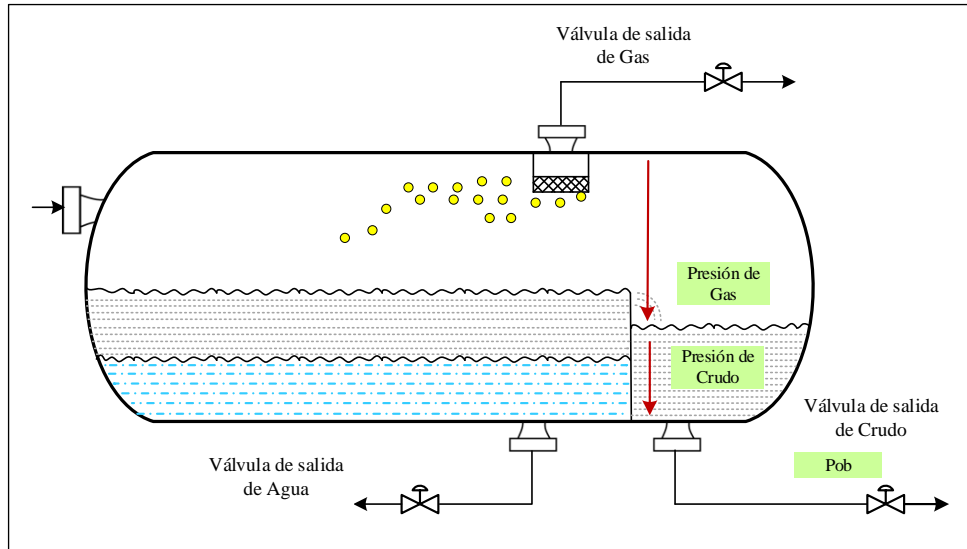
$$q_{wo} = K v_w V p_w \sqrt{\frac{P_g + r h o c * g * h_c + r h o w * g * h_w - P_{oa}}{S g_w}} \quad (118)$$

Donde:

$q_{wo}$	Caudal de agua de salida de la cámara de separación, controlado por la válvula de agua	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$K v_w$	Coefficiente de la válvula de agua	$m^3/s Pa^{0.5}$	<i>gpm/Psi<sup>0.5</sup></i>
$V p_w$	Apertura de la válvula de agua	<i>adim</i>	<i>adim</i>
$P_g$	Presión del gas	<i>Pa</i>	<i>Psi</i>
$r h o c$	Densidad del crudo	$kg/m^3$	<i>lb/ft<sup>3</sup></i>
$g$	Constante de la gravedad	$m/s^2$	<i>ft/s<sup>2</sup></i>

$h_c$	Nivel del crudo en la cámara de separación	$m$	$ft$
$\rho_{ow}$	Densidad del agua	$kg/m^3$	$lb/ft^3$
$h_w$	Nivel de agua en la cámara de separación	$m$	$ft$
$P_{oa}$	Presión de salida de la válvula de agua	$Pa$	$Psi$
$Sg_w$	Gravedad específica del agua	$adim$	$adim$

### 3.2.5.2. Flujo de salida de crudo del Colector



**Figura 8-3:** Presión ejercida antes y después de la válvula de control de crudo

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

En la figura 8-3, se observa la presión que el gas y crudo ejercen sobre la válvula de control de crudo, es decir la presión aguas arriba, así como la de salida que corresponde a la presión aguas abajo o presión después de la válvula ( $P_{ob}$ ). La presión que ejercen el crudo es hidrostática descrita en la ecuación (3).

El caudal de salida de crudo del colector que atraviesa por la válvula de control viene por la siguiente ecuación:

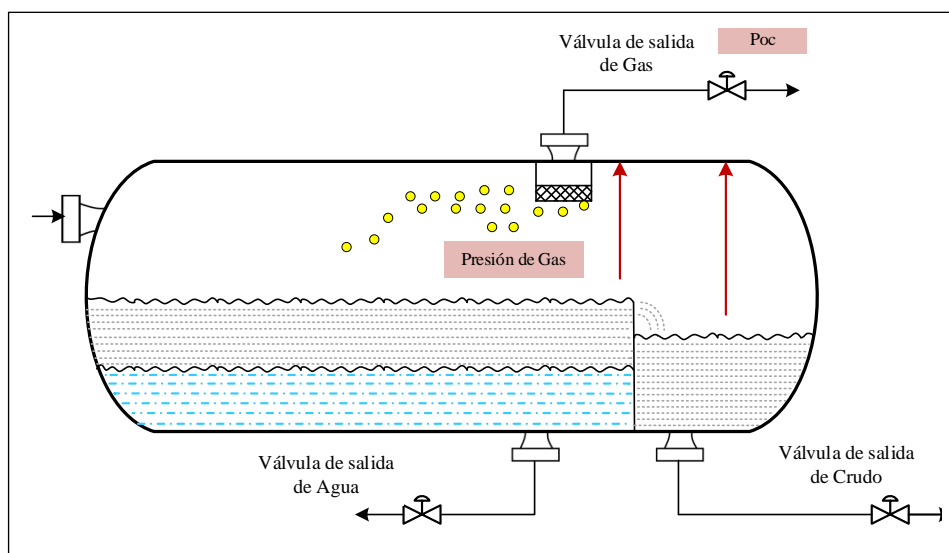
$$q_{cb} = K v_c V p_c \sqrt{\frac{P_g + \rho_{oc} * g * h_b - P_{ob}}{Sg_c}} \quad (119)$$

Donde:

$q_{cb}$	Caudal de crudo de salida del colector, controlado por la válvula de crudo	$m^3/s$	$BPD$
----------	--	---------	-------

$Kv_c$	Coefficiente de la válvula de crudo	$m^3/s Pa^{0.5}$	$gpm/Psi^{0.5}$
$Vp_c$	Apertura de la válvula de crudo	$adim$	$adim$
$P_g$	Presión del gas	$Pa$	$Psi$
$rhoc$	Densidad del crudo	$kg/m^3$	$lb/ft^3$
$h_b$	Nivel del crudo en el colector	$m$	$ft$
$P_{ob}$	Presión de salida de la válvula de crudo	$Pa$	$Psi$
$Sg_c$	Gravedad específica del crudo	$adim$	$adim$

### 3.2.5.3. Flujo de salida del Gas



**Figura 9-3:** Presión ejercida antes y después de la válvula de control de gas

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

En la figura 9-3, se representa la presión de gas sobre la válvula de control, es decir la presión antes de la válvula, así como la de salida ( $P_{oc}$ ) que corresponde a la presión después del elemento final.

El modelo de la ecuación del caudal de salida de gas que atraviesa por la válvula de control se basa en la ecuación (120), tomada de la publicación realizada por Engineering world (2018).

La siguiente expresión se encuentra en el sistema inglés, por tal motivo toda la ecuación estará expresada en dicho sistema, pero mediante transformación de unidades se la expresa en el sistema internacional, que es el sistema con el que trabaja Matlab.

$$Q_G = 962Cv \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{SG * T}} \quad (120)$$

Basado en la ecuación (120),

$$q_{go} = 962Kv_g Vp_g \sqrt{\frac{q_{gnum}}{q_{gden}}} \quad (121)$$

$$q_{gnum} = P_g^2 - P_{oc}^2 \quad (122)$$

$$q_{gden} = Sg_g * T \quad (123)$$

Asumiendo que es un gas ideal

$$Sg_g = \frac{m_{gas}}{m_{air}} \quad (124)$$

Se reemplaza (122), (123) y (124) en (121)

$$q_{go} = 962Kv_g Vp_g \sqrt{\frac{P_g^2 - P_{oc}^2}{\frac{m_{gas}}{m_{air}} * T}} \quad (125)$$

Finalmente se obtiene:

$$q_{go} = 962Kv_g Vp_g \sqrt{\frac{[(P_g * 1.45 \times 10^{-4}) + 14.7]^2 - [(P_{oc} * 1.45 \times 10^{-4}) + 14.7]^2}{\frac{m_{gas}}{m_{air}} (T + 460)}} (7.86579 \times 10^{-6}) \quad (126)$$

Donde:

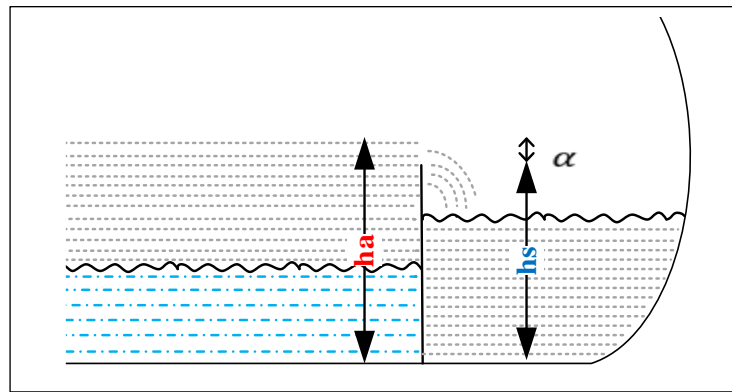
$q_{go}$	Caudal de gas de salida del separador	$m^3/s$	<i>MMSCFD</i>
$Kv_g$	Coefficiente de la válvula de gas	$m^3/s Pa^{0.5}$	<i>gpm/Psi<sup>0.5</sup></i>
$Vp_g$	Apertura de la válvula de gas	<i>adim</i>	<i>adim</i>
$P_g$	Presión del gas	<i>Pa</i>	<i>Psi</i>
$P_{oc}$	Presión de salida de la válvula de gas	<i>Pa</i>	<i>Psi</i>
$Sg_g$	Gravedad específica del gas	<i>adim</i>	<i>adim</i>
$m_{gas}$	Peso molecular del gas	<i>g/mol</i>	<i>g/mol</i>
$m_{air}$	Peso molecular del aire	<i>g/mol</i>	<i>g/mol</i>
$T$	Temperatura	<i>K</i>	<i>°F</i>
$1.45 \times 10^{-4}$	Para convertir de <i>Pa</i> a <i>Psi</i>		

$7.86579 \times 10^{-6}$  Para convertir de *scfh* a  $m^3/s$

### 3.2.6. Ecuaciones adicionales para el modelo

#### 3.2.6.1. Flujo de Crudo en el Colector

Para determinar el flujo de crudo en el colector, el trabajo se basa en la fórmula de presa descrita en el Manual del Ingeniero Químico de Perry, sección 10, (Perry et al., 2000, p.19).



**Figura 10-3:** Flujo de crudo en el colector

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

$$q_{ca} = 0.415[D_s - 0.2\alpha]a^{1.5}\sqrt{2g} \quad (127)$$

$$h_a = \alpha + h_s \quad (128)$$

$$\alpha = h_a - h_s \quad (129)$$

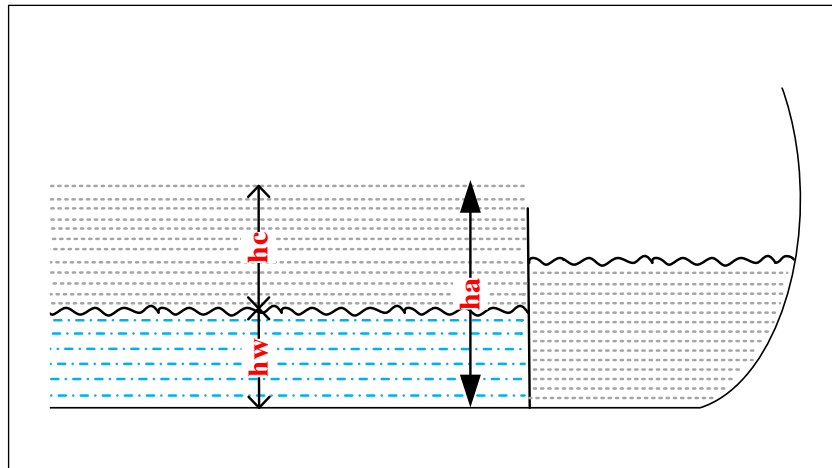
$$q_{ca} = 0.415[D_s - 0.2(h_a - h_s)](h_a - h_s)^{1.5}\sqrt{2g} \quad (130)$$

Donde:

$q_{ca}$	Caudal de crudo de ingreso al vertedero (Efecto cascada)	$m^3/s$	<i>BPD</i>
$D_s$	Diámetro del separador	<i>m</i>	<i>ft</i>
$h_a$	Nivel de fluido en la cámara de separación	<i>m</i>	<i>ft</i>
$h_s$	Altura de la barrera	<i>m</i>	<i>ft</i>



### 3.2.6.2. Relación entre agua y crudo en la cámara de separación



**Figura 11-3:** Altura del fluido total en la cámara de separación

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

$$h_a = h_c + h_w \quad (131)$$

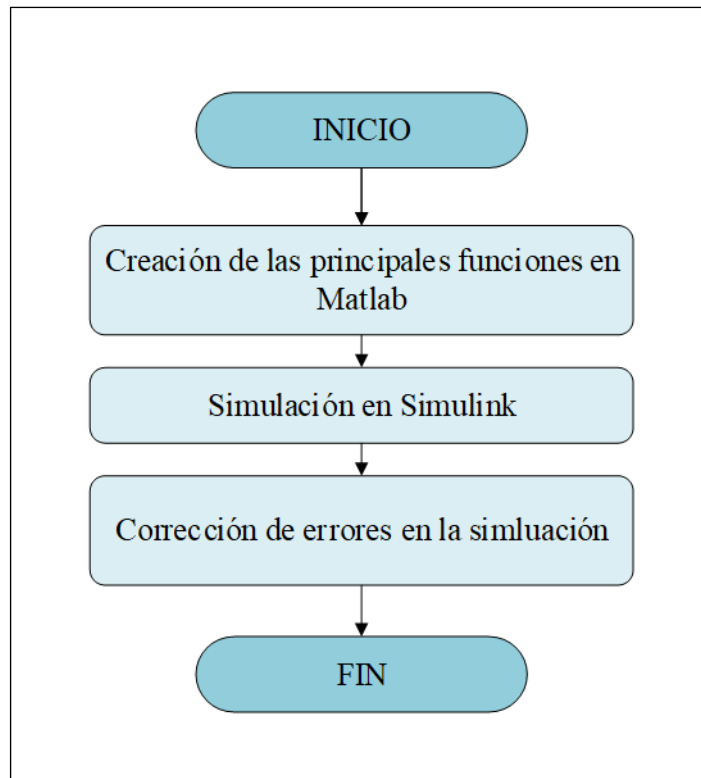
Donde:

$h_c$	Nivel del crudo en la cámara de separación	$m$	$ft$
$h_w$	Nivel de agua en la cámara de separación	$m$	$ft$

### 3.3. Simulación en Matlab

En el software Matlab se efectúa una programación funcional, donde se desarrollaron funciones, las mismas que permiten resolver ecuaciones diferenciales que son la base para ejecutar el sistema de control en Simulink.

En la figura 12-3, se detalla los pasos a seguir en la simulación.



**Figura 12-3:** Procedimiento para la simulación

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

### 3.3.1. Creación de las principales funciones en Matlab

La simulación en Matlab utiliza unidades del sistema internacional, es así como las variables empleadas en las funciones y el modelo de Simulink están expresadas en dicho sistema.

#### 3.3.1.1. Función Main

En la función “main”, de Matlab se especifican los parámetros que rigen el sistema, es decir aquellos detallados desde la tabla 1-3, hasta la 5-3. Además, las perturbaciones, set points y controladores son descritos mediante estructuras, las cuales permiten conectar a Matlab con simulink. Ver Anexo B.

#### 3.3.1.2. Función Hemivolt

La función hemivolt, permite calcular el volumen total del separador, para dicho volumen se considera tanto la sección cilíndrica como la hemisférica. En la formulación del modelado corresponde a la ecuación (44). Ver Anexo C.

$$V_T = \frac{\pi D_s^2}{4}(L_a + L_b) + \frac{\pi D_s^3}{6}$$

### 3.3.1.3. Función Hemivols

Esta función realiza el cálculo del volumen por secciones del equipo, es decir de la cámara de separación y del colector de crudo, estas ecuaciones son la (45), (46) y (47) respectivamente:

$$V_T^a = V_{cil}^a + V_{cap}^a$$

$$V_{cil}^a = L_a D_s^2 \left[ \frac{1}{4} \arccos \left( 1 - 2 \frac{h_a}{D_s} \right) - \left( \frac{1}{2} - \frac{h_a}{D_s} \right) \sqrt{\frac{h_a}{D_s} - \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2} \right] = W_1$$

$$V_{cap}^a = D_s^3 \frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^2 - 2 \left( \frac{h_a}{D_s} \right)^3 \right] = W_2$$

Estas ecuaciones corresponden a la cámara de separación, para el colector se aplican las mismas ecuaciones con sus correspondientes parámetros tal y como se especifica en las ecuaciones (49),(50) y (51). Ver Anexo D.

### 3.3.1.4. Función Hemihead

El objetivo de la función hemihead es la de calcular la función forma  $S(h)$ . Dicha función permite simplificar los términos que definen a la derivada del volumen, ecuación descrita en la función hemivols. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes: (54), (64) y (72). Ver Anexo E.

$$\frac{dV_a}{dh_a} = W_1 + W_2$$

$$W_1 = L_a D_s^2 \left[ \frac{A}{4} - \frac{B}{2} + \frac{C}{D_s} \right]$$

$$W_2 = D_s^3 \frac{\pi}{12} [3D - 2E]$$

En esta función se programan las derivadas simplificadas: (81), (82), (83), (84) y (85)

### 3.3.1.5. Matlab Function

Esta función permite conectar a Matlab con Simulink, en ella se programa:

1. Entradas al sistema

2. Las constantes del sistema
3. Valores de la iteración previa
4. Parámetros calculados
  - a) Cálculo del volumen Total del separador (hemivolt)
  - b) Altura del fluido total en la cámara de separación
  - c) Flujo de crudo desde la cámara de separación hasta el colector de crudo
  - d) Flujo de salida de crudo del Colector
  - e) Flujo de salida de agua de la Cámara de Separación
  - f) Flujo de salida de Gas
  - g) Cálculo de volúmenes por sección (hemivols)
5. Modelo
  - a) Balance de Crudo en la Cámara de Separación
  - b) Balance de Agua en la cámara de Separación
  - c) Balance de Crudo en el Colector
  - d) Balance del Gas
6. Salidas del sistema

El detalle de la programación se observa en el Anexo F.

#### 3.3.1.6. *Función wilsonCorr*

En esta función se programa la correlación de Wilson que permite determinar la constante de equilibrio entre la fase vapor y fase líquida,  $k_i$ , es decir la ecuación (5). Ver Anexo G.

#### 3.3.1.7. *Función cubicPR*

Esta función permite calcular el volumen molar útil para transformar el flujo molar en flujo volumétrico, y poder obtener el Flujo de gas y flujo de crudo que serán datos utilizados en la simulación, el volumen molar se obtiene aplicando la ecuación de estado cúbica de Peng-Robinson descrita en la metodología, el código de programación se observa en el Anexo H.

#### 3.3.1.8. *Función flashWilson*

La función llamada flashWilson contiene a la función de correlación de Wilson y a la cubicPR, en esta se determinan las fracciones molares del componente  $i$  en la fase gaseosa ( $y_i$ ), las fracciones molares del componente  $i$  en la fase líquida ( $x_i$ ), pesos moleculares en cada fase, algunas propiedades de los fluidos y finalmente los flujos volumétricos. Ver Anexo I.

### 3.3.2. Simulación en Simulink

A partir del bloque Matlab Function, el modelo creado en Matlab se enlaza con simulink, este bloque tiene dos entradas (input,recycle), y dos salidas (data, output).

#### 3.3.2.1. Input

En input, se detallan las entradas al sistema, estas corresponden a los flujos de ingreso, set point y parámetro de ajuste en los controladores. En el modelo de simulink los flujos de ingreso de: crudo, agua y gas se expresan como perturbaciones para mayor versatilidad del sistema, pero en la interfaz gráfica sólo el flujo de agua actuará como perturbación, mientras que los de crudo y gas serán constantes determinadas mediante los cálculos flash. Las entradas al sistema se pueden observar en la siguiente tabla:

**Tabla 7-3:** Entradas al modelo del Separador

Perturbaciones			Set points			Controladores	
Nombre del Step	Valor	Unidades	Nombre del Step	Valor	Unidades	Parámetro de Ajuste	Valor
Flujo de entrada de crudo <b>qci</b>	Depende de cálculos flash	$m^3/s$	Nivel de crudo <b>hcs</b>	0	$m$	$kp$	-150
				0.85		$ki$	-0.0120
				0.85		$kd$	-0.0012
Flujo de entrada de agua <b>qwi</b>	0	$m^3/s$	Nivel de agua <b>hws</b>	0	$m$	$kp$	-90
	0.1374			0.80		$ki$	-0.0100
	0.1374			0.80		$kd$	-0.0100
Flujo de entrada de gas <b>qgi</b>	Depende de cálculos flash	$m^3/s$	Presión de gas <b>hgs</b>	0	$Pa$	$kp$	-5.0e-3
				413685		$ki$	0
				413685		$kd$	0

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021

En la figura 13-3 se observa como las entradas son expresadas como step (saltos unitarios), además la entrada de crudo y gas en la interfaz gráfica son determinadas mediante cálculos flash y el modelo de simulink es generalizado con constantes.

Los sets points se encuentran enlazados al bloque *add*, que a su vez se une a la retroalimentación de la señal integrada, la salida se conoce como margen de error que ingresa al controlador, el mismo que opera en base a su configuración y al margen de error, dando como resultado una salida que representa a los porcentajes de apertura de cada válvula de control:

- Apertura de la válvula de crudo, ( $Vp_c$ )
- Apertura de la válvula de agua, ( $Vp_w$ )
- Apertura de la válvula de gas, ( $Vp_g$ )

Estos porcentajes están entre 0 y 1, completamente cerrada 0 y completamente abierta 1. También dependen del coeficiente y presión de salida de la válvula.

En la tabla 8-3 se representa el tipo de controlador aplicado.

**Tabla 8-3:** Tipo de Controlador empleado en el sistema de control

Variable por controlar	Controlador
Nivel de agua en la cámara de separación	PID
Nivel de crudo en el colector	PID
Presión del gas	PROPORCIONAL

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

### 3.3.2.2. *Recycle*

El bloque integrador toma todos los valores asignados como entradas (*input*) y llama al bloque *Matlab Function* para que me devuelva 4 valores que corresponden a las variaciones de las ecuaciones diferenciales ( $dh_c, dh_w, dh_b, dp_g$ ) que serán las salidas (*output*).

En términos generales, el trabajo del bloque integrador:

1. Tomar las 4 variaciones que las ecuaciones diferenciales arrojan
2. Suma las 4 variaciones a las condiciones iniciales (*initial*) y estas serán las nuevas condiciones de inicio para la siguiente iteración.
3. El reciclo devuelve los valores ya sumados o integrados y los asigna como valores de la iteración previa en *Matlab Function*.
4. Estos valores de la iteración previa permiten calcular los parámetros necesarios para resolver las ecuaciones diferenciales del modelo, cuyos resultados son las variaciones
5. Estas variaciones son salidas (*output*), que nuevamente el integrador las toma y se repite el proceso hasta que se cumpla con el número de iteraciones que dependen del tamaño de paso de la simulación.

### 3.3.2.3. Data

En esta salida se pueden observar los resultados de los parámetros calculados útiles para resolver las ecuaciones diferenciales, estos parámetros se enlistan a continuación:

**Tabla 9-3:** Parámetros calculados necesarios para las ecuaciones diferenciales

Parámetros calculados	Nomenclatura utilizada en el modelo
Flujo de salida de agua de la cámara de separación	$q_{wo}$
Flujo de crudo en el colector	$q_{ca}$
Flujo de salida de crudo del colector	$q_{cb}$
Flujo de salida del Gas	$q_{go}$
Volumen de la Cámara de Separación	$V_a$
Volumen del Colector de Crudo	$V_b$
Nivel del fluido total en la cámara de separación	$h_a$

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

### 3.3.2.4. Output

Una vez que el bloque integrador se ejecuta, se expresan los resultados de las variaciones del nivel de crudo en la cámara de separación y de las variables por ser controladas, las mismas que se pueden observar en la siguiente tabla:

**Tabla 10-3:** Nomenclatura de las variaciones de Nivel obtenidos en Simulink

Output	Nomenclatura utilizada en el modelo
Nivel de crudo en la cámara de separación	$h_c$
Nivel de agua en la cámara de separación	$h_w$
Nivel de crudo en el colector	$h_b$
Presión del gas	$p_g$

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Todo lo descrito anteriormente, se puede observar en la figura 13-3.

3.3.2.5. Esquema de la Simulación utilizando Simulink

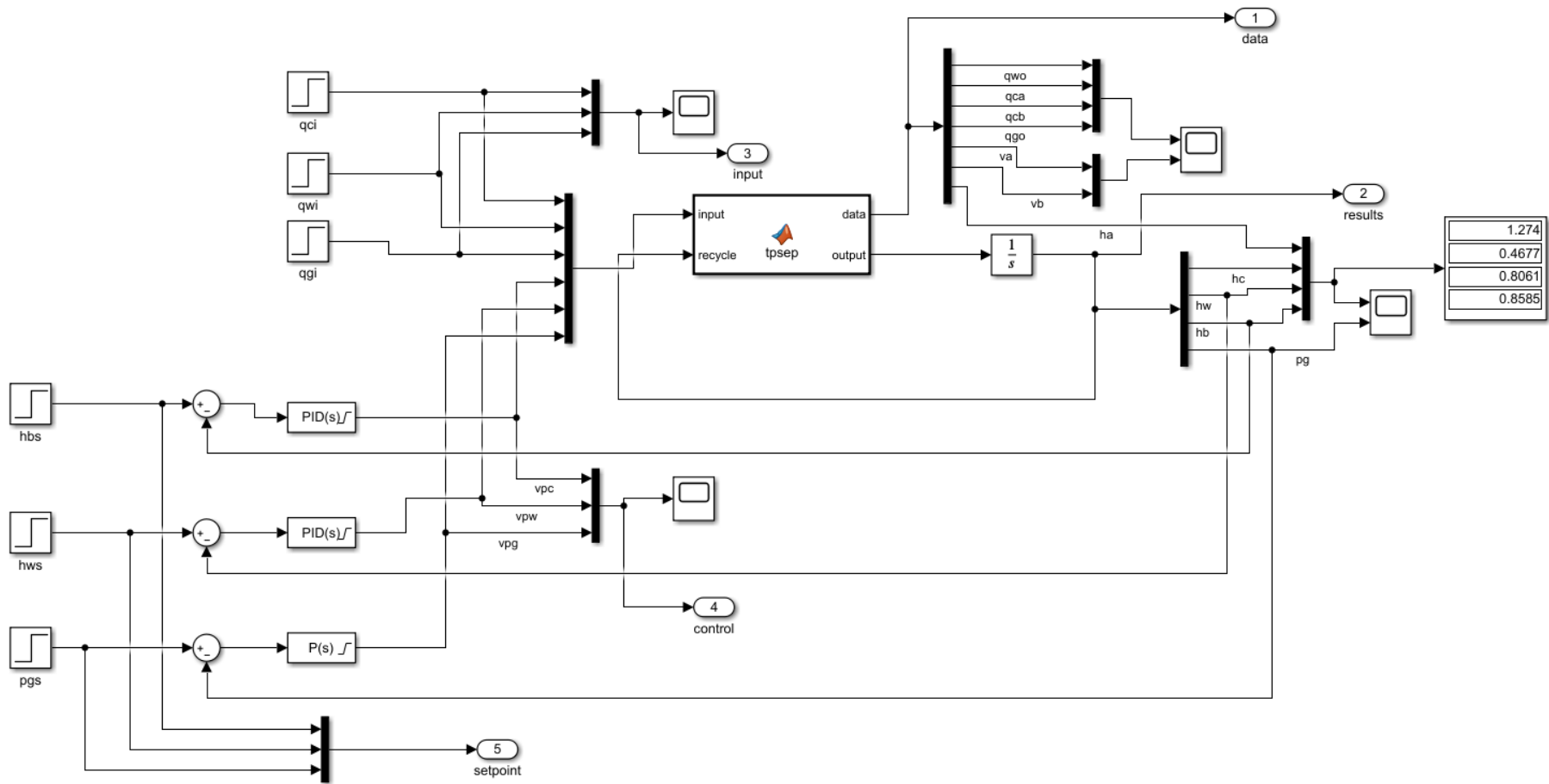


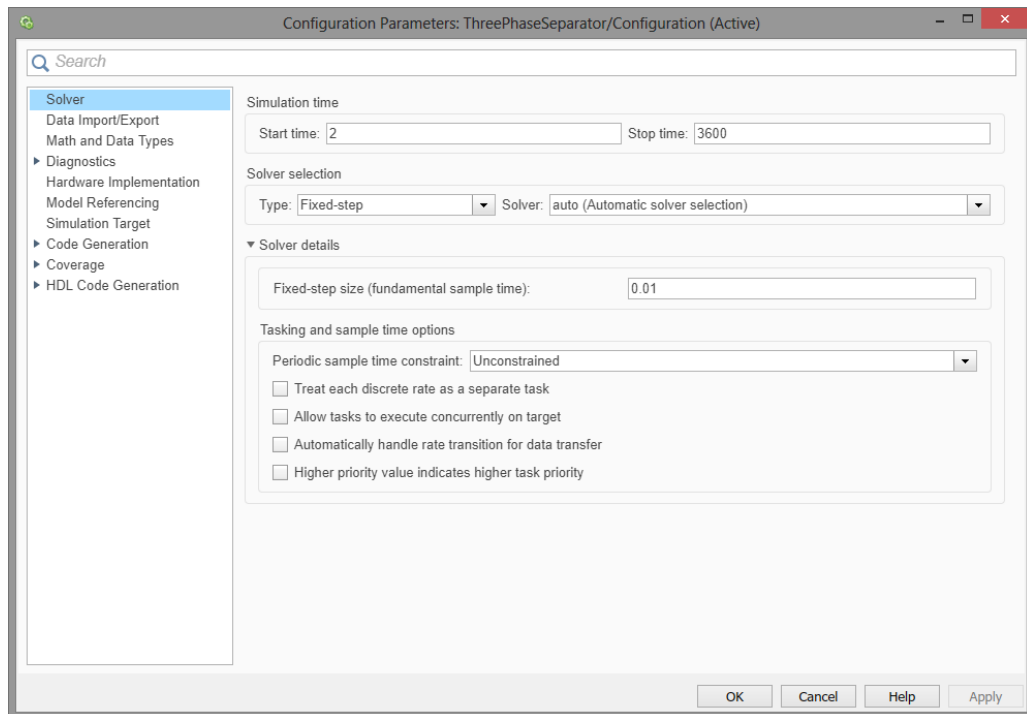
Figura 13-3: Esquema de la Simulación utilizando Simulink

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.



### 3.3.2.6. *Parámetros empleados en la simulación*

Los parámetros que se establecieron fueron: un tiempo de simulación de 3600 segundos, un tamaño de paso de 0,01, y el solver por defecto que corresponde al ode 3, de acuerdo con el tamaño de paso se efectuarán el número de iteraciones hasta llegar al segundo 3600. Los parámetros establecidos se observan en la siguiente figura:



**Figura 14-3:** Parámetros empleados en la simulación

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

### 3.3.3. *Corrección de errores en la simulación*

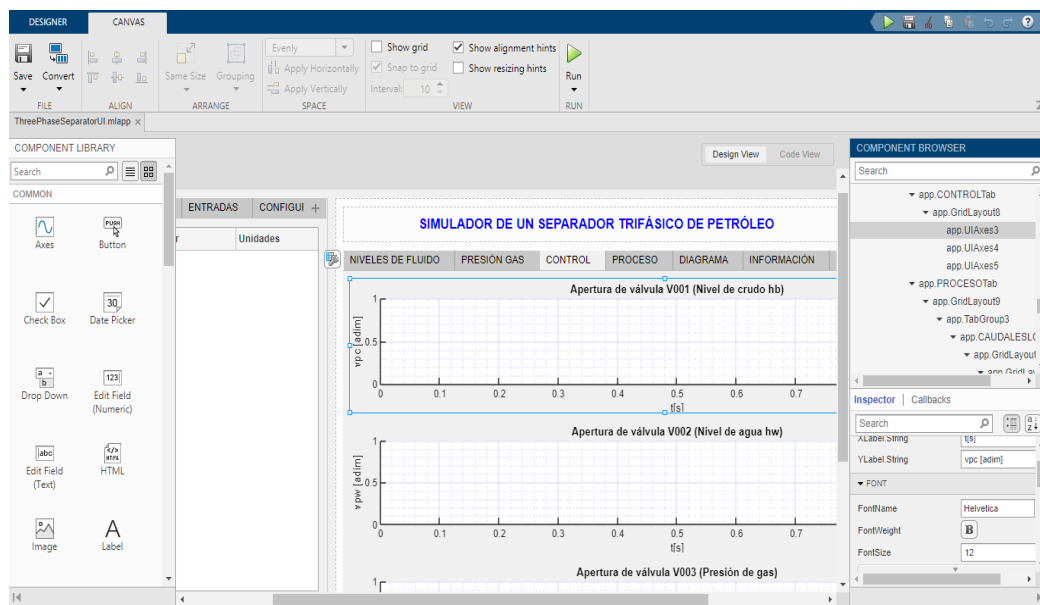
Una vez que se ejecuta la simulación en la barra inferior de simulink se observa cómo se completa al 100% en el caso de no presentar errores, de lo contrario aparecerá una ventana con los errores que deberán corregirse para una correcta simulación.

Los resultados pueden visualizarse al hacer click sobre los scope block y display, donde se observan los diferentes valores.

### 3.4. Creación de una Interfaz Gráfica de Usuario

#### 3.4.1. Diseño de las pantallas a visualizarse en la Aplicación

Como se observa en la figura 15-3 primero se debe crear las pantallas de la aplicación con las cuales el usuario podrá interactuar, se debe arrastrar los botones del component library hacia la plantilla (desing view). Para poder observar cómo será la versión final de la aplicación se debe ejecutar la simulación.



**Figura 15-3:** Diseño de las pantallas a visualizarse en la aplicación

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

#### 3.4.2. Programación del Código interno

En App designer es necesario crear código editable que permita conectar al modelo de Simulink con la interfaz, el procedimiento a implementarse se detalla a continuación:

1. Crear una propiedad denominada properties (Access = private), cuyo objetivo es el de almacenar funciones. Estas propiedades se detallan en la tabla 11-3.

**Tabla 11-3:** Propiedades que almacenan las funciones empleadas en la interfaz

Propiedad	Almacena
UnitSystem	El sistema de unidades
Consts	Los parámetros de la simulación, descritos desde la tabla 1-3 hasta la 5-3.
Input	Entradas al sistema: $qci(L), qwi, qgi(V)$
Control	Los controladores: $pid1, pid2, pid3$
Setpoint	Los set points: $hcs, hws, pgs$
Initial	Las condiciones iniciales con las que inicia la simulación: $hc\theta, hw\theta, hb\theta, pg\theta$
Cfg	La configuración del solver: $t\theta, tf, st$
Simulation	El caso de simulación
Results	Resultados en el sistema que se indique (IMP o SI), realiza una copia de estos en ResultsNoConv
ResultsNoConv	Resultados en el Sistema Internacional que vienen desde Matlab.
Flags	Los datos que proporcionan los checkbox (casilla de selección) para realizar las gráficas.
Flash	Cálculos flash que determina $qci(L), qgi(V)$ y algunas propiedades de los fluidos.

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

2. Crear una función privada dentro de la cual se pueda escribir código editable y almacenar otras funciones internas, se la crea con el nombre de methods (Access = private)
3. Rellenar las tablas que por defecto han de aparecer al iniciar la aplicación, para ello se crea una función llamada function defaultModel(app).
4. Crear función runSimulation (app), en la que se almacenan otras funciones que permiten iniciar la simulación, se detalla a continuación:
  - a. Se configura la simulación, dentro de este punto se crean dos funciones:
    - function getData(app), extrae los datos de todas las tablas, los convierte a las unidades que necesita y los carga a las variables almacenadas en properties.
    - function configSimulation(app), su programación se basa en clases tipo valor, transfiere los datos extraídos por getData al modelo de Simulink.
  - b. Se ejecuta la simulación
  - c. Se guardan los resultados
  - d. El siguiente paso es convertir las unidades en function convertResults(app)

En esta función se tiene dos opciones, el caso del sistema imperial (unidades de campo), y el sistema internacional, dependiendo en el sistema que el usuario necesite trabajar el sistema de unidades cambia.

e. Finalmente se dibujan las gráficas en función `drawResults(app)`

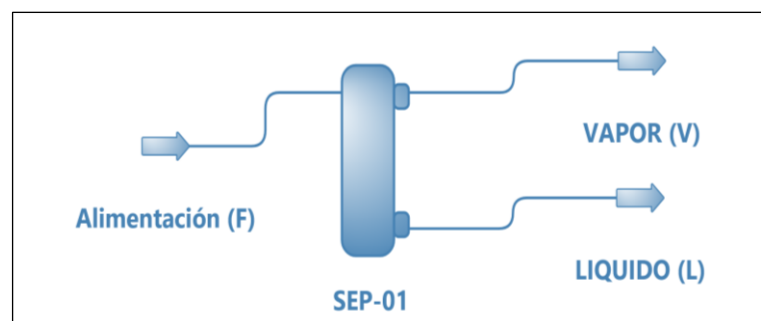
En la interfaz se podrán observar seis gráficas creadas a partir de funciones diferentes:

- ✓ Niveles de los fluidos, función `drawLiquidLevels(app)`
- ✓ Presión del Gas, función `drawGasPressure(app)`
- ✓ Control de las válvulas, función `drawControlValve(app)`
- ✓ Caudal de los líquidos, tanto crudo como agua, función `drawVolumetricFlow(app)`
- ✓ Caudal del Gas, función `drawGasFlow(app)`
- ✓ Volumen del Separador, función `drawVolume(app)`

### 3.5. Validación de datos obtenidos en la Simulación

Mediante cálculos flash descritos anteriormente es posible determinar el flujo de crudo y flujo de gas de ingreso al separador, las composiciones en la fase de gas y fase líquida forman parte de dichos cálculos, por ello estos resultados serán validados empleando el simulador de procesos Dwsim mediante el paquete Wilson, el cual corresponde al mismo método empleado en los cálculos flash.

En la siguiente figura se puede observar el diagrama utilizado en Dwsim, el mismo que es de utilidad para determinar el flujo de vapor (v) y de líquido (L) que han de ingresar al separador trifásico a partir de una alimentación (F).



**Figura 16-3:** Diagrama utilizado en Dwsim para la validación

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

## CAPÍTULO IV

### 4. GESTIÓN DEL PROYECTO

#### 4.1. Cronograma

**Tabla 1-4:** Cronograma del proyecto

Actividad	Tiempo																							
	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión bibliográfica	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Elaboración del Anteproyecto	x	x	x	x	x	x	x	x	x															
Cursos virtuales										x	x	x												
Obtención de las variables										x	x	x												
Introducción de variables												x	x											
Simulación y redacción del trabajo										x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Validación de la simulación																			x	x				
Corrección de borradores																				x	x			
Presentación del Trabajo Final																						x	x	
Defensa del trabajo																								x

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

## 4.2. Presupuesto

**Tabla 2-4:** Presupuesto del proyecto.

<b>Presupuesto</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Monto (\$)</b>	<b>Fuente de Financiamiento</b>	
		<b>Interna</b>	<b>Externa</b>
Cursos virtuales	200	X	
Internet	120	X	
Licencia de Matlab	60	X	
Impresiones	30	X	
Empastados	30	X	
Imprevistos	20	X	
<b>TOTAL</b>		460	

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

## 4.3. Recursos materiales

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación se utilizó el software Matlab versión R2020a y sus herramientas:

- ✓ Simulink: Sistema de control
- ✓ App Designer: Creación de la interfaz gráfica

Para la validación de datos utilizados en la simulación se utilizó el software Dwsim.

## 4.4. Análisis de los Resultados

### 4.4.1. Caso 1

En las siguientes figuras se observa los datos utilizados para la simulación del separador trifásico de crudo. En este caso para la composición de crudo 1.

Parámetro	Valor	Unidades
Diametro sep (Ds)	10.0000	ft
Longitud A (La)	50.0000	ft
Longitud B (Lb)	10.0000	ft
Altura Barrera (hs)	4.0000	ft
Coef. Válvula V001 (kvw)	564.6700	gpm/psi^0.5
Presion salida V001 (poa)	14.7000	psi
Coef. Válvula V002 (kvc)	614.9000	gpm/psi^0.5
Presión salida V002 (pob)	14.7000	psi
Coef. Válvula V003 (kvg)	80.0000	gpm/psi^0.5
Presión salida V003 (poc)	14.7000	psi
Densidad crudo (rhoc)	40.6222	lb/ft^3
Grav. esp. crudo (sgc)	0.6520	adm
Densidad agua (rhow)	62.2900	lb/ft^3
Grav. esp. agua (sgw)	1.0000	adm
Masa molar gas (mgas)	28.0400	g/mol
Masa molar aire (mair)	28.9600	g/mol
Gravedad (g)	9.8100	m/s^2
Temperatura op. (T)	179.9000	°F

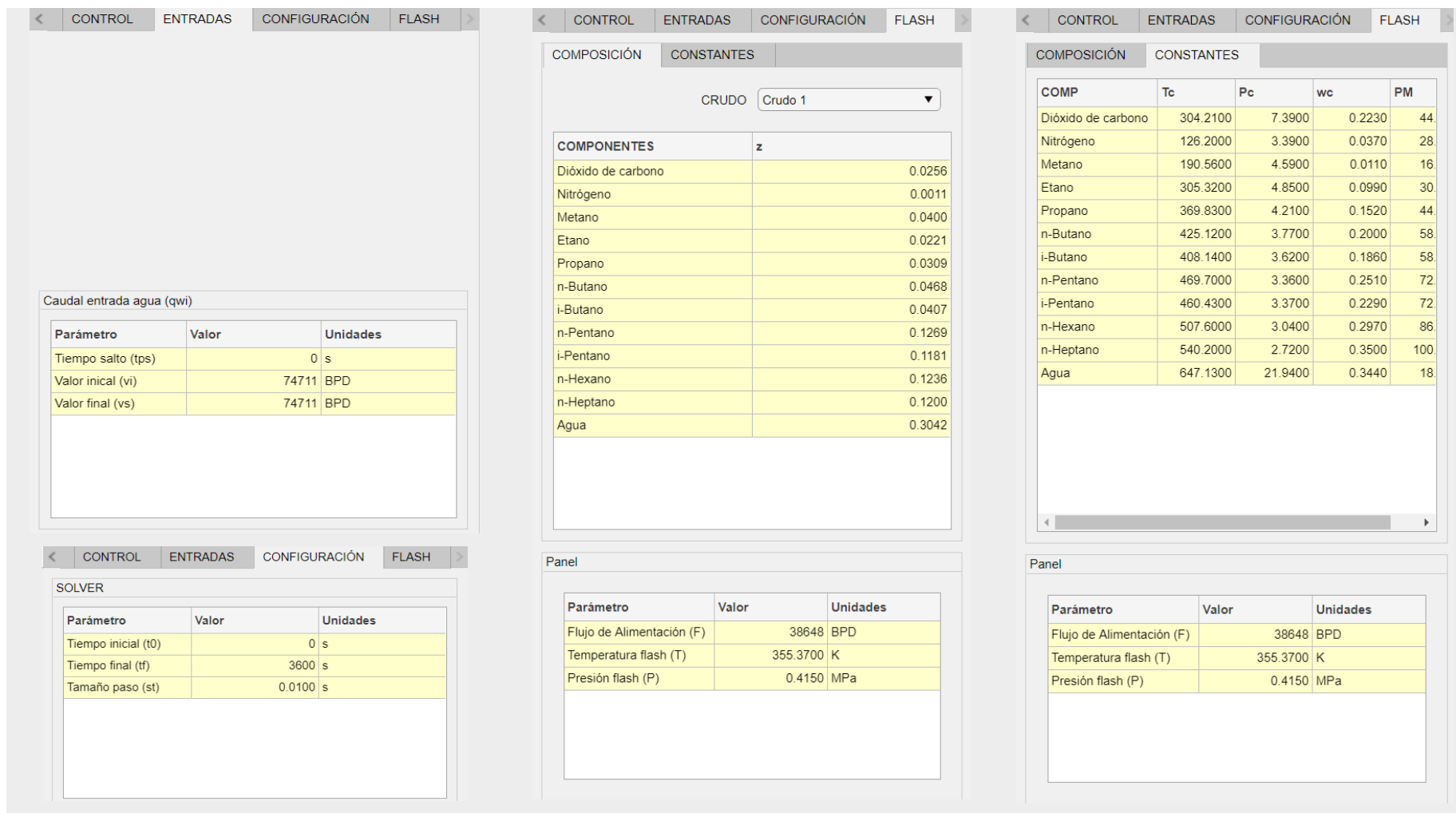
CONDICIONES INICIALES	Parámetro	Valor	Unidades
	Nivel inicial crudo (hc0)	0.1640	ft
	Nivel inicial agua (hw0)	0.1640	ft
	Nivel inicial crudo (hb0)	0.0328	ft
	Presión inicial (pg0)	14.7000	psi

SET POINTS	CONTROLADORES	
Nivel de crudo (hb) Acumulador		
Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo salto (tps)	0	s
Valor inicial (vi)	2.7887	ft
Valor final (vs)	2.7887	ft
Nivel de agua (hw) Separador		
Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo salto (tps)	0	s
Valor inicial (vi)	2.6247	ft
Valor final (vs)	2.6247	ft
Presión de gas (pg)		
Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo salto (tps)	0	s
Valor inicial (vi)	60	psi
Valor final (vs)	60	psi

SET POINTS	CONTROLADORES
PID 1 (Nivel de crudo hb)	
Parámetro	Valor
Const. Proporcional (kp)	-150.0000
Const. Integral (ki)	-0.0120
Const. Diferencial (kd)	-0.0012
Const. Filtro (N)	100.0000
PID 2 (Nivel de agua hw)	
Parámetro	Valor
Const. Proporcional (kp)	-90.0000
Const. Integral (ki)	-0.0100
Const. Diferencial (kd)	-0.0100
Const. Filtro (N)	100.0000
PID 3 (Presión de gas pg)	
Parámetro	Valor
Const. Proporcional (kp)	-0.0050
Const. Integral (ki)	0
Const. Diferencial (kd)	0
Const. Filtro (N)	0

**Figura 1-4:** Parámetros utilizados en la simulación para el caso 1

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.



**Figura 2-4:** Parámetros utilizados en la simulación para el caso 1

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.



**Tabla 3-4:** Constantes de equilibrio y composiciones para el caso 1

Componentes	$k_i$	$x_i$	$y_i$
Dióxido de Carbono	45.83649	0.00218	0.10002
Nitrógeno	296.31638	1.53442e-05	0.00455
Metano	137.16676	0.00119	0.16333
Etano	26.83309	0.00308	0.08255
Propano	7.88704	0.01167	0.09202
n-Butano	2.56449	0.03405	0.08732
i-Butano	3.38795	0.02590	0.08774
n-Pentano	0.93252	0.12898	0.12028
i-Pentano	1.15405	0.11390	0.13144
n-Hexano	0.37075	0.14552	0.05395
n-Heptano	0.15101	0.15061	0.02274
Agua	0.14119	0.38292	0.05407

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

En la tabla 3-4 se observa los resultados obtenidos de los cálculos flash donde se obtiene la constante de equilibrio entre la fase líquido y vapor para cada elemento ( $k_i$ ), dicha constante es útil para el cálculo de las fracciones molares de cada componente en la fase líquida ( $x_i$ ) y las fracciones molares de cada componente en la fase de vapor ( $y_i$ ), y a su vez dichas fracciones serán utilizadas en los cálculos de Peng-Robinson para determinar el flujo de ingreso de crudo ( $L$ ) y flujo de ingreso de gas ( $V$ ).

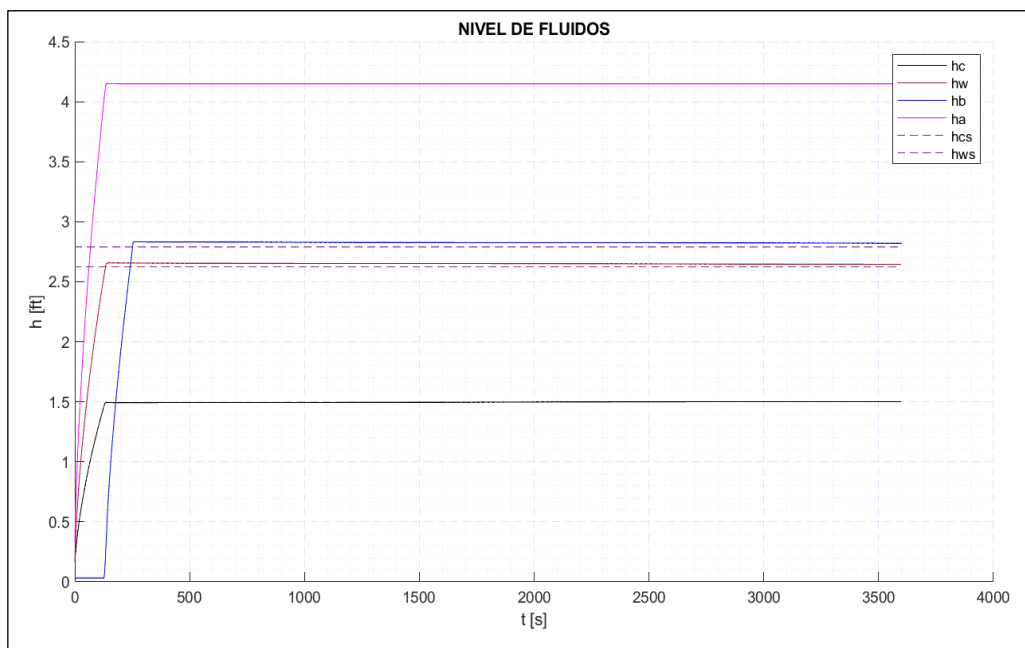
**Tabla 4-4:** Flujos de ingreso para el caso 1

Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidades del S.I.	Valor	Unidades de Campo
Flujo de Agua de entrada	$qw_i$	0.1374	$m^3/s$	74711	BPD
Flujo de Gas de entrada	V	1.3169	$m^3/s$	3.9905	MMSCFD
Flujo de Crudo de entrada	L	0.0537	$m^3/s$	29198	BPD
Densidad del Agua	rhow	998	$kg/m^3$	62.29	$lb/ft^3$
Densidad del Crudo	rhoc	650.7047	$kg/m^3$	40.6222	$lb/ft^3$
Densidad del Gas	rhov	7.4142	$kg/m^3$	0.4629	$lb/ft^3$
Volatilidad	V/F	0.2394	adim	0.2394	adim

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

En la tabla 4-4 se puede observar el flujo de entrada de crudo y flujo de entrada de gas que fueron determinados mediante cálculos flash, además se observa que la densidad del agua es superior a la del crudo, y la del crudo superior a la densidad del gas, es decir desde el fondo del equipo estarán ubicados el agua, crudo y gas.

#### 4.4.1.1. Nivel de los fluidos



**Gráfico 1-4:** Nivel de fluidos en las cámaras del separador

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$h_c$	Nivel de crudo en la cámara de separación
$h_{cs}$	Set point del nivel de crudo en la cámara de separación
$h_w$	Nivel de agua en la cámara de separación
$h_{ws}$	Set point del nivel de agua en la cámara de separación
$h_b$	Nivel de crudo en el colector
$h_a$	Nivel de fluido (agua y crudo) en la cámara de separación

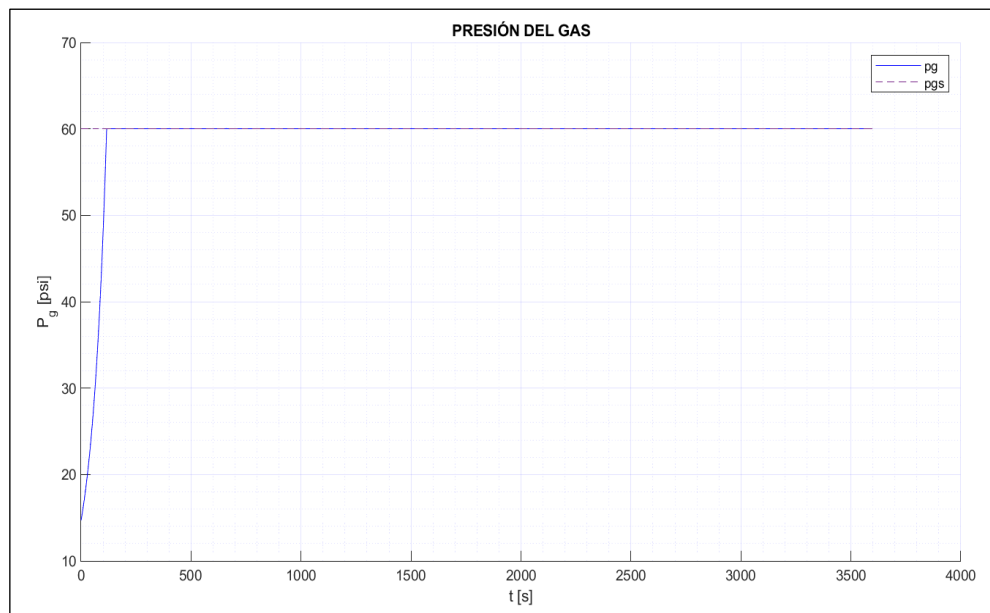
El nivel de agua en la cámara de separación ( $h_w$ ) sube al iniciar la simulación, llegando al estado estacionario a los 138 segundos alcanzando un nivel de  $2.6500 \text{ ft}$  ( $0.807 \text{ m}$ ), la línea entrecortada ( $h_{ws}$ ) representa a su set point cuyo valor es de  $2.6247 \text{ ft}$  ( $0.80 \text{ m}$ ) y se observa que el nivel de agua sobrepasa este valor, pero progresivamente llega al set point por acción de los controladores permitiendo que la válvula de control actúe.

Sobre este colchón de agua se ubicará el crudo, que al igual que el agua sube al iniciar la simulación, a los 139 segundos llega a un nivel de  $1.5 \text{ ft}$  ( $0.457 \text{ m}$ ) donde inicia el efecto cascada, y el crudo separado cae en el colector.

El nivel de fluido en la cámara de separación ( $h_a$ ), es decir tanto crudo como agua, se observa que alcanza un nivel de  $4.16 \text{ ft}$  ( $1.26 \text{ m}$ ), supera a la altura de la barrera que es de  $4 \text{ ft}$  ( $1.21 \text{ m}$ ), también se aprecia una pequeña elevación que representa al efecto cascada.

El nivel de crudo en el colector ( $h_b$ ) sube alcanzando los  $2.83 \text{ ft}$  ( $0.86 \text{ m}$ ) en 256 segundos, es decir ligeramente sobrepasa el set point, pero por acción de los controladores el nivel lentamente baja hasta llegar a su set point ( $h_{bs}$ ) cuyo valor es de  $2.7887 \text{ ft}$  ( $0.85 \text{ m}$ ) y finalmente la válvula de control actúa.

#### 4.4.1.2. Presión del Gas



**Gráfico 2-4:** Presión del gas en el separador

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

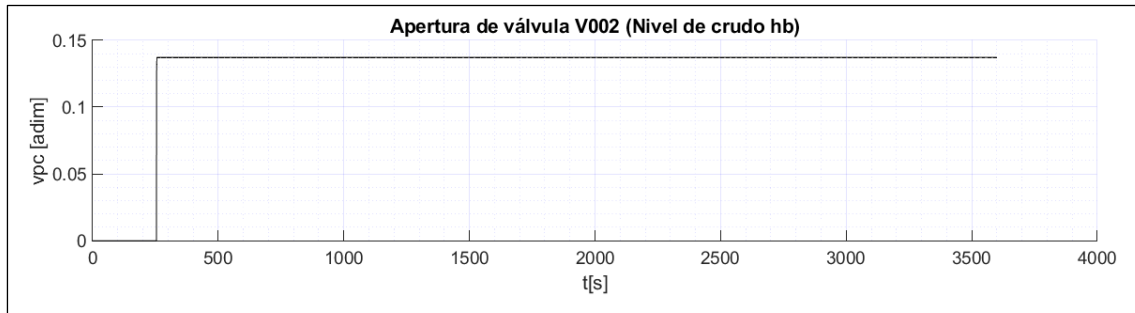
Donde:

$p_g$  Presión de gas en el separador trifásico de crudo

$p_{gs}$  Set point de la presión de gas en el separador trifásico de crudo

En el gráfico se observa que la presión con la que inicia la simulación es de 14.7 PSI (101325 Pa), es decir la presión ambiental y al irse efectuando el proceso de separación de crudo, progresivamente la presión sube hasta llegar a los 60 PSI (413685 Pa) en 116 segundos, la válvula de control de gas actúa ya que esta presión es su set point.

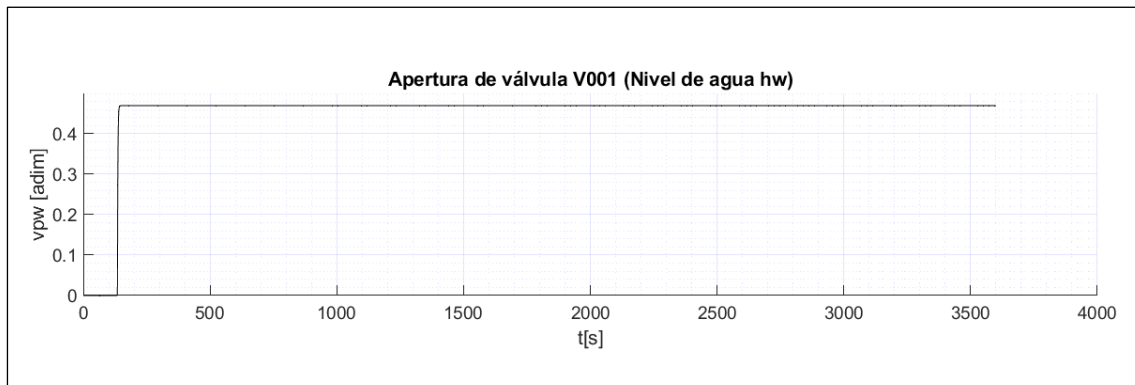
#### 4.4.1.3. Apertura de las válvulas de control



**Gráfico 3-4:** Grado de apertura de la válvula de crudo V002

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

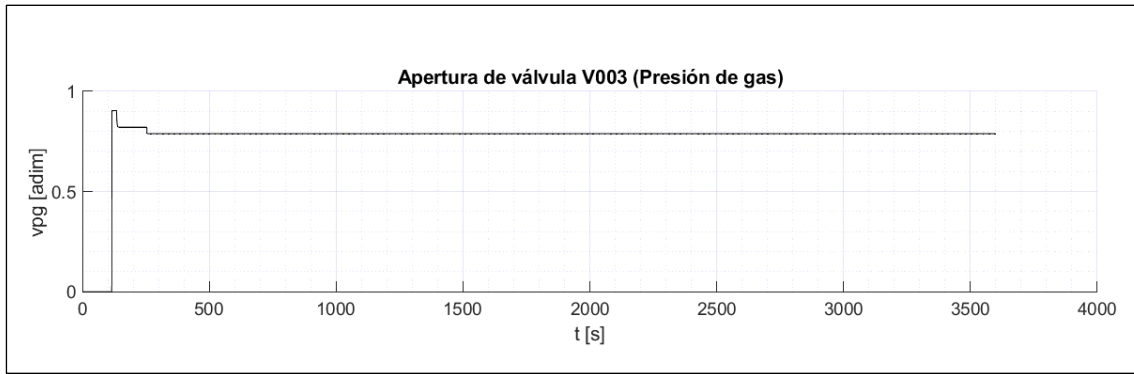
El nivel de crudo en la cámara de crudo o colector es controlado por su válvula V002, como se puede observar en el gráfico 1-4 la curva del nivel de crudo ( $h_b$ ) va decreciendo hasta alcanzar su valor de set point de 2.7887 ft (0.85 m). En el gráfico 3-4 se visualiza que a los 256 segundos la válvula actúa abriéndose al 13% permitiendo la salida de crudo separado hacia los tanques de almacenamiento.



**Gráfico 4-4:** Grado de apertura de la válvula de agua V001

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021

El nivel de agua en la cámara de separación es controlado por su válvula V001, como se puede observar en el gráfico 1-4 la curva del nivel de agua ( $h_w$ ) va decreciendo hasta alcanzar su valor de set point de 2.6247 ft (0.80 m), por dicha razón en el gráfico 4-4 se visualiza que a los 138 segundos la válvula actúa abriéndose al 46% permitiendo la salida de agua que se ubica en el fondo del equipo hacia los tanques de almacenamiento.



**Gráfico 5-4:** Grado de apertura de la válvula de gas V003

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

La presión del gas dentro del separador es controlada por su válvula V003, como se visualizó en el gráfico 1-4 la curva de la presión  $p_g$  llega a su valor de set point de 60 PSI (413685 Pa), y por ello en el gráfico 5-4 se observa que a los 116 segundos la válvula se abre hasta el 90%, permitiendo la salida de gas, finalmente la apertura de la válvula se estabiliza en 78 % a los 255 segundos.

#### 4.4.1.4. Caudal de los líquidos



**Gráfico 6-4:** Caudal de entrada y salida de líquidos del separador

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$q_{ci}$	Caudal de crudo de ingreso a la cámara de separación
$q_{wi}$	Caudal de agua de ingreso a la cámara de separación
$q_{ca}$	Caudal de crudo de ingreso al vertedero (Efecto cascada)
$q_{cb}$	Caudal de crudo de salida del colector, controlado por la válvula de crudo
$q_{wo}$	Caudal de agua de salida de la cámara de separación, controlado por la válvula de agua

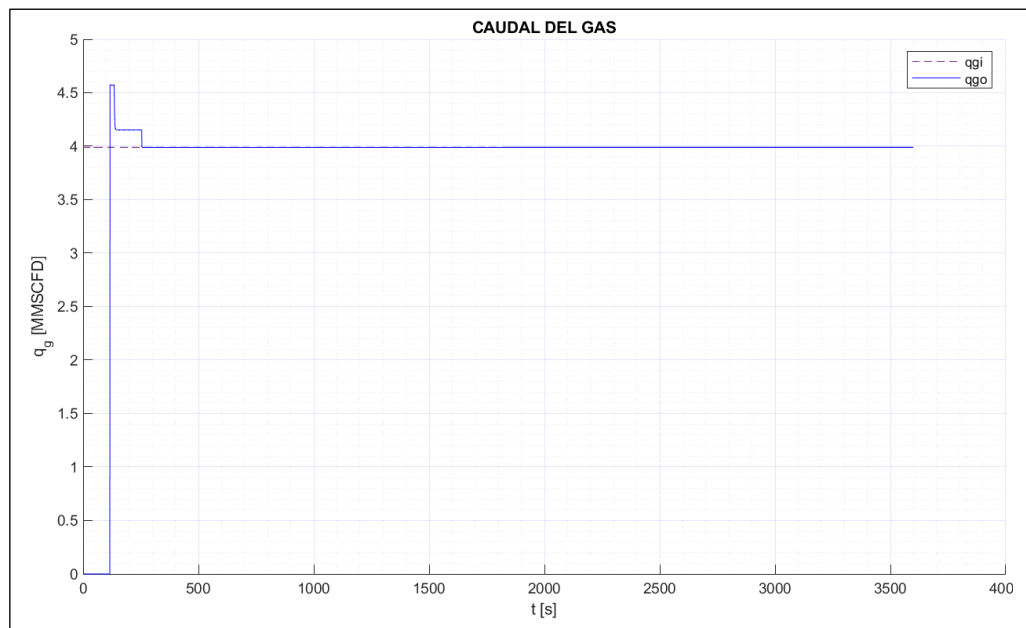
En el gráfico se observan los caudales de los líquidos, es decir tanto crudo como de agua, el caudal de salida de agua es igual al caudal de ingreso, es decir  $q_{wo} = q_{wi}$  siendo este de 74711 BPD ( $0.1374 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Se observa una pequeña curva de crecimiento y decrecimiento que representa al caudal de crudo separado que se encuentra en la cámara de separación y que por efecto cascada cae al colector ( $q_{ca}$ ), teniendo un caudal de 30130 BPD ( $0.0554 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

El caudal de crudo que cae por efecto cascada es igual al caudal de crudo de salida del separador, siendo de 29198 BPD ( $0.0537 \text{ m}^3/\text{s}$ ), esto ocurre a los 256 segundos.

En las líneas entrecortadas de la gráfica se puede observar que  $q_{wo} = q_{wi}$  y  $q_{cb} = q_{ci}$  esto debido a que se llega al estado estacionario.

#### 4.4.1.5. Caudal del Gas



**Gráfico 7-4:** Caudal de entrada y salida de gas del separador

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

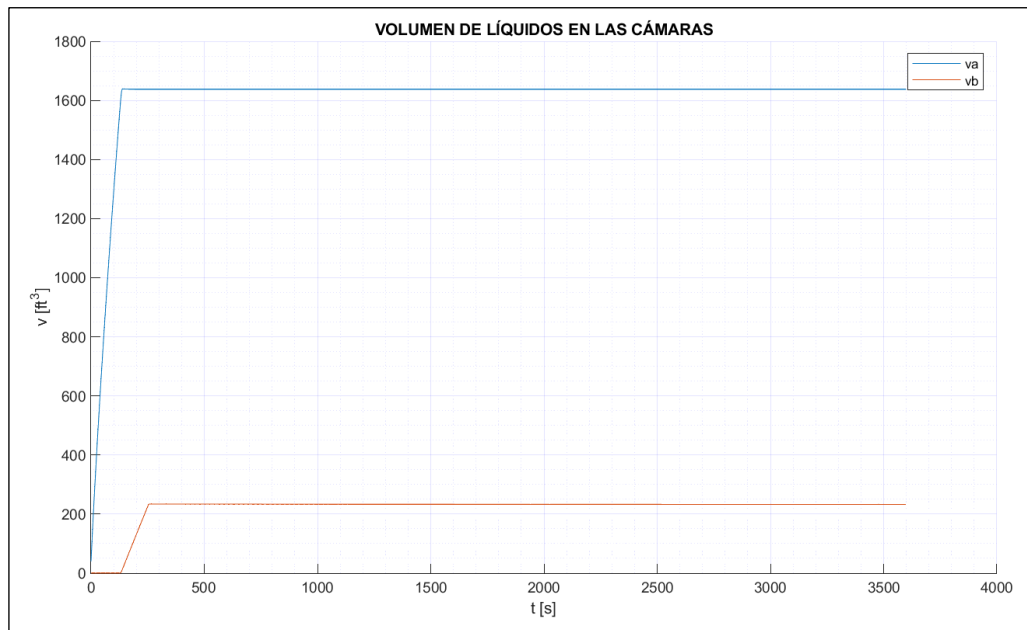
$q_{gi}$  Caudal del gas de ingreso al separador

$q_{go}$  Caudal del gas de salida al separador

En el gráfico se puede observar el caudal del gas de ingreso determinado en cálculos flash, a los 116 segundos tiene un caudal de caudal de 4.57 MMSCFD ( $1.51 \text{ m}^3/\text{s}$ ), pero progresivamente baja hasta alcanzar un caudal constante de 3.99 MMSCFD ( $1.32 \text{ m}^3/\text{s}$ ), Además, el caudal de ingreso es igual al caudal de salida ( $q_{gi} = q_{go}$ ), debido a que se llega al estado estacionario.



#### 4.4.1.6. Volumen de los líquidos en las cámaras del separador



**Gráfico 8-4:** Volumen de líquidos en la cámara de separación y colector

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

Donde:

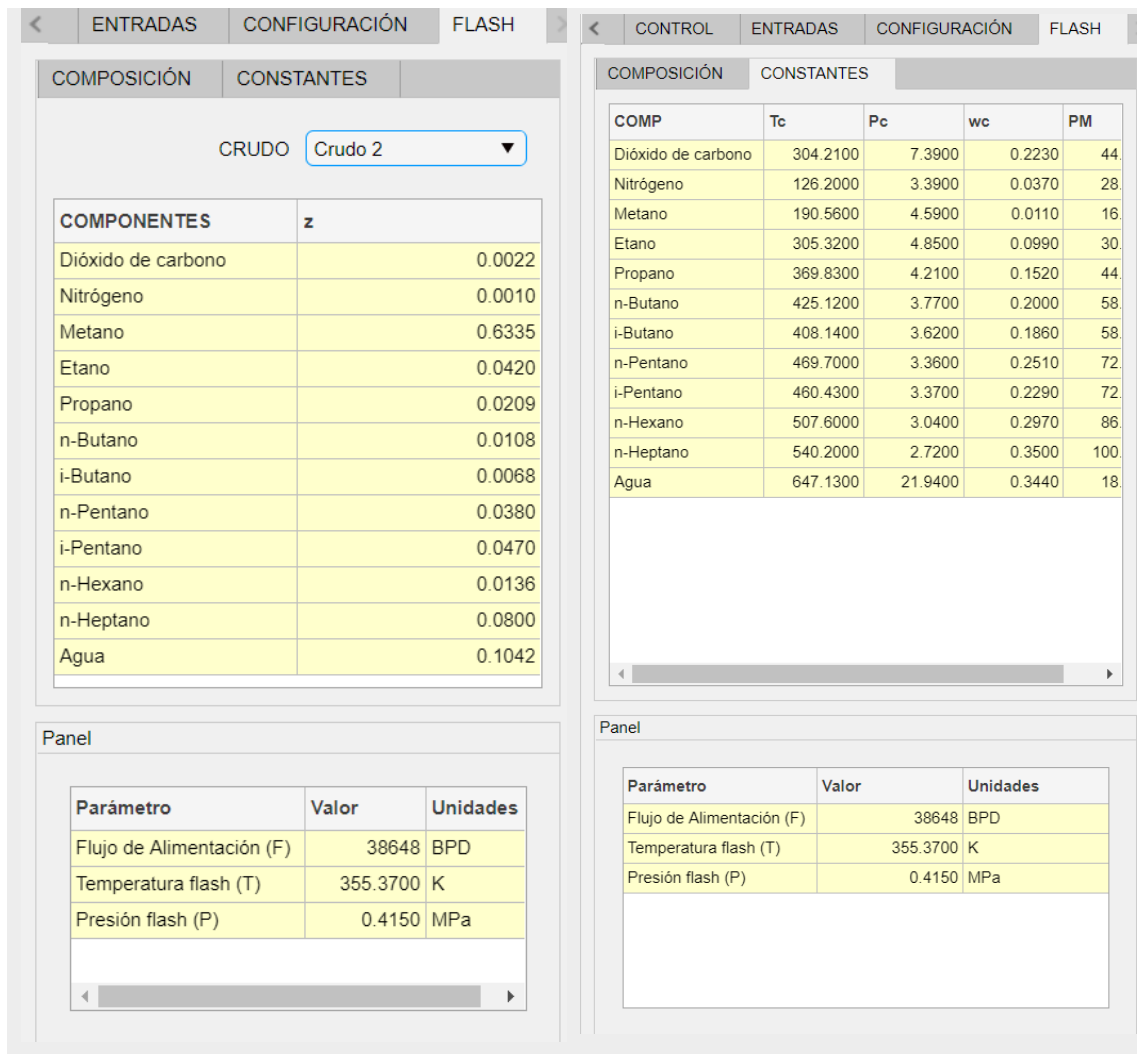
$v_a$  Volumen de la cámara de separación

$v_b$  Volumen del colector de crudo

Al momento de iniciar la simulación la cámara de separación empieza a llenarse con los líquidos y gas de estudio, el volumen tanto de crudo como de agua que hay en la cámara (a) es de 1639  $ft^3$  ( $46.38 m^3$ ), y a los 139 segundos el crudo separado cae en el colector o vertedero y esta cámara (b) comienza a llenarse hasta un volumen de 234  $ft^3$  ( $6.63 m^3$ ).

#### 4.4.2. Caso 2

En el siguiente gráfico se observa los datos utilizados para la simulación del separador trifásico de crudo. Los parámetros del primer caso son iguales al segundo diferenciándose únicamente en la composición de crudo 2.



**Figura 3-4:** Parámetros utilizados en la simulación para el caso 2

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

**Tabla 5-4:** Constantes de equilibrio y composiciones para el caso 2

Componentes	$k_i$	$x_i$	$y_i$
Dióxido de Carbono	45.83649	5.19458E-05	0.00238
Nitrógeno	296.31638	3.65812E-06	0.00108
Metano	137.16676	0.00500	0.68646
Etano	26.83309	0.00169	0.04540
Propano	7.88704	0.00284	0.02242
n-Butano	2.56449	0.00442	0.01134
i-Butano	3.38795	0.00212	0.00719
n-Pentano	0.93252	0.04052	0.03779
i-Pentano	1.15405	0.04115	0.04749
n-Hexano	0.37075	0.03241	0.01202
n-Heptano	0.15101	0.36867	0.05567
Agua	0.14119	0.50111	0.07075

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

En la tabla 5-4 se observa los resultados obtenidos de los cálculos flash donde se obtiene la constante de equilibrio entre la fase líquido y vapor para cada elemento ( $k_i$ ), dicha constante es útil para el cálculo de las fracciones molares de cada componente en la fase líquida ( $x_i$ ) y las fracciones molares de cada componente en la fase de vapor ( $y_i$ ), y a su vez dichas fracciones serán utilizadas en los cálculos de Peng-Robinson para determinar el flujo de ingreso de crudo ( $L$ ) y flujo de ingreso de gas ( $V$ ).

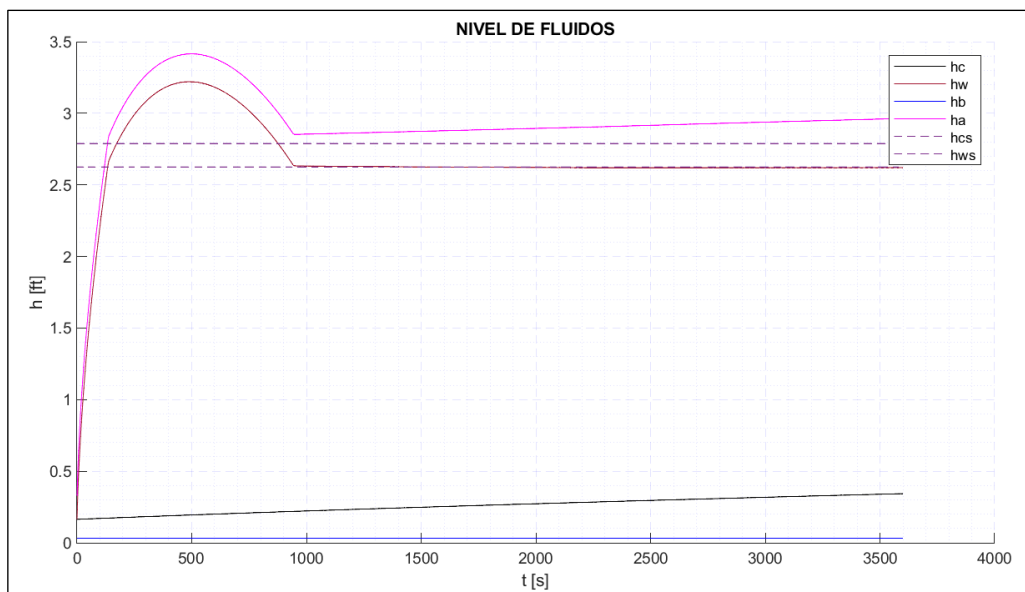
**Tabla 6-4:** Flujos de ingreso para el caso 2

Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidades del S.I.	Valor	Unidades de Campo
Flujo de Agua de entrada	$q_{w_i}$	0.1374	$m^3/s$	74711	BPD
Flujo de Gas de entrada	V	0.06594	$m^3/s$	0.1999	MMSCFD
Flujo de Crudo de entrada	L	6.6190e-5	$m^3/s$	35.9766	BPD
Densidad del Agua	rho <sub>w</sub>	998	$kg/m^3$	62.29	lb/ft <sup>3</sup>
Densidad del Crudo	rho <sub>c</sub>	666.5141	$kg/m^3$	41.6091	lb/ft <sup>3</sup>
Densidad del Gas	rho <sub>v</sub>	4.1092	$kg/m^3$	0.2565	lb/ft <sup>3</sup>
Volatilidad	V/F	0.9223	adim	0.9223	adim

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

En la tabla se puede observar el flujo de entrada de crudo y flujo de entrada de gas que fueron determinados mediante cálculos flash, además se observa que la densidad del agua es superior a la del crudo, y la del crudo superior a la densidad del gas, es decir desde el fondo del equipo estarán ubicados el agua, crudo y gas.

#### 4.4.2.1. Nivel de los fluidos



**Gráfico 9-4:** Nivel de fluidos en las cámaras del separador

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$h_c$	Nivel de crudo en la cámara de separación
$h_{cs}$	Set point del nivel de crudo en la cámara de separación
$h_w$	Nivel de agua en la cámara de separación
$h_{ws}$	Set point del nivel de agua en la cámara de separación
$h_b$	Nivel de crudo en el colector
$h_a$	Nivel de fluido (agua y crudo) en la cámara de separación

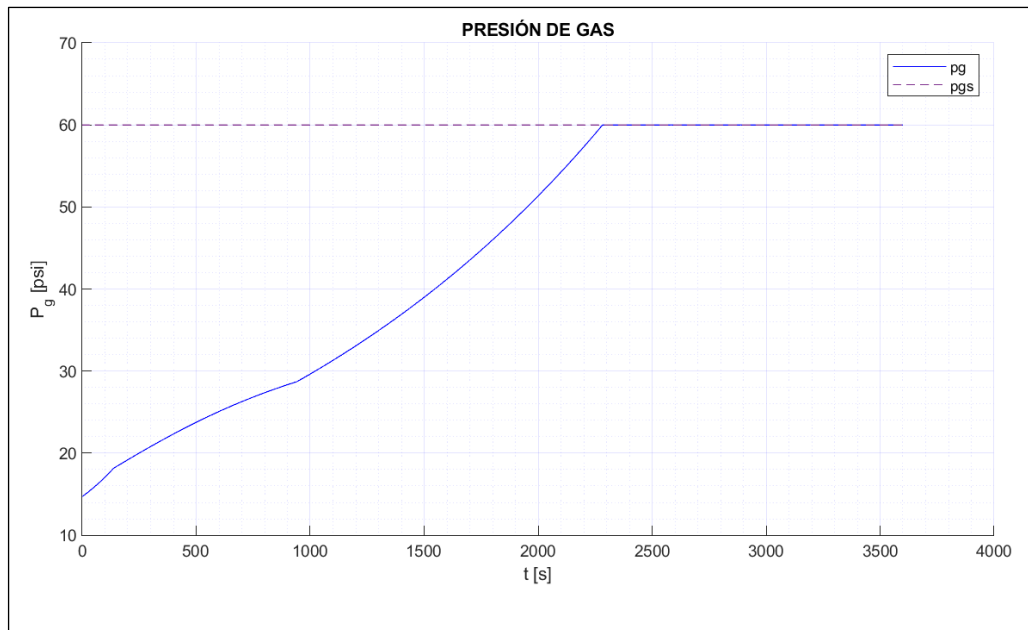
El nivel de agua en la cámara de separación ( $h_w$ ) sube al iniciar la simulación, llegando a un nivel de  $3.21 \text{ ft}$  ( $0.98 \text{ m}$ ), a los 945 segundos alcanza un nivel de  $2.634 \text{ ft}$  ( $0.807 \text{ m}$ ), la línea entrecortada ( $h_{ws}$ ) representa su set point cuyo valor es de  $2.6247 \text{ ft}$  ( $0.80 \text{ m}$ ) y se observa que el nivel de agua llega a este valor permitiendo que la válvula de control actúe.

Sobre este colchón de agua se ubicará el crudo ( $h_c$ ), que al igual que el agua sube al iniciar la simulación, a los 3600 segundos llega a un nivel de  $0.34 \text{ ft}$  ( $0.10 \text{ m}$ ) pero el efecto cascada aún no se lleva a cabo, es decir el crudo separado no cae en el colector.

El nivel de fluido en la cámara de separación ( $h_a$ ), es decir tanto crudo como agua, se observa que alcanza un nivel de  $3.41 \text{ ft}$  ( $1.04 \text{ m}$ ), no supera a la altura de la barrera que es de  $4 \text{ ft}$  ( $1.21 \text{ m}$ ), pero el nivel de fluido lentamente crece.

El nivel de crudo en el colector ( $h_b$ ) no sube, su nivel permanece en su condición inicial de simulación cuyo valor es  $0.0328 \text{ ft}$  ( $0.01 \text{ m}$ ), es decir no llega el set point, la válvula de control no actúa. Esto se efectúa porque más del 50% de la composición de crudo se encuentra en estado gaseoso, y la cantidad de crudo a separarse es poca, lo cual significa que se necesita de un mayor tiempo de simulación para que el colector empiece a llenarse.

#### 4.4.2.2. Presión del Gas



**Gráfico 10-4:** Presión del gas en el separador

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

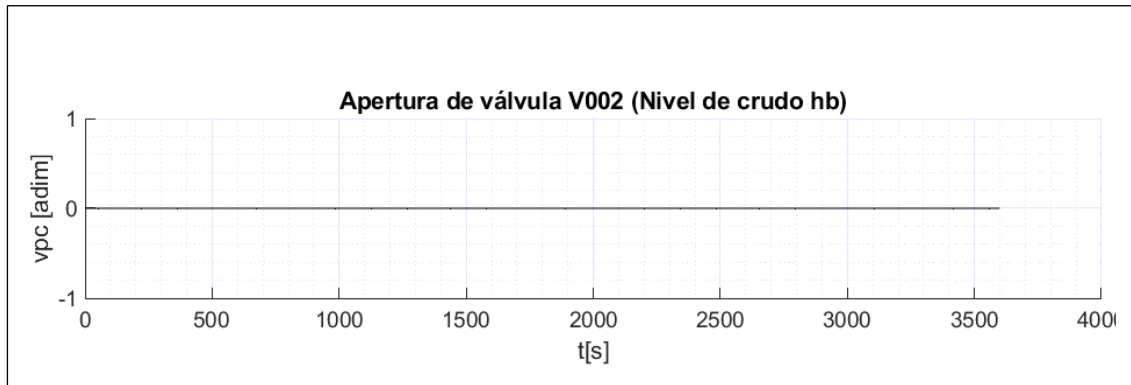
Donde:

$p_g$  Presión de gas en el separador trifásico de crudo

$p_{gs}$  Set point de la presión de gas en el separador trifásico de crudo

En el gráfico se observa que la presión con la que inicia la simulación es de 14.7 PSI (101325 Pa), es decir la presión ambiental. La composición de crudo contiene gran cantidad de gas, y dentro del separador tiende a comprimirse por lo que progresivamente la presión sube hasta llegar a los 60 PSI (413685 Pa) en 2298 segundos, la válvula de control de gas actúa ya que esta presión es su set point.

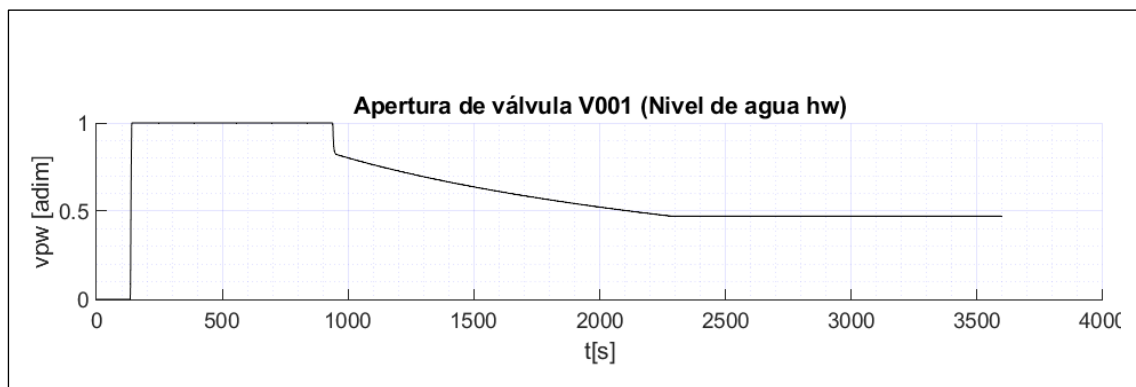
#### 4.4.2.3. Apertura de las válvulas de control



**Gráfico 11-4:** Grado de apertura de la válvula de crudo V002

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

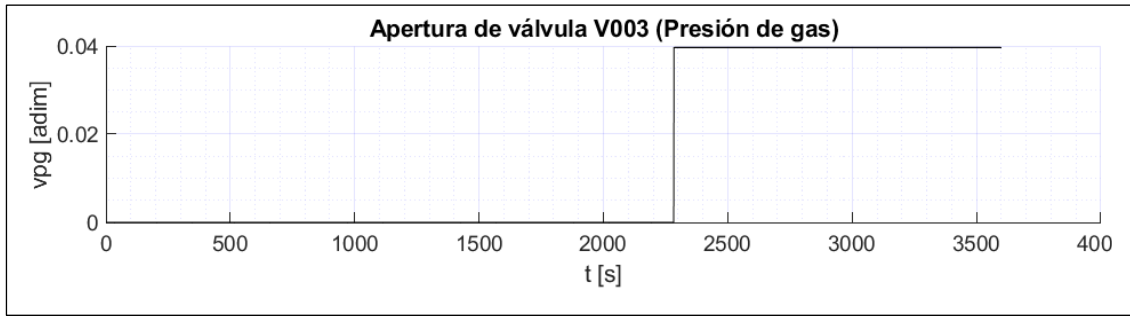
El nivel de crudo en la cámara de crudo o colector es controlado por su válvula V002, como se puede observar en el gráfico 9-4 la curva del nivel de crudo ( $h_b$ ) no crece sin alcanzar su valor de set point de  $2.7887 \text{ ft}$  ( $0.85 \text{ m}$ ), por ello en el gráfico 11-4 se visualiza que la válvula permanece cerrada ya que aún no existe la acumulación necesaria de crudo.



**Gráfico 12-4:** Grado de apertura de la válvula de agua V001

**Realizado por:** Guanga, Daniela, 2021.

El nivel de agua en la cámara de separación es controlado por su válvula V001, como se puede observar en el gráfico 9-4 la curva del nivel de agua ( $h_w$ ) va decreciendo hasta alcanzar su valor de set point de  $2.6247 \text{ ft}$  ( $0.80 \text{ m}$ ), y en el gráfico 12-4 se visualiza que a los 134 segundos la válvula actúa abriéndose al 100% permitiendo la salida de agua, este porcentaje se estabiliza a los 2293 segundos al 47%.

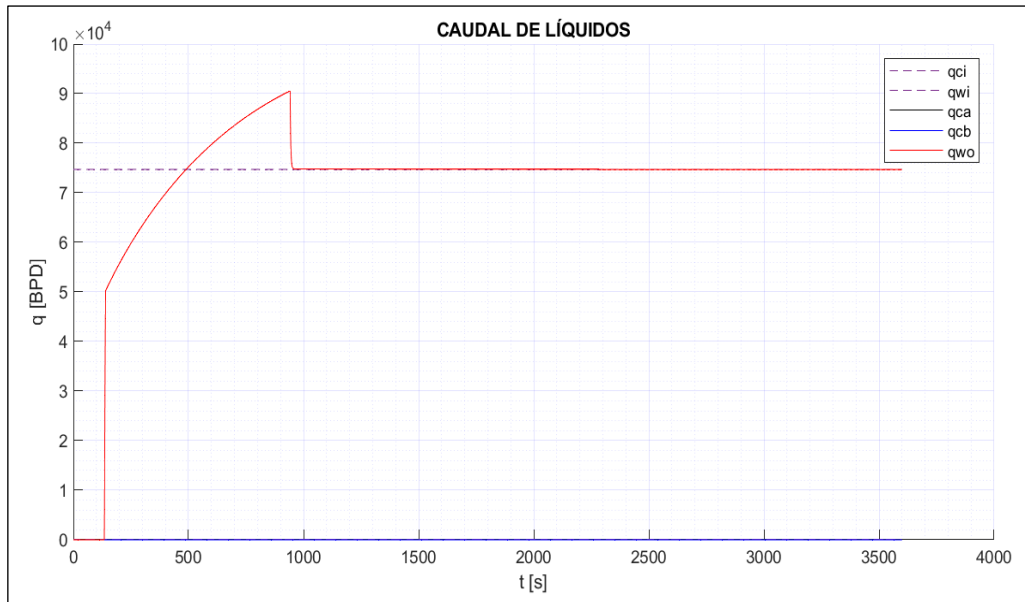


**Gráfico 13-4:** Grado de apertura de la válvula de gas V003

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

La presión del gas dentro del separador es controlada por su válvula V003, como se visualizó en el gráfico 9-4 la curva de la presión  $p_g$  llega a su valor de set point de 2.6247 ft (0.80 m), y en el gráfico 13-4 se observa que a los 2298 segundos la válvula se abre al 4%, permitiendo la salida de gas.

#### 4.4.2.4. Caudal de los líquidos



**Gráfico 14-4:** Caudal de entrada y salida de líquidos del separador

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$q_{ci}$  Caudal de crudo de ingreso a la cámara de separación

$q_{wi}$  Caudal de agua de ingreso a la cámara de separación



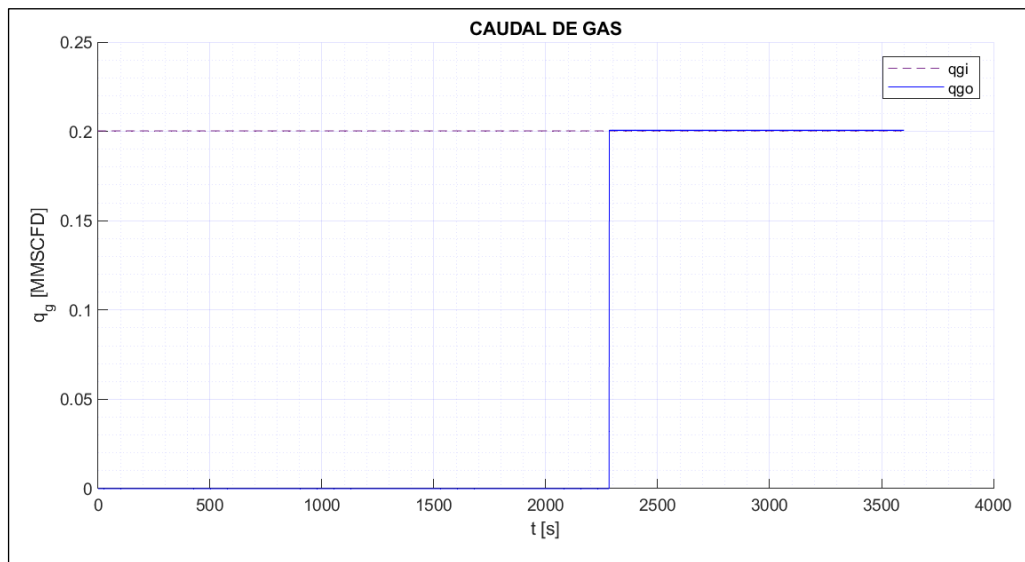
$q_{ca}$	Caudal de crudo de ingreso al vertedero (Efecto cascada)
$q_{cb}$	Caudal de crudo de salida del colector, controlado por la válvula de crudo
$q_{wo}$	Caudal de agua de salida de la cámara de separación, controlado por la válvula de agua

En el gráfico se observan los caudales de los líquidos, es decir tanto crudo como de agua, el caudal de salida de agua es igual al caudal de ingreso, es decir  $q_{wo} = q_{wi}$  siendo este de 74711 BPD ( $0.1374 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Se observa una despreciable recta ( $q_{ca}$ ), que representa al caudal de crudo separado en la cámara de separación y que al no superar la barrera no cae por efecto cascada al colector. Este caudal que está llenándose en la cámara de separación tiene un caudal de 36 BPD ( $6.624e - 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

No hay caudal de crudo de salida que cae por efecto cascada hacia el colector ( $q_{cb}$ ).

#### 4.4.2.5. Caudal del Gas



**Gráfico 15-4:** Caudal de entrada y salida de gas del separador

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

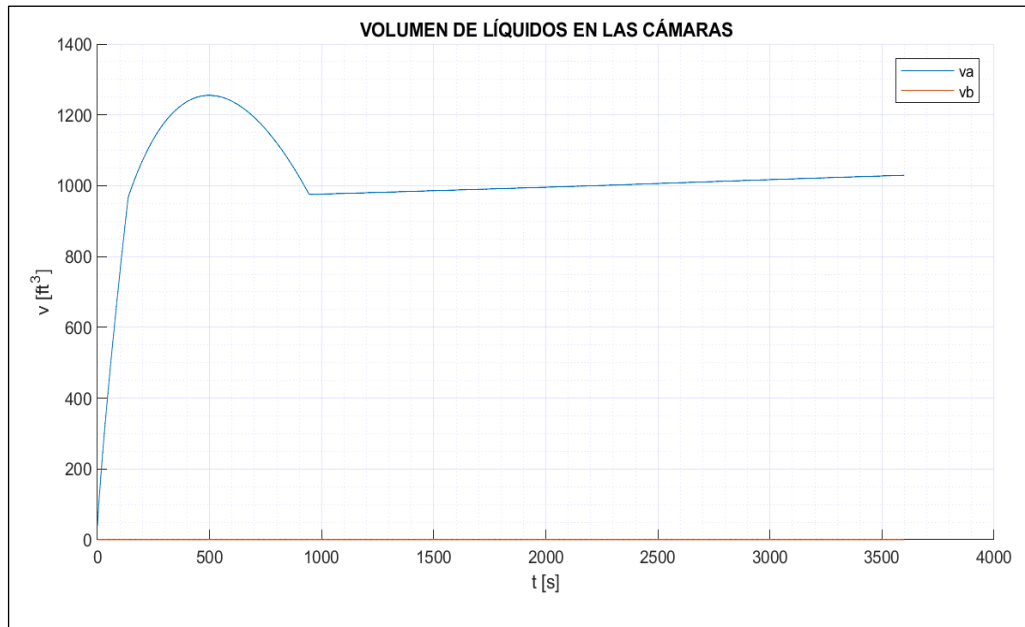
Donde:

$q_{gi}$  Caudal del gas de ingreso al separador

$q_{go}$  Caudal del gas de salida al separador

En el gráfico se puede observar el caudal del gas de ingreso determinado en cálculos flash, a los 2298 segundos tiene un caudal de 0.1999 MMSCFD ( $0.066 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Además, el caudal de ingreso es igual al caudal de salida ( $q_{gi} = q_{go}$ ), debido a que se llega al estado estacionario.

#### 4.4.2.6. Volumen de los líquidos en las cámaras del separador



**Gráfico 16-4:** Volumen de líquidos en la cámara de separación y colector

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

Donde:

$v_a$  Volumen de la cámara de separación

$v_b$  Volumen del colector de crudo

Al momento de iniciar la simulación la cámara de separación empieza a llenarse con los líquidos y gas de estudio, el volumen inicial de crudo y agua en la cámara (a) es de  $1247 \text{ ft}^3 (35.31 \text{ m}^3)$ , y a los 966 segundos este volumen disminuye a  $964 \text{ ft}^3 (27.29 \text{ m}^3)$ , pero progresivamente aumenta ya que el volumen de crudo lentamente crece. No hay volumen en la cámara (b), debido a que el crudo no supera la barrera y no cae en el colector.

#### 4.4.3. App que será utilizada como herramienta didáctica

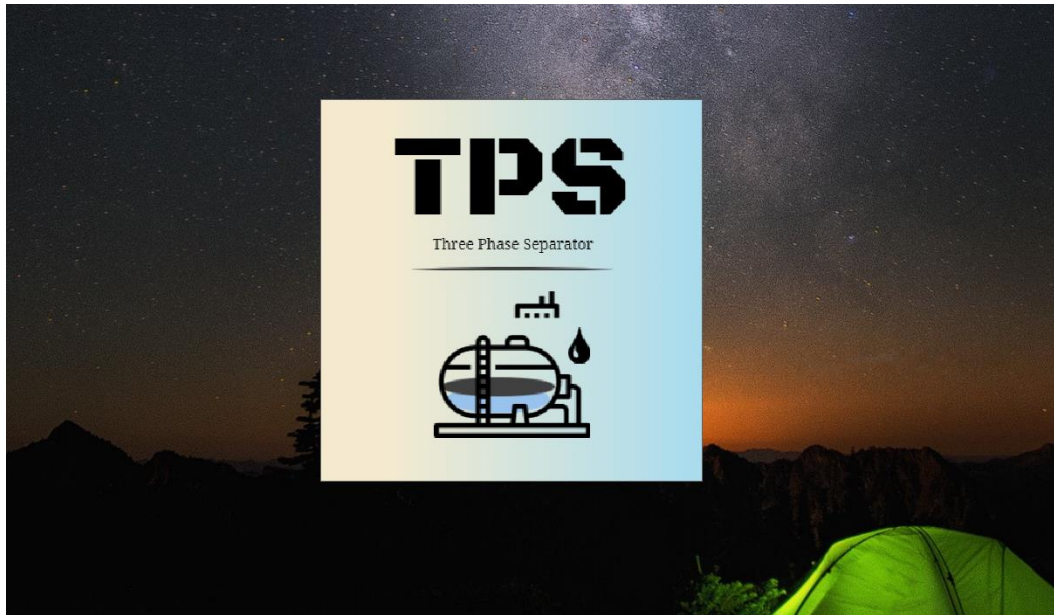


Figura 4-4: Ejecución de la aplicación TPS

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

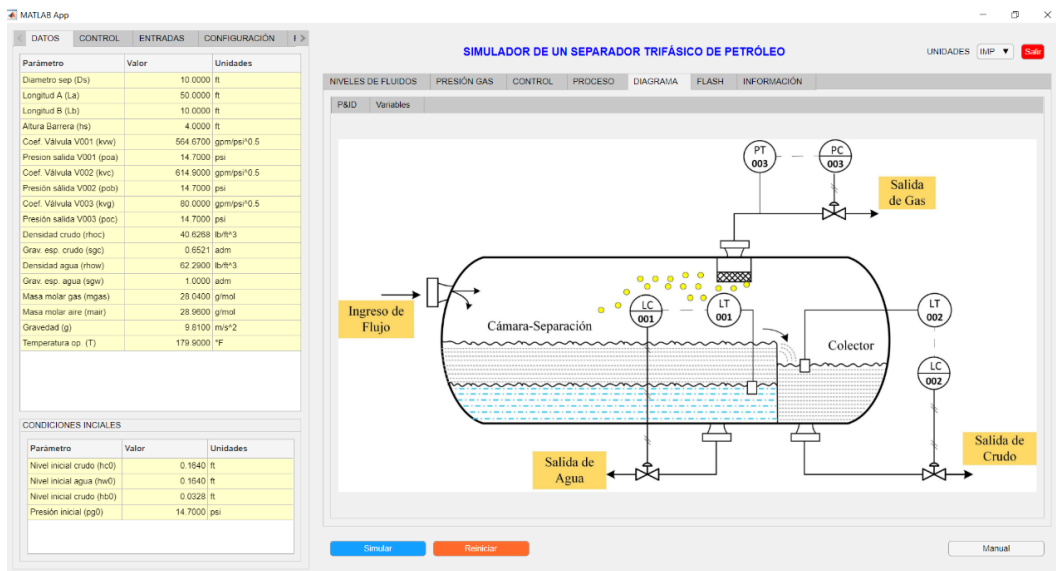


Figura 5-4: Ventanas de la aplicación TPS

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021.

#### 4.4.4. Validación de flujos de ingreso y composiciones en la fase líquida y vapor

El simulador de procesos Dwsim arroja resultados de las composiciones en las fases líquida y vapor, y los flujos volumétricos de crudo y gas, los mismos que son comparados con los resultados de Matlab, se aplica la fórmula de error cuadrático medio MSE, el mismo que sirve para

determinar la diferencia entre los valores reales (resultados de Dwsim) y los valores estimados (resultados de Matlab). Se valida el caso número 2.

**Tabla 7-4:** Validación de las composiciones de la fase líquida y vapor

$x_i$ DWSIM	$x_i$ MATLAB	Error cuadrático	$y_i$ DWSIM	$y_i$ MATLAB	Error cuadrático
4.81271E-08	5.19458E-05	2.69E-09	0.00238	0.00238	0.00E+00
2.18760E-08	3.65812E-06	1.32E-11	0.00108	0.00108	0.00E+00
2.57810E-05	0.00500	2.47E-05	0.68507	0.68646	1.93E-06
1.77075E-06	0.00169	2.85E-06	0.04542	0.04540	4.00E-10
0.00281	0.00284	9.00E-10	0.02237	0.02242	2.50E-09
0.00438	0.00442	1.60E-09	0.01132	0.01134	4.00E-10
0.00210	0.00212	4.00E-10	0.00718	0.00719	1.00E-10
0.04046	0.04052	3.60E-09	0.03780	0.03779	1.00E-10
0.04103	0.04115	1.44E-08	0.04749	0.04749	0.00E+00
0.03270	0.03241	8.41E-08	0.01205	0.01202	9.00E-10
0.37096	0.36867	5.24E-06	0.05631	0.05567	4.10E-07
0.50552	0.50111	1.94E-05	0.07153	0.07075	6.08E-07
<b>MSE</b>		4.37E-06	<b>MSE</b>		2.46E-07

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

**Tabla 8-4:** Validación de los flujos de entrada al separador

Flujo de Crudo (L) DWSIM	Flujo de Crudo (L) MATLAB	Error cuadrático medio MSE	Flujo de Gas (V) DWSIM	Flujo de Gas (V) MATLAB	Error cuadrático medio MSE
6.0034e-05	6.6190e-05	3.79E-11	0.07104	0.06594	2.60E-05

Realizado por: Guanga, Daniela, 2021

## CONCLUSIONES

- Se desarrolló el modelado, simulación y control del separador trifásico de crudo utilizando el software Matlab y sus herramientas, Simulink se lo utilizó para la programación del sistema de control, y en App Designer se diseñó y creó una aplicación con ejecución independiente de Matlab, esta aplicación será utilizada como herramienta didáctica en la cátedra de Ingeniería de Petróleos u otra asignatura que así lo considere necesario en el aprendizaje del usuario.
- Se modeló matemáticamente el proceso de separación utilizando programación funcional en Matlab, para ello se consideraron los parámetros estructurales, condiciones de operación, propiedades de los fluidos como son el agua, crudo y gas, parámetros de las válvulas de control y flujos volumétricos del agua, crudo y gas que fueron determinados mediante cálculos flash y validados utilizando el paquete termodinámico Wilson del simulador Dwsim. El error cuadrático medio entre el flujo de crudo (L) (resultados de Dwsim) y el flujo de crudo (L) (resultados de Matlab) fue de  $3.79E-11$ , mientras que el error entre el flujo de gas (V) (resultados de Dwsim) y el flujo de gas (V) (resultados de Matlab) fue de  $2.60e-05$ . Una vez definido los parámetros se formularon las ecuaciones diferenciales cuyos resultados son variaciones del nivel de los fluidos y presión del gas.
- Se programó el sistema de control del separador utilizando Simulink, en esta herramienta se creó un diagrama conectado con el modelo de Matlab, el mismo que ayudó al control de 3 variables: nivel de agua en la cámara de separación ( $h_w$ ) en el que se utilizó un controlador PID, el nivel de crudo en el colector ( $h_b$ ) en el que también se trabajó con un controlador PID y para el control de la presión ( $p_g$ ) se aplicó un controlador Proporcional. Estos controladores son los encargados de ajustar la señal al valor de set point permitiendo que las 3 válvulas de control actúen.
- Se elaboró un manual que servirá como guía de usuario, el mismo que contiene una serie de pasos a seguir para la instalación de la Aplicación en el ordenador, en el documento se puede visualizar una breve descripción del equipo y las diferentes pantallas con las que el usuario ha de interactuar, además una vez instalada la *app* hay un acceso directo a este manual.

## **RECOMENDACIONES**

- Desarrollar una búsqueda y análisis exhaustivo de las diferentes ecuaciones que determinan el proceso debido a que hay una gran cantidad de variables involucradas para la simulación.
- Analizar entre varias metodologías para el cálculo de los flujos de crudo y gas a partir de la composición del petróleo.
- Simular el proceso desde las condiciones del estado estacionario.

## BIBLIOGRAFÍA

**ACHARYA, T., & CASIMIRO, L.** “Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics”. *Journal of Ocean Engineering and Science* [en línea], 2020, (United States of America) 5(3), pp. 261-268. [Consulta: 09 marzo 2021]. ISSN 24680133. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.11.005>

**AGENCIA INTERNACIONAL PARA INVESTIGACIÓN DEL CÁNCER.** “Evaluación del riesgo cancerígeno para los humanos. Exposiciones ocupacionales en refinación de petróleo; petróleo crudo y principales combustibles derivados del petróleo”. *International Agency for Research on Cancer* [en línea], 1988, (Francia) 45, pp. 331. [Consulta: 19 febrero 2021]. ISSN: 0250-9555. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK531269/#>

**AL-MHANNA, N.** “Simulation of High Pressure Separator Used in Crude Oil Processing”. *Processes* [en línea], 2018, (Omán) 6(11), pp. 1-14. [Consulta: 27 febrero 2021]. ISSN 2227-9717. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr6110219>

**ARNOLD, K., & STEWART, M.** *Chapter 5 - Three-Phase Oil and Water Separation.* [en línea]. Tercera. Burlington -USA: Gulf Professional Publishing, 2008a. [Consulta: 09 marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-075067853-7.50008-9>

**ARNOLD, K., & STEWART, M.** *Chapter 4 - Two-Phase Oil and Gas Separation.* [en línea]. Tercera. Burlington -USA: Gulf Professional Publishing, 2008b. [Consulta: 09 marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-075067853-7.50007-7>

**ASAMBLEA NACIONAL DEL ECUADOR.** “Constitución de la República del Ecuador”. *Registro Oficial* [en línea], 2008, (Ecuador) (449), pp. 12-138. [Consulta: 30 mayo 2021]. Disponible en: [www.lexis.com.ec](http://www.lexis.com.ec)

**ASAMBLEA NACIONAL DEL ECUADOR.** “Código Orgánico De La Economía Social De Los Conocimientos, Creatividad E Innovación”. *Registro Oficial* [en línea], 2016, (Ecuador) IV(899), pp. 29. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: <http://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/ec/ec075es.pdf>

**ATAURIMA, M.** *Matlab & Simulink para Ingeniería.* Lima-Perú: Universidad de Ciencias y Humanidades, 2013. pp. 7-123

**ATTAWAY, S.** *MATLAB una introducción práctica a la programación y la resolución de problemas* [en línea]. Quinta. Boston-USA: Elsevier, 2019. [Consulta: 11 marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02955-5>

**BENÍTEZ ORELLANA, Verónica Gabriela, & OLMEDO ARCE, Pablo Vicente.** Diseño De Un Separador De Producción Trifásico Horizontal Para El Campo Secoya Del Distrito Amazónico [en línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito-Ecuador. 2011, pp. 13. [Consulta: 8 marzo 2021]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4424>

**BOTELLO, A.** *Golfo de México: Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias.* [en línea]. Segunda. Campeche-México: Universidad Autónoma de Tabasco, 2005. [Consulta: 26 junio 2021]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=WwuryOF1jUEC&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.ec/books?id=WwuryOF1jUEC&source=gbs_navlinks_s)

**CHÁVEZ CALDERÁN, Jairo Leonel.** Diseño y Simulación de Separadores Horizontal y Vertical de tres fases [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad de las Fuerzas Armadas, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Quito-Ecuador. 2015, pp. 20. [Consulta: 8 noviembre 2020]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10385>

**DELGADO, J; et at.** “Aplicación de conceptos clásicos de la Física en la práctica ingenieril. La ley de Stokes como herramienta conceptual en el análisis de procesos de deshidratación del petróleo”. *Educación Química* [en línea], 2013, (México) 24(1), pp. 57-62. [Consulta: 01 mayo 2021]. ISSN 0187893X. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)73196-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(13)73196-3)

**EMERSON.** *Asme / Isa / Iec Valve Sizing.* [blog]. Fisher Controls International, 2018. [Consulta: 27 abril 2021]. Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/catalog-12-en-1630608.pdf>

**ENGINEERING WORLD.** “Flow Calculation for Gases”. *Engineering world* [en línea], 2018, (USA) s.n, pp. 1. [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: <https://pdf4pro.com/view/flow-calculation-for-gases-needle-valve-e2445.html>



**FATEEN, S; et al.** “Semi-empirical correlation for binary interaction parameters of the Peng–Robinson equation of state with the van der Waals mixing rules for the prediction of high-pressure vapor–liquid equilibrium”. *Journal of Advanced Research* [en línea], 2013, (Egipto) 4(2), pp. 137-145. [Consulta: 14 julio 2021]. ISSN 2090-1232. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2012.03.004>

**FATTAH, K.** “K-value program for crude oil components at high pressures based on PVT laboratory data and genetic programming”. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* [en línea], 2012, (Arabia Saudita) 24(2), pp. 141-149. [Consulta: 08 julio 2021]. ISSN 1018-3639. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2011.06.002>

**GAMMIERO, A.** “Evaluación de diferentes algoritmos de sustituciones sucesivas para el cálculo de equilibrio líquido-vapor con ecuaciones de estado”. *Revista de la Facultad de Ingeniería* [en línea], 2013, (Venezuela) 28(2), pp. 101-116. [Consulta: 14 junio 2021]. ISSN 07984065. Disponible en: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652013000200009](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652013000200009)

**GIL, I; et al.** *Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering* [en línea]. Switzerland: Springer, Cham, 2015. [Consulta: 23 de febrero 2021]. ISBN 9783319148120. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0>

**JAWORSKI, A., & MENG, G.** “On-line measurement of separation dynamics in primary gas/oil/water separators: Challenges and technical solutions A review”. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [en línea], 2009, (Reino Unido) 68(1-2), pp. 47-59. [Consulta: 03 marzo 2021]. ISSN 09204105. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.06.007>

**KHAROUA, N; et al.** “CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach”. *American Journal of Fluid Dynamics* [en línea], 2013, (Emiratos Árabes Unidos) 3(4), pp. 101-118. [Consulta: 02 marzo 2021]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/283724038\\_CFD\\_Modelling\\_of\\_a\\_Horizontal\\_Three-Phase\\_Separator\\_A\\_Population\\_Balance\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/283724038_CFD_Modelling_of_a_Horizontal_Three-Phase_Separator_A_Population_Balance_Approach)

**LIANG, Y; et al.** “Numerical Simulation on Flow Field of Oilfield Three-Phase Separator”. *Journal of Applied Mathematics* [en línea], 2013, (China), pp. 1-6. [Consulta: 01 marzo 2021]. ISSN 1110-757X. Disponible en: <http://www.hindawi.com/journals/jam/2013/298346/>

**MATHWORKS.** *Bloques* [blog]. MathWorks, Inc, 2021a. [Consulta: 6 julio 2021]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/referencelist.html?type=block>

**MATHWORKS.** *Descripción del producto MATLAB* [blog]. MathWorks, Inc, 2021b. [Consulta: 9 abril 2021]. Disponible en: [https://la.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html)

**MATHWORKS.** *Introducción a MATLAB* [blog]. MathWorks, Inc, 2021c. [Consulta: 6 julio 2021]. Disponible en: [https://es.mathworks.com/help/matlab/getting-started-with-matlab.html?s\\_tid=CRUX\\_lftnav](https://es.mathworks.com/help/matlab/getting-started-with-matlab.html?s_tid=CRUX_lftnav)

**MOLER, C., & LITTLE, J.** “A history of MATLAB”. *Proceedings of the ACM on Programming Languages* [en línea], 2020, (United States of America) 4(81), pp. 1-67. [Consulta: 24 febrero 2021]. ISSN: 2475-1421. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3386331>

**MOSTAFAIYAN, M; et al.** “Application of evolutionary computational approach in design of horizontal three-phase gravity separators”. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [en línea], 2014, (Irán) 119, pp. 28-35. [Consulta: 03 marzo 2021]. ISSN 09204105. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2014.04.003>

**NEUTRIUM.** *Volume and Wetted Area of Partially Filled Horizontal Vessels* [blog]. Native Dynamics, 2013. [Consulta: 26 marzo 2021]. Disponible en: <https://neutrium.net/equipment/volume-and-wetted-area-of-partially-filled-horizontal-vessels/>

**PERRY, R; et al.** *Perry's chemical engineers' handbook*. Octava. USA: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0070498415., pp. 7-136

**PINEDO, J.** *El Petroleo En Oro y Negro* [en línea] . S.l.: LibrosEnRed, 2005.[Consulta: 6 noviembre 2020]. ISBN 1597540854. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=aNBtBx5JgwYC&dq=el+petroleo+en+oro+y+negro+de+pinedo+descarga+gratis&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.ec/books?id=aNBtBx5JgwYC&dq=el+petroleo+en+oro+y+negro+de+pinedo+descarga+gratis&source=gbs_navlinks_s)

**PINOS, Rosa (ed).** *Texto Básico de Procesos Orgánicos*. Riobamba-Ecuador: Arte Digital, 2008, pp. 27-28

**POVEDA, R.** *El petróleo en el Ecuador la nueva era* [en línea]. Primera. Quito-Ecuador: Coordinación General de Imagen Empresarial EP Petroecuador, 2013. [Consulta: 24 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/El-Petróleo-en-el-Ecuador-La-Nueva-Era.pdf>

**PROAÑO CÁRDENAS, Juan Carlos.** 2015. Simulación Numérica de un Proceso de Separación Trifásico para una corriente de Hidrocarburos [en línea]. (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática. Quito-Ecuador. 2015, pp. 8-42. [Consulta: 8 marzo 2021]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4503>

**REQUENA, José, & RODRÍGUEZ, Mauricio.** Diseño y evaluación de separadores bifásicos y trifásicos [en línea] (Trabajo de titulación). Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Petróleo. Caracas-Venezuela. 2006, pp.32. [Consulta: 8 marzo 2021]. Disponible en: [http://oilproduction.net/cms3/files/Separadores Bifasicos y Trifasico.pdf](http://oilproduction.net/cms3/files/Separadores_Bifasicos_y_Trifasico.pdf)

**REYES, S., & GAVIRIA, C.** “Esquema de control jerárquico para fijación óptima de consignas en un separador trifásico de un tren de tratamiento de crudo”. *Entre Ciencia e Ingeniería* [en línea], 2019, (Colombia) 13(26), pp. 59-67. [Consulta: 06 noviembre 2020]. ISSN 2539-4169. Disponible en: <https://doi.org/10.31908/19098367.1163>

**SCHLUMBERGER.** *Separador trifásico | Oilfield Glossary* [blog]. Schlumberger, 2020. [Consulta: 6 noviembre 2020]. Disponible en: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/t/three-phase\\_separator](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/t/three-phase_separator)

**SIMMONS, M; et al.** “Interpretation of the Flow Characteristics of a Primary Oil–Water Separator from the Residence Time Distribution”. *Chemical Engineering Research and Design* [en línea], 2002, (Reino Unido) 80(5), pp. 471-481. [Consulta: 03 marzo 2021]. ISSN 02638762. Disponible en: <https://doi.org/10.1205/026387602320224058>

**SKOGESTAD, S.** *Chemical and Energy Process Engineering* [en línea]. Boca Raton-USA: Taylor & Francis Group, 2008. [Consulta: 3 junio 2021]. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781420087567>

**SMITH, Carlos; & CORRIPIO, Armando.** *Control automático de procesos. Teoría y práctica.* México: Limusa, 1991. ISBN 9681837916, pp. 17-219

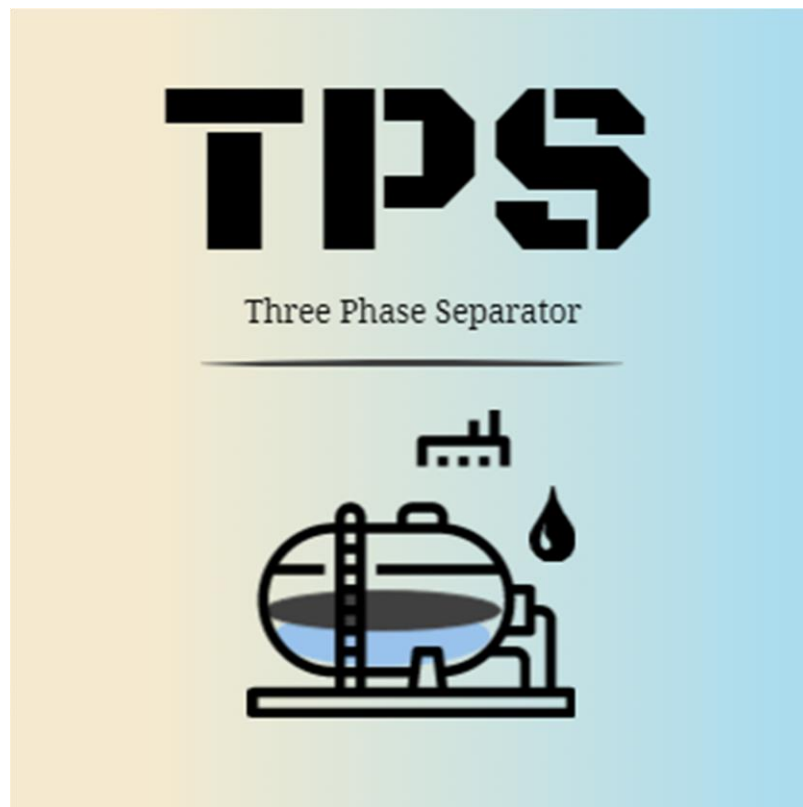
**VIÑAN ANDINO, Mariela Fernanda.** Diseño e Implementación de un Sistema de Control para Operación Automática de Separadores de Petróleo Trifásicos [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito-Ecuador. 2013, pp. 2-965. [Consulta: 8 marzo 2021]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6333>

ANEXOS

ANEXO A: MANUAL DE USUARIO

# SEPARADOR TRIFÁSICO DE PETRÓLEO

## MANUAL DE USUARIO V 1.0



**Autora:** Ana Daniela Guanga Cuadrado

**Correo:** ana.guanga@epoch.edu.ec

**Director de Tesis:** Ing. Darío Fernando Guamán Lozada

**Miembro de Tesis:** Ing. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Definiciones

- *Simulación*

La simulación computacional de sistemas se basa en la utilización de ciertas técnicas matemáticas empleadas en computadores, las cuales permiten imitar el funcionamiento de prácticamente cualquier tipo de operación o proceso del mundo real, es decir, es el estudio del comportamiento de sistemas reales a través del ejercicio de modelos.

- *Separador de tres fases*

Es un equipo industrial usado en varias áreas, pero son más comunes en la industria del petróleo, específicamente en las plantas de pretratamiento del crudo, su función es la de separar la mezcla en: agua, crudo y gas con el fin de enviar el crudo a través de oleoductos hasta las plantas de transformación o refinerías.

- *Petróleo*

Comprende una mezcla de hidrocarburos de un rango amplio de pesos moleculares. Cuando es extraído del subsuelo normalmente viene con una carga de agua y gas, que deben ser extraídos para evitar daños en los oleoductos de transporte.

- *Controlador PID*

Mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre nuestra variable real contra la variable deseada.

- *Variable controlada*

Dentro de un ciclo de control, la variable controlada es la variable que un controlador debe mantener en un valor determinado (set point), estas variables pueden ser: temperatura, flujo másico, flujo volumétrico, presión, composición, flujo eléctrico, diferencia de potencia, torque, velocidad, revoluciones por minuto, etc.

- *Válvula de control*

Las válvulas son elementos finales de control, es decir, que los controladores ejercen una acción de control mediante estas. La variable que normalmente se emplea para regular flujos es el grado de apertura del obturador de la válvula que depende del tipo de válvula.

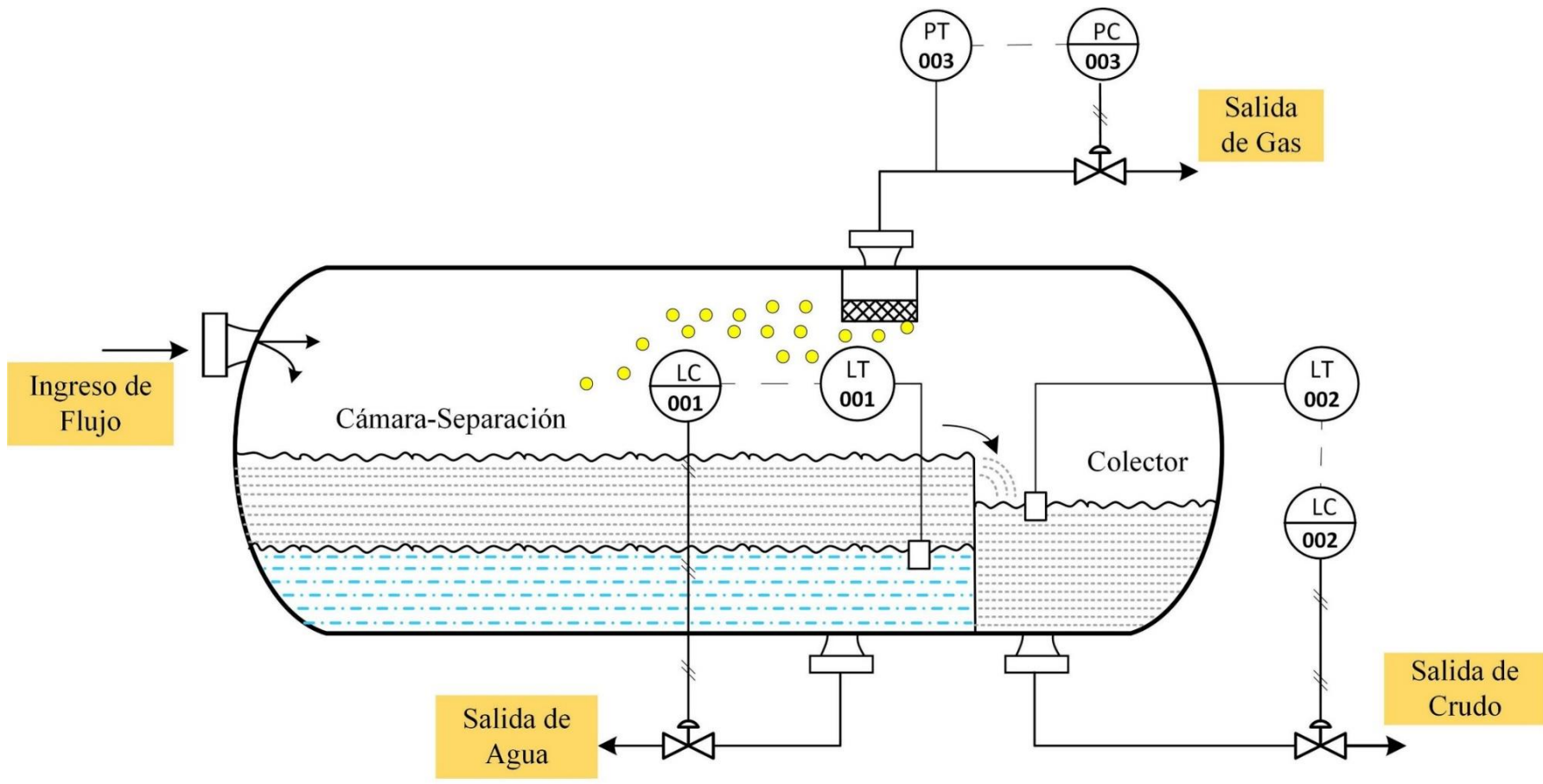
## 1.2. Modelo del Separador

El fluido extraído de los pozos es transportado hacia los separadores trifásicos, este fluido ingresa al equipo de manera tangencial y debido al cambio brusco en la dirección y velocidad las gotas más grandes, por acción de la gravedad se dirigen al fondo del equipo, en esta sección denominada cámara de separación gracias a la diferencia de densidades, desde la base del separador se ubica el agua, crudo y gas. El agua forma un colchón que lentamente sube de nivel hasta llegar a su set point, en este nivel se estabiliza y el único nivel que ahora subirá es el del crudo que deberá superar una barrera que separa a la cámara de separación y al colector, espacio donde se almacena el petróleo separado. El gas al ser menos denso que el agua y crudo es eliminado por la parte superior del equipo.

En la figura se puede observar el modelo del separador a ser simulado, en el equipo se han de controlar las siguientes variables utilizando diferentes tipos de control.

**Tabla 1-1:** Variables por controlar en el separador

Variable por controlar	Controlador	Número
Nivel de agua en la cámara de separación	PID	001
Nivel de crudo en el colector	PID	002
Presión del gas	PROPORCIONAL	003

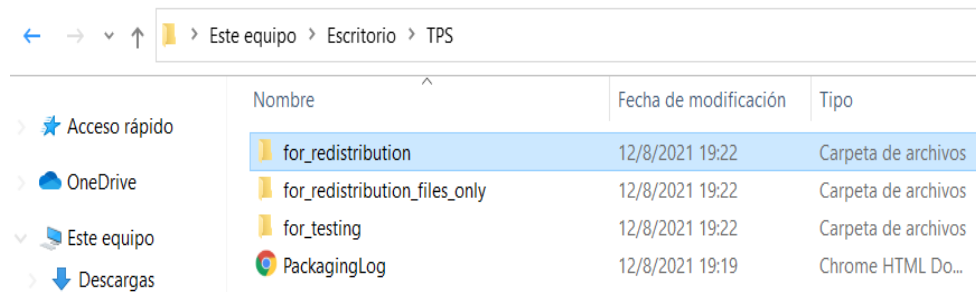


**Figura 2-1:** Diagrama P&ID del separador trifásico de crudo

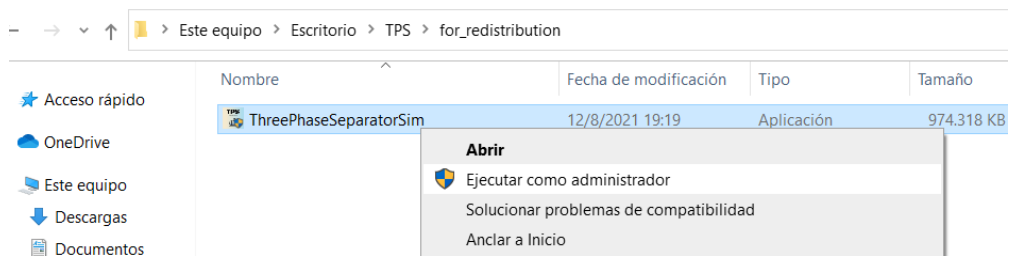


## 2. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN

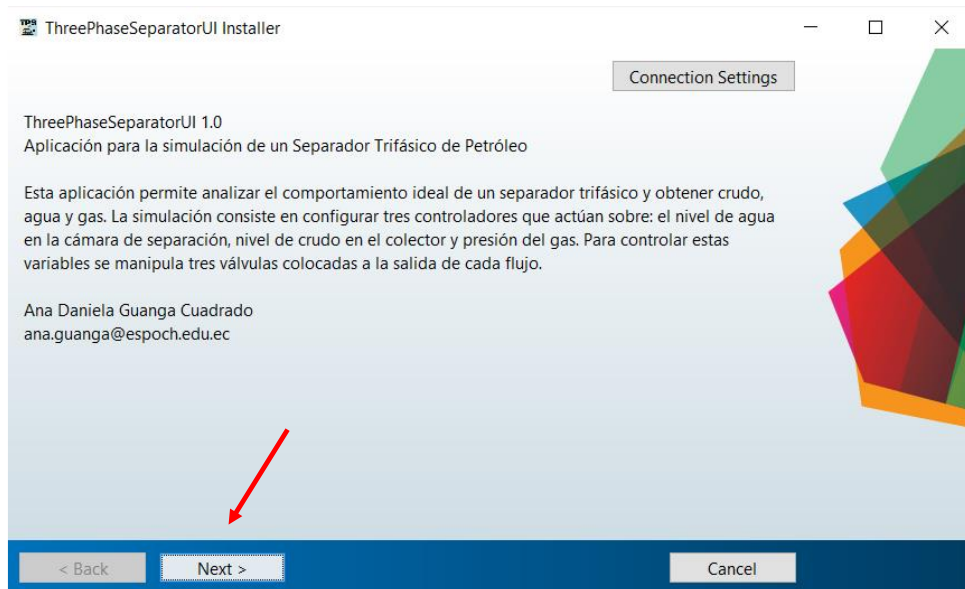
1. Para la instalación de la aplicación primero debemos localizar los archivos de instalación, esto depende de donde se descomprimen los archivos .rar. Una vez localizada la carpeta que contiene los archivos de instalación dentro de esta se encuentran tres carpetas que contienen versiones de instaladores de la aplicación. El que se requiere se encuentra dentro de la carpeta for\_redistribution.



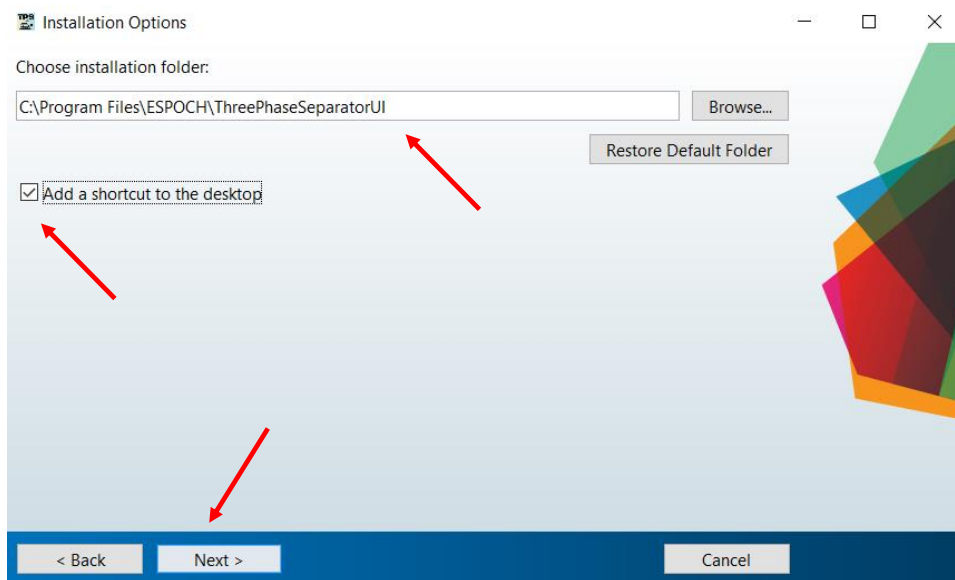
2. Dentro de la carpeta for\_redistribution, se encuentra el archivo ejecutable con un peso aproximado de 1GB. Este archivo contiene los paquetes de la aplicación y el Runtime de Matlab. Ejecutamos este instalador con permisos de administrador.



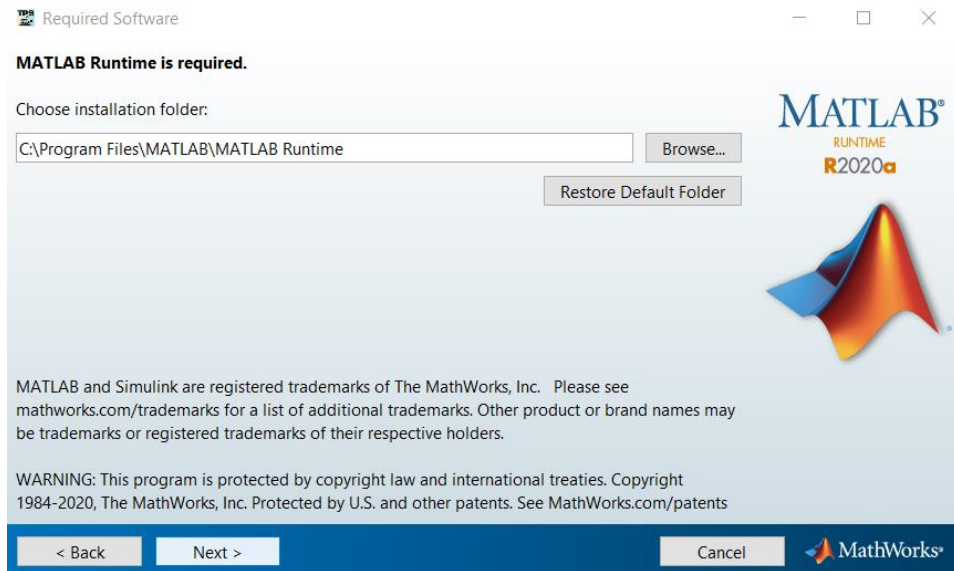
3. Al ejecutarse el instalador se observa un asistente de instalación. En esta etapa el instalador muestra la información sobre la aplicación a instalar. Para continuar presionamos en siguiente.



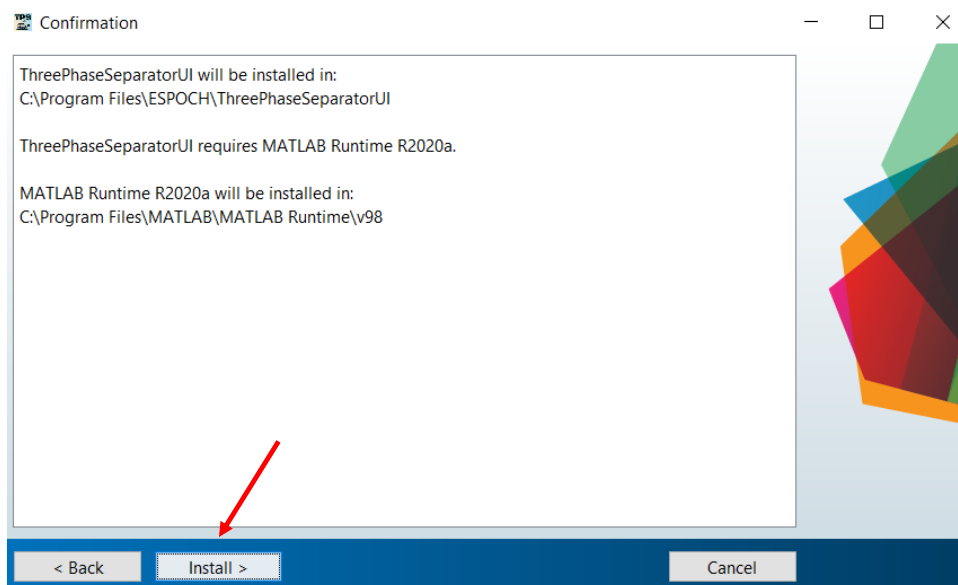
4. En la siguiente pantalla el instalador le pide la ubicación en donde se va a colocar todos los archivos de instalación. Por defecto se encuentra en el disco C en el directorio Programa Files. Además, puede escoger la opción de crear acceso directo.



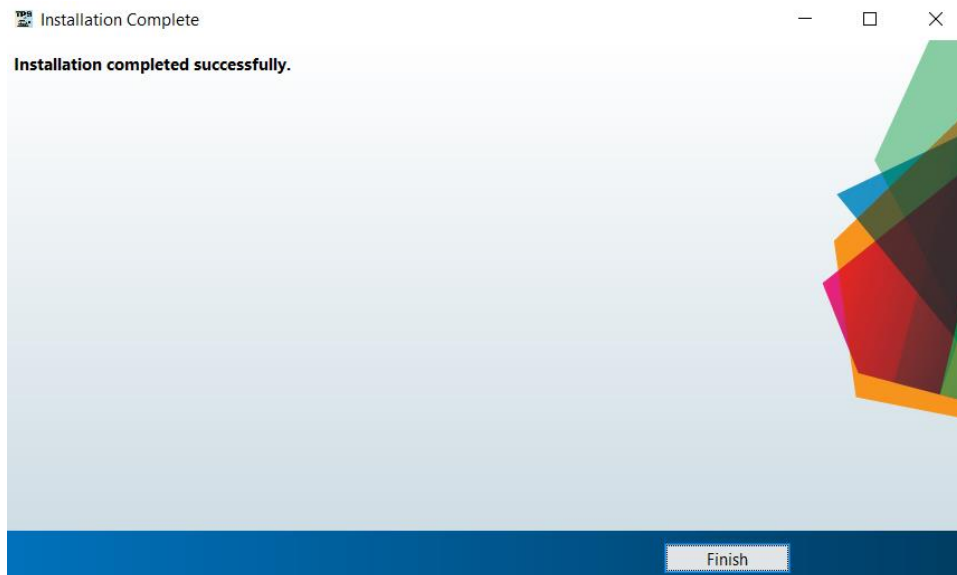
5. La siguiente pantalla nos permite instalar el runtime de Matlab que contiene todas las librerías y funcionalidades que permiten ejecutar la aplicación. La ubicación del runtime se ubicará en la siguiente dirección de ficheros "C:/Program Files/"



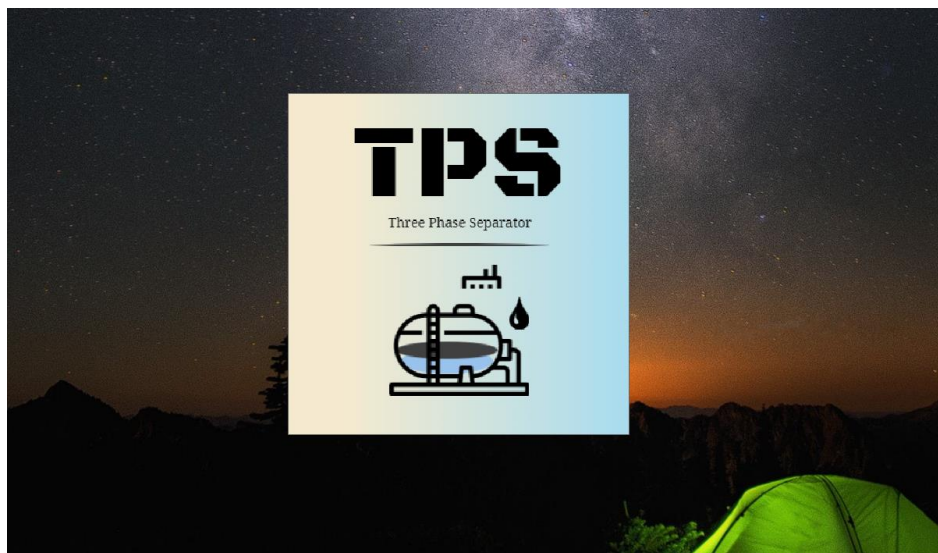
6. La pantalla final muestra un resumen de la configuración para la instalación de la aplicación. Presionamos instalar y esperamos a que termine la instalación.



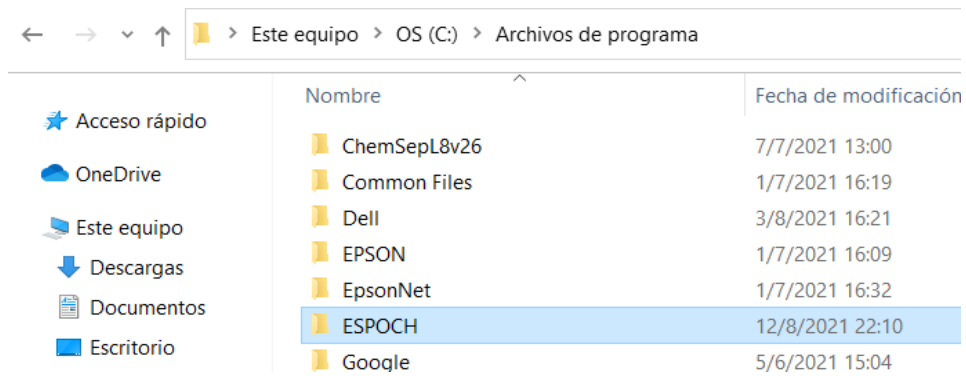
7. Al culminar con la instalación de la aplicación nos muestra una pantalla con un mensaje de instalación completada exitosamente.



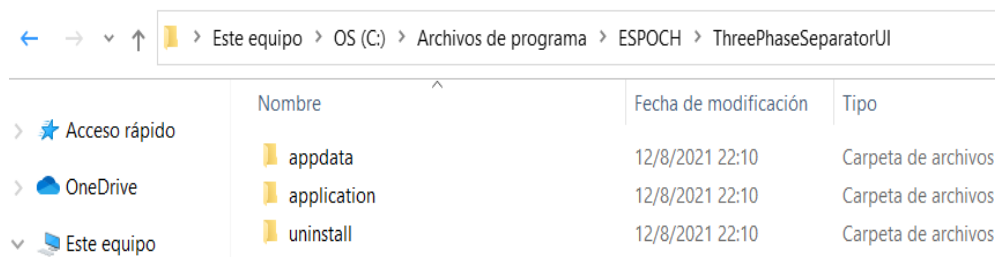
8. Si se escogió la opción de acceso directo la aplicación aparecerá en el escritorio y se la podrá iniciar.



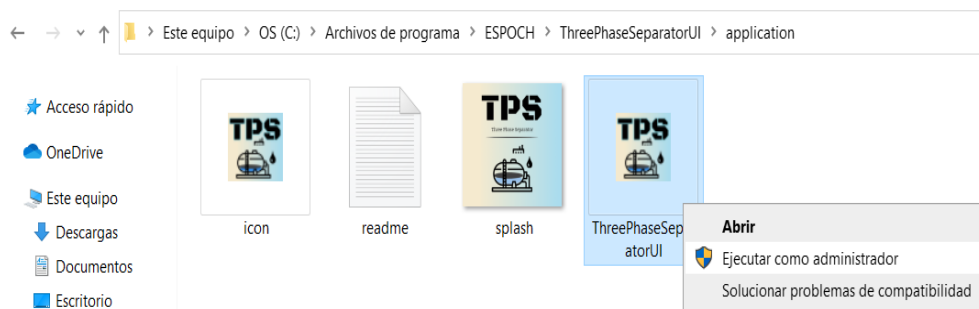
9. Si no se escogió la opción del acceso directo buscamos el fichero de instalación que por defecto es "C:\Program Files\ESPOCH\".



10. Dentro de este fichero encontramos tres carpetas “appdata”, “application”, “uninstall”. La aplicación se encuentra dentro del fichero “application”.

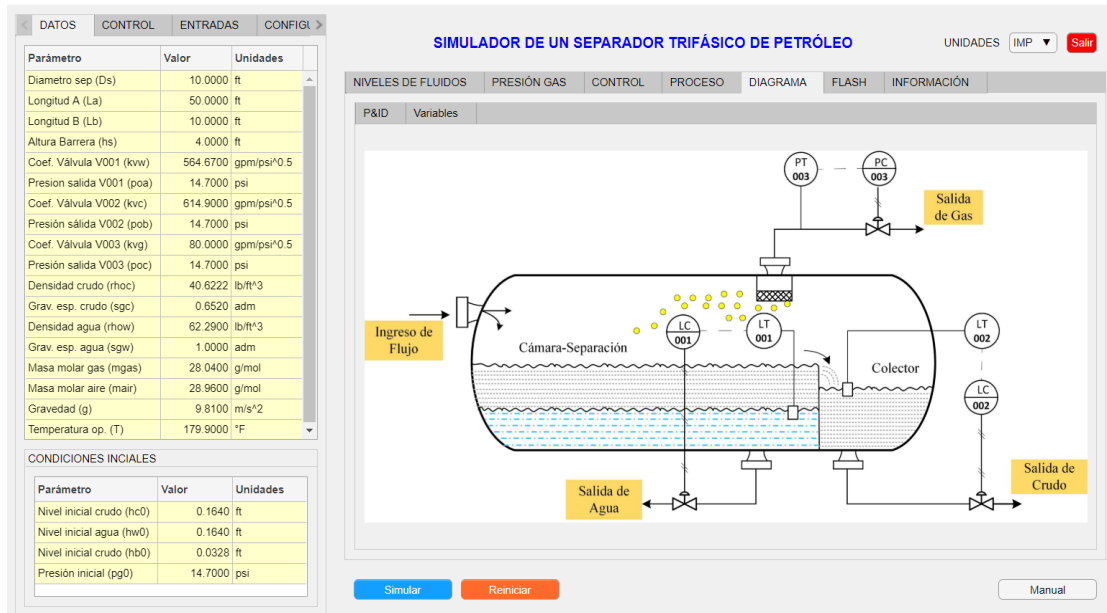


11. Dentro del fichero “application”, se encuentran 4 archivos. La aplicación tiene el nombre de “ThreePhaseSeparatorUI”. Ejecutamos esta aplicación con permisos de administrador.



### 3. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

Una vez instalada la aplicación en el ordenador del usuario, al abrirla se visualiza la siguiente imagen de los diferentes paneles.



**Figura 3-1:** Pantalla inicial de la interfaz gráfica de usuario

La aplicación consta de tres secciones definidas:

- La sección de parámetros o panel de parámetros (tablas con fondo amarillo)
- La sección o panel de resultados
- Panel de botones

A continuación, se describe de mejor manera cada una de estas secciones.

### 3.1. Panel de parámetros

El panel de parámetros tiene cinco secciones definidas: DATOS, CONTROL, ENTRADAS, CONFIGURACIÓN y FLASH. Cada una de estas secciones contiene tablas que permiten ingresar los valores que definen el modelo a simular.

En las siguientes tablas se puede observar una descripción de cada parámetro a considerarse.

Parámetro	Valor	Unidades
Diametro sep (Ds)	10.0000	ft
Longitud A (La)	50.0000	ft
Longitud B (Lb)	10.0000	ft
Altura Barrera (hs)	4.0000	ft
Coef. Válvula V001 (kvw)	564.6700	gpm/psi <sup>0.5</sup>
Presion salida V001 (poa)	14.7000	psi
Coef. Válvula V002 (kvc)	614.9000	gpm/psi <sup>0.5</sup>
Presión sálida V002 (pob)	14.7000	psi
Coef. Válvula V003 (kvg)	80.0000	gpm/psi <sup>0.5</sup>
Presión salida V003 (poc)	14.7000	psi
Densidad crudo (rhoc)	40.6222	lb/ft <sup>3</sup>
Grav. esp. crudo (sgc)	0.6520	adm
Densidad agua (rhow)	62.2900	lb/ft <sup>3</sup>
Grav. esp. agua (sgw)	1.0000	adm
Masa molar gas (mgas)	28.0400	g/mol
Masa molar aire (mair)	28.9600	g/mol
Gravedad (g)	9.8100	m/s <sup>2</sup>
Temperatura op. (T)	179.9000	°F

CONDICIONES INICIALES		
Parámetro	Valor	Unidades
Nivel inicial crudo (hc0)	0.1640	ft
Nivel inicial agua (hw0)	0.1640	ft
Nivel inicial crudo (hb0)	0.0328	ft
Presión inicial (pg0)	14.7000	psi

**DATOS:** Contiene los campos que permiten definir los parámetros generales, estos son estructurales, de las válvulas, propiedades físicas de los fluidos, constantes y condiciones iniciales del modelo.

Las condiciones iniciales definen las condiciones de partida del proceso. Son los parámetros de integración de las ecuaciones diferenciales.

SET POINTS		
Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo salto (tps)	0	s
Valor inicial (vi)	2.7887	ft
Valor final (vs)	2.7887	ft

Nivel de agua (hw) Separador		
Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo salto (tps)	0	s
Valor inicial (vi)	2.6247	ft
Valor final (vs)	2.6247	ft

Presión de gas (pg)		
Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo salto (tps)	0	s
Valor inicial (vi)	60	psi
Valor final (vs)	60	psi

**CONTROL:** Contiene los campos que permite configurar el sistema de control. Dentro de este tab se puede configurar los controladores PID y los set points para las variables controladas.

**SET POINT:** Se configuran como si fueron saltos unitarios de simulink. Los parámetros que se requieren son el tiempo del salto unitario (tps), el valor inicial de la variable (vi) y el valor final (vs).

< DATOS
CONTROL
ENTRADAS
CONFIGURACIÓN

SET POINTS
CONTROLADORES

PID 1 (Nivel de crudo hb)

Parámetro	Valor
Const. Proporcional (kp)	-150.0000
Const. Integral (ki)	-0.0120
Const. Diferencial (kd)	-0.0012
Const. Filtro (N)	100.0000

PID 2 (Nivel de agua hw)

Parámetro	Valor
Const. Proporcional (kp)	-90.0000
Const. Integral (ki)	-0.0100
Const. Diferencial (kd)	-0.0100
Const. Filtro (N)	100.0000

PID 3 (Presión de gas pg)

Parámetro	Valor
Const. Proporcional (kp)	-0.0050
Const. Integral (ki)	0
Const. Diferencial (kd)	0
Const. Filtro (N)	0

< DATOS
CONTROL
ENTRADAS
CONFIGURACIÓN

Caudal entrada agua (qwi)

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo salto (tps)	0	s
Valor inicial (vi)	74711	BPD
Valor final (vs)	74711	BPD

< ENTRADAS
CONFIGURACIÓN
FLASH

SOLVER

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo inicial (t0)	0	s
Tiempo final (tf)	3600	s
Tamaño paso (st)	0.0100	s

**CONTROLADORES:** Se aplicaron dos tipos de controladores, un PID para el nivel de crudo y nivel de agua, y un controlador PROPORCIONAL para la presión del gas. El control PID tiene tres parámetros de ajuste (kp,ki,kd), mientras que el Proporcional tiene un solo parámetro (kp), y fueron ajustados manualmente.

**ENTRADAS:** El tab de entradas permite la configuración del caudal de ingreso agua (qwi), dependiendo de la configuración los valores pueden ser constantes o un salto unitario. Los parámetros que se requieren son el tiempo del salto unitario (tps), el valor inicial de la variable (vi) y el valor final (vs).

Las entradas de crudo y gas son definidos mediante un algoritmo flash usando la ecuación de Wilson.



< ENTRADAS CONFIGURACIÓN FLASH

COMPOSICIÓN CONSTANTES

CRUDO Crudo 1 ▼

Crudo 1

Crudo 2

COMPONENTES	
Dióxido de carbono	0.0256
Nitrógeno	0.0011
Metano	0.0400
Etano	0.0221
Propano	0.0309
n-Butano	0.0468
i-Butano	0.0407
n-Pentano	0.1269
i-Pentano	0.1181
n-Hexano	0.1236
n-Heptano	0.1200
Agua	0.3042

Panel

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de Alimentación (F)	38648	BPD
Temperatura flash (T)	355.3700	K
Presión flash (P)	0.4150	MPa

CONTROL ENTRADAS CONFIGURACIÓN FLASH

COMPOSICIÓN CONSTANTES

COMP	Tc	Pc	wc	PM
Dióxido de carbono	304.2100	7.3900	0.2230	44
Nitrógeno	126.2000	3.3900	0.0370	28
Metano	190.5600	4.5900	0.0110	16
Etano	305.3200	4.8500	0.0990	30
Propano	369.8300	4.2100	0.1520	44
n-Butano	425.1200	3.7700	0.2000	58
i-Butano	408.1400	3.6200	0.1860	58
n-Pentano	469.7000	3.3600	0.2510	72
i-Pentano	460.4300	3.3700	0.2290	72
n-Hexano	507.6000	3.0400	0.2970	86
n-Heptano	540.2000	2.7200	0.3500	100
Agua	647.1300	21.9400	0.3440	18

Panel

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de Alimentación (F)	38648	BPD
Temperatura flash (T)	355.3700	K
Presión flash (P)	0.4150	MPa

FLASH (Composición): En este tab el usuario puede escoger con que composición trabajar sea el crudo 1 o crudo 2, además se configura los parámetros flash como son el flujo de alimentación, la temperatura, y presión.

FLASH (Constantes): Contiene las constantes que se utilizan en los cálculos flash para determinar el flujo de entrada de crudo y gas. En esta tabla se visualiza los componentes del crudo y sus constantes: temperatura crítica (Tc), presión crítica (Pc), factor acéntrico (wc) y peso molecular (PM).

### 3.2. Panel de botones

Simular

Reiniciar

Manual

El panel de controles contiene los botones de ejecución de la simulación, reinicio de casos y un botón que permite abrir el manual de usuario en formato pdf, el mismo que servirá de guía de instalación y explicación del separador trifásico de crudo.

**Nota:** Al momento de presionar el botón “simular”, se debe hacerlo una sola vez, de lo contrario la simulación podría tardar más de lo esperado. Si el usuario cambia los parámetros y desea volver al caso por defecto debe presionar el botón “Reiniciar”.

### 3.3. Panel de resultados

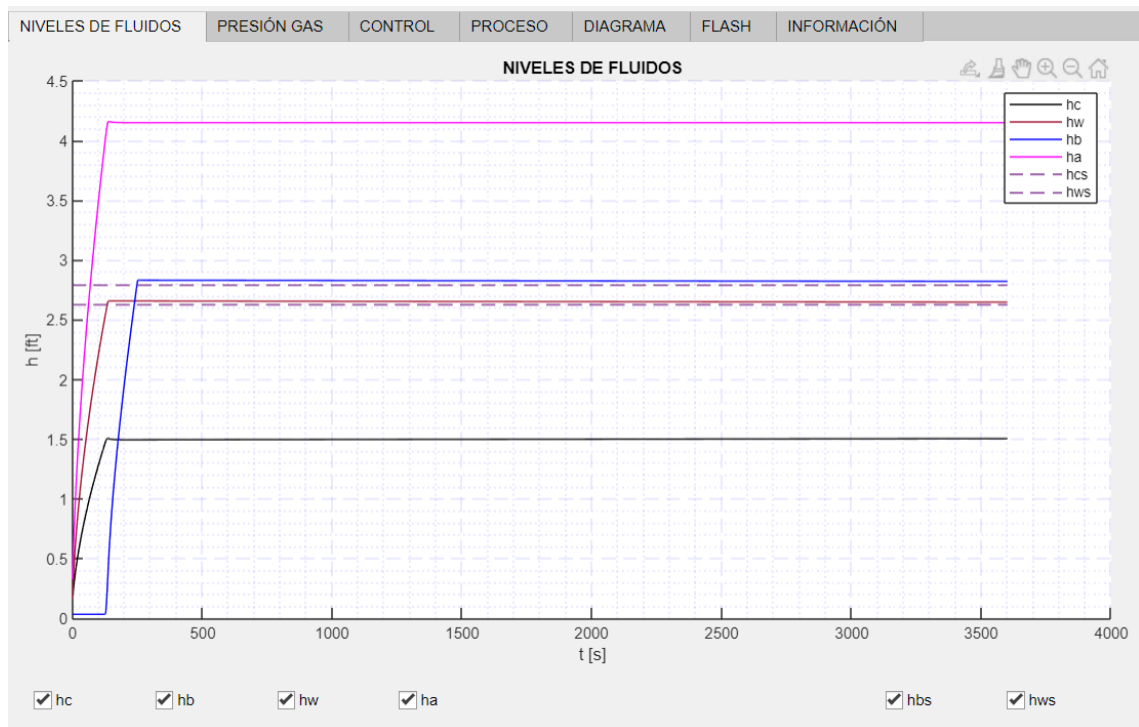
En el panel de resultados se observan las curvas de las distintas variables de proceso. En el caso de esta aplicación se obtienen las curvas de:

- Nivel de fluidos en la cámara de separación
- Presión de gas
- Sistema de control (aperturas de las 3 válvulas de control), y
- El proceso (caudal de los líquidos y gas, volumen de líquidos en las cámaras del equipo)

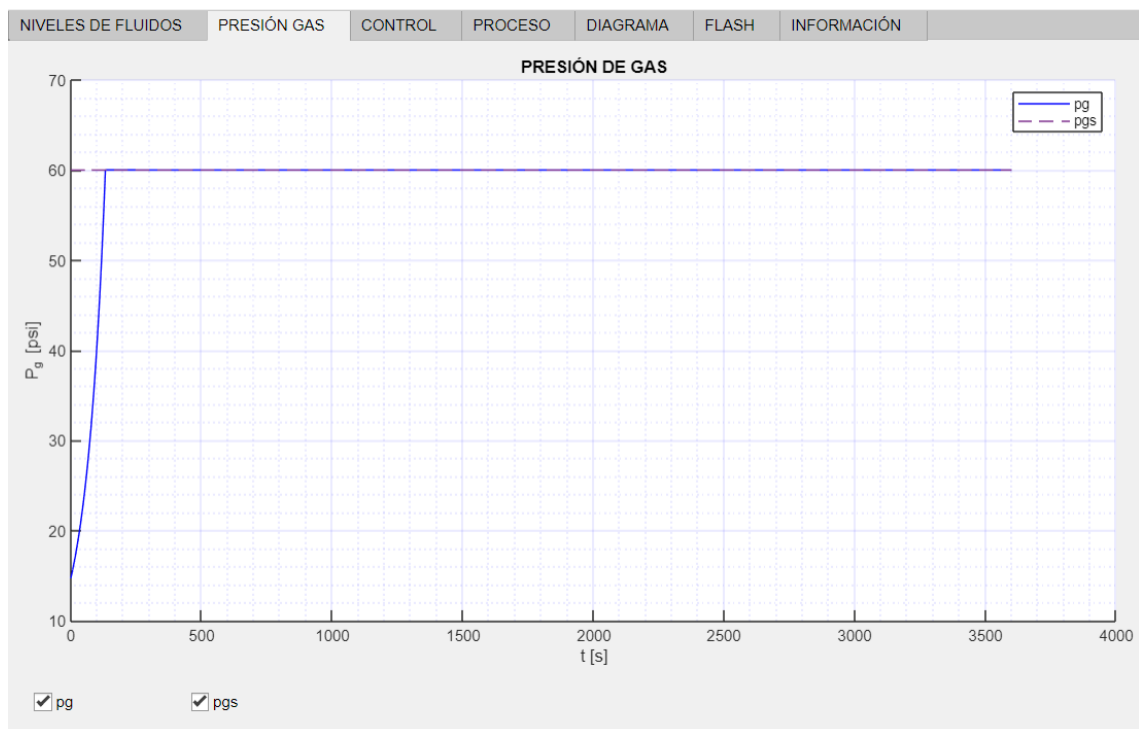
Además, el primer resultado en observarse antes que las curvas es una tabla que incluye los resultados de los cálculos del algoritmo flash que determinan el flujo de entradas de crudo, gas y algunas propiedades de los fluidos

SIMULADOR DE UN SEPARADOR TRIFÁSICO DE PETRÓLEO					UNIDADES IMP		Salir			
NIVELES DE FLUIDOS		PRESIÓN GAS	CONTROL	PROCESO	DIAGRAMA	FLASH	INFORMACIÓN			
Comp	k	x	y			Parámetro	Valor	Unidades SI	Valor en IMP	Unidades IM
Dióxido de carbono	45.8365	0.0022	0.1000			Flujo volumétrico (F)	0.0711	m <sup>3</sup> /s	3.8645e+04	BPD
Nitrógeno	296.3164	0.0000	0.0045			Flujo volumétrico (V)	1.3169	m <sup>3</sup> /s	3.9905	MMSCFD
Metano	137.1668	0.0012	0.1633			Flujo volumétrico (L)	0.0537	m <sup>3</sup> /s	2.9198e+04	BPD
Etano	26.8331	0.0031	0.0826			Peso molecular medio (pmF)	54.7450	g/mol	54.7450	g/mol
Propano	7.8870	0.0117	0.0920			Peso molecular medio (pmL)	56.2607	g/mol	56.2607	g/mol
n-Butano	2.5645	0.0340	0.0873			Grav. esp. líquido (sgl)	0.6520	adm	0.6520	adm
i-Butano	3.3879	0.0259	0.0877			Densidad crudo (rhoC)	650.7047	kg/m <sup>3</sup>	40.6222	lb/ft <sup>3</sup>
n-Pentano	0.9325	0.1290	0.1203			Densidad gas (rhoV)	7.4142	kg/m <sup>3</sup>	0.4629	lb/ft <sup>3</sup>
i-Pentano	1.1540	0.1139	0.1314			Volatilidad (V/F)	0.2394	adm	0.2394	adm
n-Hexano	0.3708	0.1455	0.0540							
n-Heptano	0.1510	0.1506	0.0227							
Agua	0.1412	0.3829	0.0541							

**Figura 4-1:** Resultados del cálculo del flujo de crudo y gas



**Figura 5-1:** Nivel de fluidos en la cámara de separación



**Figura 6-1:** Presión del gas en el separador

La mayoría de las gráficas contienen checkbox (casillas) que pueden ser activadas o desactivadas para la visualización de las curvas con el siguiente significado:

**Tabla 2-1:** Tipo de líneas utilizado en las gráficas

Tipo de línea	Representación	Significado
Recta	—————	Variable
Entrecortada	-----	Set point de la variable

**Nota:** Todas las gráficas están expresadas en dos sistemas de unidades, el sistema internacional (SI), y el sistema imperial (IMP) o sistema de campo, es decir aquel sistema que manejan las industrias. En la parte superior de la aplicación se encuentra un botón que permite cambiar los sistemas mencionados.

#### 4. PARÁMETROS QUE PUEDEN SER MODIFICADOS

En la siguiente tabla se pueden observar los parámetros que el usuario debe considerar para realizar variaciones al proceso y observar los cambios que se pueden efectuar.

**Tabla 3-1:** Parámetros que pueden ser modificados en la aplicación

Parámetros	Valor sugerido	Unidad
DATOS		
Densidad del crudo ( $\rho_{oc}$ )	Dependiendo del caso 1 o caso 2, los resultados de la tabla Flash deben ser cambiados a la tabla de datos.	$lb/ft^3$
Gravedad específica del crudo ( $sgc$ )		$adim$
ENTRADAS (puede actuar como perturbación)		
Tiempo de salto ( $tps$ )	0 hasta tiempo final de simulación	$s$
Valor inicial ( $vi$ )	60000 a 81000	$BPD$
Valor final ( $vs$ )	60000 a 81000	$BPD$
CONFIGURACIÓN		
Tiempo Final ( $tf$ )	3600 en adelante	$s$
FLASH		
Crudo 1 Crudo 2	El usuario puede escoger trabajar con el crudo 1 o crudo 2, cada uno con composiciones diferentes de petróleo.	
Presión flash	0.415 en adelante	$MPa$

## 5. Casos de uso

A continuación, se presenta dos casos que se recomienda al usuario desarrollarlos, para ambos casos los parámetros de simulación son los mismos, lo que diferencia a cada caso es la composición del crudo.

CASO 1			CASO 2		
ENTRADAS		CONFIGURACIÓN	ENTRADAS		FLASH
COMPOSICIÓN	CONSTANTES		COMPOSICIÓN	CONSTANTES	
CRUDO		Crudo 1	CRUDO		Crudo 2
COMPONENTES			COMPONENTES		
Dióxido de carbono		0.0256	Dióxido de carbono		0.0022
Nitrógeno		0.0011	Nitrógeno		0.0010
Metano		0.0400	Metano		0.6335
Etano		0.0221	Etano		0.0420
Propano		0.0309	Propano		0.0209
n-Butano		0.0468	n-Butano		0.0108
i-Butano		0.0407	i-Butano		0.0068
n-Pentano		0.1269	n-Pentano		0.0380
i-Pentano		0.1181	i-Pentano		0.0470
n-Hexano		0.1236	n-Hexano		0.0136
n-Heptano		0.1200	n-Heptano		0.0800
Agua		0.3042	Agua		0.1042
Panel			Panel		
Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de Alimentación (F)	38648	BPD	Flujo de Alimentación (F)	38648	BPD
Temperatura flash (T)	355.3700	K	Temperatura flash (T)	355.3700	K
Presión flash (P)	0.4150	MPa	Presión flash (P)	0.4150	MPa

## ANEXO B: CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “MAIN.M”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO

```
1 clear;clc;
2 addpath("func/");
3 addpath("func/conversion/");
4 addpath("func/flash/");
5 addpath("func/geometria/");
6 addpath("src/");
7 addpath("test/");
8 addpath("ui/");
9 addpath("user/");
10 %% DATA
11 constants = [3.048,... % Diámetro del separador [m] 10ft
12             15.1724,.. % Longitud separador [m] 50ft
13             3.1076,... % Longitud colector [m] 10 ft
14             1.2192,... % Altura barrera [m] 4 ft
15             5.15e-4,.. % Coef. válvula agua [m3/s Pa^0.5]
16             101325,... % Presión salida v.agua [Pa]
17             5.61e-4,.. % Coef. válvula crudo [m3/Pa^0.5]
18             101325,... % Presión salida v.crudo [Pa]
19             80.0,... % Coef. válvula gas [gpm/psi^0.5]
20             101325,... % Presión salida v.gas [Pa]
21             802.525,... % Densidad crudo [kg/m3]
22             0.9134,... % Gravedad esp. crudo [adm]
23             997.8,... % Densidad agua [kg/m3]
24             1.00,... % Gravedad esp. agua [adm]
25             28.04,... % Peso molecular gas [g/mol]
26             28.96,... % Peso molecular aire [g/mol]
27             9.81,... % Constante de grav. [m/s2]
28             355.37,... % Temperatura [K] (180°F)
29             ];
30
31 initial = [0.05;... % hc0 [m]
32           0.05;... % hw0 [m]
33           0.01;... % hb0 [m]
34           101325]; % Pg0 [Pa]
35
36 % qci = 0.0711; % Caudal de crudo [m3/s] -> 38648 BPD
37 % qwi = 0.1374; % Caudal de agua [m3/s] -> 74711 BPD
38 % qgi = 0.4906; % Caudal de gas [m3/s] -> 1.5 MMSCFD
39
40 % vtk=hemivolt(3.048, 15.1724, 3.1076);
41
42 %% Perturbaciones
43 % Salto unitario qci
44 sqci.ts = 0;
45 sqci.iv = 0.0711;
46 sqci.fv = 0.0711;
47
48 % Salto unitario qwi
49 sqwi.ts = 0;
50 sqwi.iv = 0.1374;
51 sqwi.fv = 0.1374;
52
53 % Salto unitario qgi
```

```
54 sqgi.ts = 0;
55 sqgi.iv = 0.4906;
56 sqgi.fv = 0.4906;
57
58 %% Set points
59 % Nivel de crudo hb
60 hbs.ts = 0;
61 hbs.iv = 0.80;
62 hbs.fv = 0.85;
63
64 % Nivel de agua hw
65 hws.ts = 0;
66 hws.iv = 0.80;
67 hws.fv = 0.80;
68
69 % Presión de gas pg
70 pgs.ts = 0;
71 pgs.iv = 413685;
72 pgs.fv = 413685;
73
74 %% Controladores
75 % PID 1 - Nivel de crudo B
76 pid1.kp = -150;
77 pid1.ki = -0.012;
78 pid1.kd = -0.00123;
79 pid1.n = 100;
80
81 % PID 2 - Nivel de agua A
82 pid2.kp = -90;
83 pid2.ki = -0.01;
84 pid2.kd = -0.01;
85 pid2.n = 100;
86
87 % PID 3 - Presión de Gas
88 pid3.kp = -0.005;
89 pid3.ki = 0;
90 pid3.kd = 0;
91 pid3.n = 0;
92
93 %ThreePhaseSeparatorUI;
```

**ANEXO C: CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “HEMIVOLT.M”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO**

```
1 function volt = hemivolt(ds,La,Lb)
2 %HEMIVOLT Función para calcular el volumen total del separador
3 % ds: Diámetro del separador [m]
4 % La: Longitud separador crudo-agua [m]
5 % Lb: Longitud cámara de crudo [m]
6
7 volt=((pi()*ds^2)/4)*(La+Lb))+((pi()*ds^3)/6);
8
9 end
```

**ANEXO D: CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “HEMIVOLS.M”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO**

```
function v = hemivols(h,L,D)
1 %HEMIVOLS Función que calcula el volumen ocupado por el líquido de
2 una sección del separador
3 % h: Nivel de fluido [m]
4 % L: Longitud de la sección [m]
5 % D: Diámetro separador [m]
6 % v: Volumen de la sección [m^3]
7
8 vcil = (L*D^2)*((1/4)*acos(1-(2*h/D)))-((0.5-(h/D))*sqrt((h/D)-
9 ((h/D)^2)));
10 vcap = ((D^3*pi())/12)*((3*(h/D)^2)-(2*(h/D)^3));
11
12 v = vcil + vcap;
end
```

**ANEXO E: CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “HEMIHEAD.M”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO**

```
1 function s = hemihead(h,Ds,L)
2 %HEMIHEAD Función para calcular el factor de forma.
3 % h: Nivel del fluido [m]
4 % Ds: Diámetro del separador [m]
5 % s: Factor de forma [m^2]
6
7 A = 1/(sqrt(h*(Ds-h)));
8 B = (Ds-2*h)/(2*Ds*sqrt(h*Ds-h^2));
9 C = (-4*(h^2)+3*Ds*h)/(2*Ds*sqrt(Ds*h-(h^2)));
10 D = (2*h/(Ds^2));
11 E = ((3*h^2)/(Ds^3));
12
13 w1= (L*Ds^2)*((A/4)-(B/2)+(C/Ds));
14 w2= ((pi()*Ds^3)/12)*(3*D-2*E);
16 s = w1+w2;
17 end
```



## ANEXO F: CÓDIGO DE “MATLAB FUNCTION”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO

```
1 function [data, output] = tpsep(input, recycle, constants)
2
3 %% Parámetros predefinidos
4 % Inputs
5 qci = input(1);           % Flujo de entrada crudo      [m3/s]
6 qwi = input(2);           % Flujo de entrada agua      [m3/s]
7 qgi = input(3);           % Flujo de entrada gas       [m3/s]
8 vpc = input(4);           % Apertura válvula crudo
9 vpw = input(5);           % Apertura válvula agua
10 vpg = input(6);          % Apertura válvula gas
11
12 % Constantes
13 ds = constants(1);        % Diametro separador        [m]
14 La = constants(2);        % Longitud separador        [m]
15 Lb = constants(3);        % Longitud colector         [m]
16 hs = constants(4);        % Altura barrera s.         [m]
17 kvw = constants(5);       % Coef. válvula agua        [m/s Pa^-0.5]
18 poa = constants(6);       % Presion salida v.agua     [Pa]
19 kvc = constants(7);       % Coef. válvula crudo       [m/s Pa^-0.5]
20 pob = constants(8);       % Presión salida v.crudo    [Pa]
21 kvg = constants(9);       % Coef. válvula gas         [gpm/psi^-0.5]
22 poc = constants(10);      % Presión salida v.gas      [Pa]
23 rhoc = constants(11);     % Densidad crudo            [kg/m3]
24 sgc = constants(12);     % Gravedad esp. crudo       [m/s^2]
25 rhow = constants(13);     % Densidad agua             [kg/m3]
26 sgw = constants(14);     % Gravedad esp. agua        [m/s^2]
27 mgas = constants(15);    % Peso molecular med gas    [g/mol]
28 mair = constants(16);    % Peso molecular aire        [g/mol]
29 g = constants(17);        % Gravedad                   [m/s^2]
30 T = constants(18);        % Temperatura op.           [K]
31
32 %% Parámetros calculados
33
34 % Valores de la iteración previa
35 hc = recycle(1);          % Nivel previo de crudo A   [m]
36 hw = recycle(2);          % Nivel previo de agua      [m]
37 hb = recycle(3);          % Nivel previo de crudo B   [m]
38 pg = recycle(4);          % Presión previa de gas     [Pa]
39
40 % Cálculo del volumen total del separador
41 vt = hemivolt(ds,La,Lb);
42
43 % Altura de fluido total separador Crudo/Agua (Subsistema A)
44 ha = hw + hc;
45
46 % Flujo de fluido en la cámara de separación
47 if ha <= hs
48     qca = 0;
49     qcb = 0;
50 else
51     % Ecuación de presa tomada del Manual de Perry
52     qca = 0.415*(ds-0.2*(ha-hs))*((ha-hs)^(1.5))*sqrt(2*g);
53     % Flujo de salida de crudo del colector
```

```

54     qcb = kvc*vpc*sqrt((pg+rhoc*g*hb-pob)/sgc);
55 end
56
57 % Flujo de salida de agua de la cámara de separación
58 qwo = kvw*vpw*sqrt((pg+rhoc*g*hc+rhow*g*hw-poa)/sgw);
59
60 % Flujo de salida de gas
61 Tf = ((T-273.15)*(9/5))+32;
62 % qgo = (((660*kvg*(pg*1.45e-
63 4)+14.7))/sqrt((mgas/mair)*(Tf+460)))*vpg)*7.78e-6;
64 qgnum = ((pg*1.45e-4)+14.7)^2-((poc*1.45e-4)+14.7)^2;
65 qgden = (mgas/mair)*(Tf+460);
66 qgo = 962*kvg*vpg*sqrt(qgnum/qgden)*7.86579e-6;
67
68 % Cálculo de volúmenes de sección
69 va = hemivols(ha,La,ds); % Separador Crudo/Agua
70 vb = hemivols(hb,Lb,ds); % Colector de crudo
71
72 %% Modelo
73
74 % Nivel de crudo hc - Cámara de separación
75 dhc = (qci-qca)/hemihead(hc,La,ds);
76 % dhc = (qci-qca)/abs(hemihead(ha,La,ds)-hemihead(hw,La,ds));
77 % dhc = (qci-qca);
78
79 % Nivel de agua hw - Cámara de separación
80 dhw = (qwi-qwo)/hemihead(hw,La,ds);
81 % dhw = (qwi-qwo);
82
83 % Nivel de crudo hb - Colector
84 if ha <= hs
85     dhb = 0;
86 else
87     dhb = (qca-qcb)/hemihead(hb,Lb,ds);
88 end
89
90 % Presión del gas Pg
91 dpq = pg*(qci+qwi-qwo-qcb+qgi-qgo)/(vt-va-vb);
92
93 %% Salidas
94
95 data = [qwo; qca; qcb; qgo; va; vb; ha];
96
97 output = [dhc; dhw; dhb; dpq];

```

## ANEXO G: CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “WILSONCORR.M”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO

```
1 function k = wilsonCorr(pc, tc, wc, t, p)
2 % Función que permite calcular la correlación de Wilson
3 % pc: Presión crítica
4 % tc: Temperatura
5 % wc: Factor acéntrico
6 % t: Temperatura de operación
7 % p: Presión de operación
8
9 k = (pc/p)*exp(5.37*(1+wc)*(1-(tc/t)));
10
11 end
```

## ANEXO H: CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “CUBICPR.M”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO

```
1 function res = cubicPR(comp, data, T, P, state)
2 % CUBICPR Calcula el volumen molar de una mezcla de varios
3 compuestos
4 % Esta función está basada en Peng-Robinson EOS
5
6 % Constantes y coeficientes
7 R = 8.314; % J/molK
8 th1 = 0.22806;
9 th2 = 0.18772;
10 th3 = -0.96388;
11
12 if int64(sum(comp)) ~= 1
13     error('The summation of comp should be 1.');
```

```
14 end
15
16 r = length(comp);
17
18 bwa = zeros(r, 3);
19
20 for i = 1:r
21     bwa(i,1) = (0.0778*R*data(i,1)/(data(i,2)));
22     bwa(i,2) = 0.37464+(1.54226*data(i,3))-(0.26992*data(i,3)^2);
23     bwa(i,3) = ((1+bwa(i,2))*(1-
24 (T/data(i,1))^0.5))^2*((0.45724*R^2*data(i,1)^2)/data(i,2));
25 end
26
27 kij = zeros(r,r);
28
29 for j =1:r
30     for i = 1:r
31         s1 = 1-(bwa(j,1)/(2*bwa(i,1)))*sqrt(bwa(i,3)/bwa(j,3));
32         s2 = (bwa(i,1)/(2*bwa(j,1)))*sqrt(bwa(j,3)/bwa(i,3));
33         Tr = (T/data(i,1));
34         Pr = (P/data(i,2));
35         s3a = (th1/((Tr^th2)*(Pr^th3)));
```

```

36     s3 = ((bwa(j,1)*R*T)/(sqrt(bwa(i,3)*bwa(j,3))))*s3a;
37
38     kij(i,j) = s1 - s2 + s3;
39 %     kij(i,j) = 1-
40 ((8*(data(i,3)*data(j,3))^0.5)/(((data(i,3)^(1/3))+(data(j,3)^(1/3)
41     end
42 end
43
44 aij = zeros(r,r);
45
46 for j =1:r
47     for i = 1:r
48         aij(i,j) = sqrt(bwa(i,3)*bwa(j,3))*(1-kij(i,j));
49     end
50 end
51
52 xixjaij = zeros(r,r);
53
54 for j =1:r
55     for i = 1:r
56         xixjaij(i,j) = comp(i)*comp(j)*aij(i,j);
57     end
58 end
59
60 a = sum(sum(xixjaij));
61 b = sum(comp.*bwa(:,1));
62
63 A = (a*P/((R^2)*(T^2)));
64 B = (b*P/(R*T));
65
66 m = zeros(4,1);
67
68 m(1) = 1;
69 m(2) = B-1;
70 m(3) = (A-(3*B^2)-(2*B));
71 m(4) = (B^3+B^2-A*B);
72
73 z = roots(m');
74
75 switch state
76     case 'vapor'
77         V = ((z(1)*R*T)/P);
78     case 'liquid'
79         V = ((z(3)*R*T)/P);
80     otherwise
81         error('Choose a correct state ("vapor" or "liquid").');
82 end
83
84     res = V*0.001; % cm3/mol -> m3/kmol
85
86 end

```

## ANEXO I: CÓDIGO DE LA FUNCIÓN “FLASHWILSON.M”, ESCRITO EN MATLAB PARA EL DESARROLLO

```
1 function [a, L, V, pmv, pml, pmf, vl, vf, vv, kres, rhoc, rhov, sgl]
2 = flashWilson(F, z, t, p, data)
3
4
5 % Comprobando la composición
6 if (sum(z)) ~= 1
7     error('The sumation of z should be 1.');
```

8 end

9

10 % Número de componentes

11 r = length(z);

12

13 % Matriz de resultados k 1/k

14 kres = zeros(r, 4);

15 for i = 1:r

16 kres(i, 1) = wilsonCorr(data(i, 2), data(i, 1), data(i, 3), t,

17 p);

18 kres(i, 2) = 1/(kres(i, 1)-1);

19 end

20

21 % Encontrando a = V/F

22 k = kres(:,2);

23 a = fzero(@(a) rachfordRiceVF(k,z,a), 0.5);

24

25

26 % Composición de Vapor y Líquido

27 % Masa molar de V y L

28 pmv = 0;

29 pml = 0;

30 pmf = 0;

31

32 for i = 1:r

33 kres(i, 3) = z(i)/(1+a\*(kres(i,1)-1)); % xi

34 kres(i, 4) = kres(i,1)\*kres(i, 3); % yi

35 pmv = pmv + kres(i, 4)\*data(i,4);

36 pml = pml + kres(i, 3)\*data(i,4);

37 pmf = pmf + z(i)\*data(i,4);

38 end

39

40 % Volumen molar con Peng-Robison EOS

41 if a >= 0.5

42 fstate = 'vapor';

43 else

44 fstate = 'liquid';

45 end

46

47 vf = cubicPR(z, data, t, p, fstate);

48 vl = cubicPR(kres(:, 3), data, t, p, 'liquid');

49 vv = cubicPR(kres(:,4), data, t, p, 'vapor');

50

51 % De flujo Molar -> A Flujo Volumétrico

52 fmol = F/vf;

53 vmol = a\*fmol;

```
54 lml = fml-vml;
55 V = vml*vv;
56 L = lml*vl;
57 rhoc=(1/vl)*pml;
58 rhov=(1/vv)*pmv;
59 sgl=rhoc/998;
60 end
61
62 function res = rachfordRiceVF(k,z, a)
63
64 r = length(z);
65
66 sum = 0;
67
68 for i=1:r
69     sum = sum + z(i)/((k(i)+a));
70 end
71
72 res = sum;

end
```



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

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

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 29 / 09 / 2021

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

**LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE** Firmado digitalmente por  
LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE  
Fecha: 2021.09.29 10:50:54 -05'00'



1749-DBRA-UTP-2021