



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

**MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA**  
**HIDRÁULICO DE BOMBEO DE PETRÓLEO COMO**  
**HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA CONTROL DE PROCESOS**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR:** GABRIEL FERNANDO GARCÍA BUENAÑO

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

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, **Gabriel Fernando García Buenaño**

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, GABRIEL FERNANDO GARCÍA BUENAÑO, 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 autor 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, 03 de marzo de 2022

**Gabriel Fernando García Buenaño**

**060420319-0**

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

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de Integración Curricular; Tipo: Propuesta Tecnológica. **MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA HIDRÁULICO DE BOMBEO DE PETRÓLEO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA CONTROL DE PROCESOS**, realizado por el señor: **GABRIEL FERNANDO GARCÍA BUENAÑO**, 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. Marlon Ernesto Moscoso Martínez MSc. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2022-03-03
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada MSc. <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	_____	2022-03-03
Ing. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos MSc. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2022-03-03

## **DEDICATORIA**

Mi trabajo de titulación se lo dedico especialmente a Dios, quien me ha regalado la salud y vida para salir adelante con todo lo que me proponga. A mis dos ángeles mi abuelito Raúl Garcia y mi niño Dilan Garcia que desde el cielo me protegen y bendicen en todo momento. A mis tres soles en la tierra que alumbran mi camino, mis abuelitos Ana Lombeida, German Buenaño, Etelvina Pesantez con su amor y cariño me han ayudado a ser la persona que soy. A mis grandes pilares, mis padres Raúl Garcia y Karina Buenaño quienes han sido mi motivación en todo momento. A mi amiga y hermana que siempre ha estado alado mío Ana Garcia.

*Gabriel*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco primeramente a Dios por regalarme la salud y la vida para lograr este objetivo importante dentro de mi vida. A mi abuelito Raúl García y mi hermano Dilan García que sin su bendición desde arriba nada de esto hubiera sido posible.

A mis abuelitos Ana Lombeida, German Buenaño, Etelvina Pesantez que han sido como mis segundos padres y me han sabido guiar en este camino tan duro con su amor y cariño, siempre han sabido darme el ejemplo de salir adelante y no desmayar.

A mis padres Raúl García y Karina Buenaño al igual que a mi hermana Ana García quienes han estado alado mío a cada momento apoyándome incondicionalmente para no desviarme del camino y lograr este objetivo tan importante en mi vida ustedes han sido mi gran pilar en esta etapa universitaria.

A toda mi familia en general que han estado pendientes de mi en cada paso que he dado en mi vida universitaria. A Daniela por ser parte de este largo y hermoso camino universitario que se termina, por su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

A todos los docentes de mi carrera que con sus enseñanzas y consejos me han guiado durante mi paso universitario y han puesto su granito de arena para desenvolverme en mi vida profesional.

A mi alma mater la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a mi Carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias por ser parte de mi desarrollo como profesional predicando siempre la ética y la moral.

*Gabriel*

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY.....	xvii

### CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN.....	18
1.1. Antecedentes.....	18
1.2. Planteamiento del problema.....	19
1.3. Justificación del proyecto.....	19
1.4. Objetivos.....	20
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	20
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	20
1.5. Alcance.....	21

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Estado del Arte.....	22
2.2. Bases Teóricas.....	23
2.2.1. <i>Petróleo</i> .....	23
2.2.1.1. Características físico-químicas.....	23
2.2.2. <i>Procesos Previos al Sistema Hidráulico de Bombeo</i> .....	24
2.2.3. <i>Sistema Hidráulico</i> .....	24
2.2.4. <i>Subsistema de almacenamiento</i> .....	25
2.2.5. <i>Fundamentos de la Mecánica de Fluidos</i> .....	25
2.2.5.1. Fluidos.....	26
2.2.5.2. Propiedades de los Fluidos.....	26
2.2.5.3. Ecuaciones Fundamentales de Diseño.....	28

<b>2.2.6.</b>	<b><i>Componentes de una Estación de Bombeo de Petróleo</i></b> .....	31
<b>2.2.6.1.</b>	Accesorios .....	31
<b>2.2.6.2.</b>	Colectores de Válvulas .....	32
<b>2.2.6.3.</b>	Bombas y Estaciones de Bombeo .....	34
<b>2.2.6.4.</b>	Tanques de Almacenamiento .....	37
<b>2.2.6.5.</b>	Tuberías de Bombeo .....	38
<b>2.2.6.6.</b>	Puntos de Medición .....	39
<b>2.2.7.</b>	<b><i>Software Matlab</i></b> .....	40
<b>2.2.7.1.</b>	Características de Matlab .....	40
<b>2.2.7.2.</b>	Lenguaje de programación en Matlab .....	41
<b>2.2.7.3.</b>	Programación Orientada a Objetos .....	43
<b>2.3.</b>	<b>Marco Legal</b> .....	44
<b>2.3.1.</b>	<b><i>Normativa para el uso de tecnologías</i></b> .....	44

### CAPÍTULO III

<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	45
<b>3.1.</b>	<b>Variables y Parámetros de Diseño</b> .....	47
<b>3.1.1.</b>	<b><i>Parámetros que Intervienen en el Control</i></b> .....	47
<b>3.1.2.</b>	<b><i>Variables de Ingreso</i></b> .....	47
<b>3.1.3.</b>	<b><i>Propiedades del Fluido</i></b> .....	48
<b>3.2.</b>	<b>Modelado del Sistema</b> .....	48
<b>3.2.1.</b>	<b><i>Tubería horizontal</i></b> .....	50
<b>3.2.2.</b>	<b><i>Válvula</i></b> .....	53
<b>3.2.3.</b>	<b><i>Unión en T</i></b> .....	56
<b>3.2.4.</b>	<b><i>Codo</i></b> .....	61
<b>3.2.5.</b>	<b><i>Bomba Centrífuga</i></b> .....	64
<b>3.2.6.</b>	<b><i>Válvula Check</i></b> .....	66
<b>3.2.7.</b>	<b><i>Tanque de Almacenamiento</i></b> .....	69
<b>3.2.8.</b>	<b><i>Sistema de Control</i></b> .....	71
<b>3.3.</b>	<b>Simulación con Matlab</b> .....	72
<b>3.3.1.</b>	<b><i>Creación de una super clase en Matlab</i></b> .....	73
<b>3.3.1.1.</b>	Pipeline Element .....	73
<b>3.3.2.</b>	<b><i>Creación de subclases de cada elemento</i></b> .....	74
<b>3.3.2.1.</b>	Horizontal Pipe .....	74
<b>3.3.2.2.</b>	Tee Junction .....	75

3.3.2.3.	Elbow Junction .....	76
3.3.2.4.	Lineal Valve .....	77
3.3.2.5.	Centrifugal Pump.....	79
3.3.2.6.	Check Valve .....	81
3.3.3.	<i>Control de los Tanques con Simulink</i> .....	82
3.3.3.1.	Diagrama de bloques en Simulink .....	83
3.3.3.2.	Storage System .....	84
3.3.3.3.	Input Pipeline.....	85
3.3.3.4.	Output Pipeline .....	86
3.4.	<b>Creación de la Interfaz Gráfica</b> .....	88
3.4.1.	<i>Diseño de la pantalla de inicio</i> .....	88
3.4.2.	<i>Pasos para iniciar la simulación</i> .....	90
3.5.	<b>Validación de Datos Obtenidos</b> .....	90

## CAPÍTULO IV

4.	<b>GESTIÓN DEL PROYECTO</b> .....	92
4.1.	<b>Cronograma</b> .....	92
4.2.	<b>Presupuesto</b> .....	93
4.3.	<b>Recursos materiales</b> .....	93
4.4.	<b>Resultados</b> .....	93
4.4.1.	<i>Caso 1</i> .....	94
4.4.1.1.	Nivel de Fluido en los Tanques.....	94
4.4.1.2.	Caudal por línea Tubería (B,C).....	95
4.4.1.3.	Graficas de Control.....	96
4.4.2.	<i>Caso 2</i> .....	98
4.4.2.1.	Nivel de Fluido en los Tanques.....	98
4.4.2.2.	Caudal por línea Tubería (B,C).....	99
4.4.2.3.	Graficas de Control.....	101
4.4.3.	<i>Interfaz de usuario como herramienta didáctica</i> .....	102
4.4.4.	<i>Validación del control de nivel en los tanques de almacenamiento</i> .....	102
4.4.4.1.	Nivel de crudo en el tanque de la línea B.....	103
4.4.4.2.	Nivel de crudo en el tanque de la línea C.....	104
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	106
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	107

**BIBLIOGRAFÍA**  
**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Propiedades del Fluido del campo de producción de Sacha. ....	24
<b>Tabla 2-2:</b> Propiedades estructurales de los tanques de almacenamiento del Sacha. ....	38
<b>Tabla 3-2:</b> Propiedades de la tubería de Acero al Carbono.....	39
<b>Tabla 4-2:</b> Legislación sobre la utilización del software .....	44
<b>Tabla 1-3:</b> Parámetros que Intervienen en el Control. ....	47
<b>Tabla 2-3:</b> Variables de Ingreso. ....	47
<b>Tabla 3-3:</b> Propiedades del Fluido del campo de producción de Sacha. ....	48
<b>Tabla 4-3:</b> Parámetros de Control del Sistema. ....	72
<b>Tabla 5-3.</b> Atributos y Métodos de la clase Pipeline Element .....	73
<b>Tabla 6-3:</b> Parámetros de entada en los tanques de almacenamiento.....	84
<b>Tabla 7-3:</b> Parámetros de salida en los tanques de almacenamiento.....	84
<b>Tabla 8-3:</b> Parámetros de entrada en Input Pipeline. ....	85
<b>Tabla 9-3:</b> Parámetros de salida en Input Pipeline. ....	86
<b>Tabla 10-3:</b> Datos dentro del Bloque Input Pipeline. ....	86
<b>Tabla 11-3:</b> Parámetros de entrada en Output Pipeline. ....	87
<b>Tabla 12-3:</b> Parámetros de salida en Output Pipeline. ....	88
<b>Tabla 13-3:</b> Datos dentro del Bloque Input Pipeline. ....	88
<b>Tabla 1-4.</b> Cronograma del Proyecto.....	92
<b>Tabla 2-4.</b> Presupuesto del Proyecto .....	93
<b>Tabla 3-4:</b> Parámetros de Ingreso de la Interfaz. ....	93
<b>Tabla 4-4:</b> Error y Resultados obtenidos en el TK01 .....	104
<b>Tabla 5-4:</b> Error y Resultados obtenidos en el TK02 .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2.</b>	Campos de la Mecanica de Fluidos.....	25
<b>Figura 2-2.</b>	Tipo de Codos .....	31
<b>Figura 3-2.</b>	Division en T .....	32
<b>Figura 4-2.</b>	Tipos de Válvulas para Petróleo .....	32
<b>Figura 5-2.</b>	Válvula de Compuerta para Petróleo .....	33
<b>Figura 6-2.</b>	Válvula de Control para Petróleo.....	34
<b>Figura 7-2.</b>	Bomba Centrífuga .....	35
<b>Figura 8-2.</b>	Tanque de Techo Flotante .....	38
<b>Figura 9-2.</b>	Escritorio de Matlab .....	40
<b>Figura 10-2.</b>	Código Fuente y Ejecutable.....	41
<b>Figura 11-2.</b>	Proceso de Algoritmo a Programa .....	42
<b>Figura 1-3.</b>	Metodología del Proyecto.....	45
<b>Figura 2-3.</b>	Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo.....	49
<b>Figura 3-3.</b>	Tubería Horizontal.....	50
<b>Figura 4-3.</b>	Válvula de control .....	53
<b>Figura 5-3.</b>	Unión en T.....	56
<b>Figura 6-3.</b>	Codo .....	61
<b>Figura 7-3.</b>	Bomba Centrífuga .....	64
<b>Figura 8-3.</b>	Válvula Check .....	66
<b>Figura 9-3.</b>	Tanque de Almacenamiento .....	69
<b>Figura 10-3.</b>	Diagrama de Programación en Matlab.....	72
<b>Figura 11-3.</b>	Class Diagram .....	73
<b>Figura 12-3.</b>	Algoritmo Horizontal Pipe .....	74
<b>Figura 13-3.</b>	Algoritmo Tee Junction .....	75
<b>Figura 14-3.</b>	Algoritmo Elbow Junction.....	76
<b>Figura 15-3.</b>	Valores de Kv y Ko vs %Apertura en Matlab.....	78
<b>Figura 16-3.</b>	Lineal Valve .....	79
<b>Figura 17-3.</b>	Centrifugal Pump.....	81
<b>Figura 18-3.</b>	Check Valve .....	82
<b>Figura 19-3.</b>	Diagrama de Bloques Simulink .....	83
<b>Figura 20-3.</b>	Diagrama Input Pipeline.....	85
<b>Figura 21-3.</b>	Diagrama Output Pipeline .....	87
<b>Figura 22-3.</b>	Elementos de la Interfaz Gráfica.....	89
<b>Figura 23-3.</b>	Pantalla de Inicio de la Interfaz Gráfica.....	89

<b>Figura 24-3.</b> Diagrama utilizado en OpenModelica para la validación .....	91
<b>Figura 25-3.</b> Interfaz de usuario pantalla principal .....	102

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3.</b> Apertura vs coeficiente de la válvula .....	54
<b>Gráfico 2-3.</b> Apertura vs coeficiente de pérdida de la válvula .....	55
<b>Gráfico 3-3.</b> Plot Digitizer de Kv vs %Apertura.....	77
<b>Gráfico 4-3.</b> Plot Digitizer de Ko vs %Apertura.....	78
<b>Gráfico 5-3.</b> Plot Digitizer de Q vs H.....	80
<b>Gráfico 6-3.</b> Gráfica del Nivel de Crudo TK01 .....	94
<b>Gráfico 7-3.</b> Nivel de Crudo TK02.....	95
<b>Gráfico 8-3.</b> Caudal de salida de la Línea B .....	95
<b>Gráfico 9-3.</b> Caudal de salida de la Línea C .....	96
<b>Gráfico 10-3.</b> RPM de las Bomba PB01.....	96
<b>Gráfico 11-3.</b> Gráfica de la Apertura de la Válvula VC02.....	97
<b>Gráfico 12-3.</b> Gráfica del Nivel de Crudo TK01 .....	98
<b>Gráfico 13-3.</b> Nivel de Crudo TK02.....	99
<b>Gráfico 14-3.</b> Caudal de salida de la Línea B .....	99
<b>Gráfico 15-3.</b> Caudal de salida de la Línea C .....	100
<b>Gráfico 16-3.</b> RPM de las Bomba PB01.....	101
<b>Gráfico 17-3.</b> Gráfica de la Apertura de la Válvula VC02.....	101
<b>Gráfico 18-3.</b> Gráfica del Nivel de Crudo TK01 en OpenModelica .....	103
<b>Gráfico 19-3.</b> Gráfica del Nivel de Crudo TK01 en la App.....	104
<b>Gráfico 20-3.</b> Gráfica del Nivel de Crudo TK02 en OpenModelica .....	104
<b>Gráfico 21-3.</b> Gráfica del Nivel de Crudo TK02 en la App.....	105

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A: MANUAL DE USUARIO**

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>VARIABLE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
$\beta$	Coefficiente de pérdida
$dp_{min}$	Caída de Presión Mínima
$e$	Rugosidad Absoluta
$f_D$	Factor de Fricción
$f_s$	Factor de Escala
$f_T$	Factor de Fricción de la Tubería Aguas Arriba
$g$	Constante Gravitacional
$h_A$	Altura de Carga en el Punto A
$h_f$	Perdidas Primarias
$h_m$	Perdidas Secundarias
$h_{ref}$	Altura de Carga de Referencia
$k$	Coefficiente de Resistencia
$k_0$	Coefficiente de pérdida de la válvula
$k_v$	Coefficiente de la válvula
$Kv_i$	Coefficiente de la válvula nueva
$Kv_{ref}$	Coefficiente de la válvula de referencia
$\dot{m}$	Flujo Másico
$Re$	Número de Reynolds
$Sg$	Gravedad Específica
$\mu$	Viscosidad Dinámica
$w_{ref}$	Velocidad de Giro Nominal de la Bomba
$\gamma$	Peso Específico

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue desarrollar el modelado, simulación y control de un Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo como herramienta didáctica para la asignatura de Control de Procesos. Antes de realizar el modelado del proceso se determinaron las variables y parámetros de diseño que pueden modificar la estructura y el funcionamiento del Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo, después se planteó el modelado matemático del sistema haciendo uso de ecuaciones algebraicas y diferenciales. Una vez realizado el modelado matemático se procedió a la simulación del sistema con Matlab, donde se aplicó una programación orientada a objetos para simular cada uno de los elementos del sistema. Para el control del sistema se utilizó Simulink, en donde se implementó tres bloques de Matlab Function, con un control Proporcional Integral Derivativo (PID) para el nivel de los tanques de almacenamiento. Con la ayuda de la App Designer se creó la aplicación CSS (Crude Storage System), la misma que funciona de manera independiente de Matlab. Dentro de la aplicación se obtienen 4 graficas donde se ilustra: el nivel de fluido en los tanques, los caudales que pasan por las líneas B y C, las revoluciones por minuto de la bomba PB01 para controlar el nivel en el tanque de la línea B y el porcentaje de apertura de la válvula VC02 para controlar el nivel del tanque de la línea C. Finalmente se pudo realizar el modelado, simulación y control del sistema hidráulico de bombeo de petróleo mediante la utilización de Matlab y sus complementos los mismos que permitieron crear una aplicación independiente de Matlab para utilizarla como herramienta didáctica. Se recomienda incluir al proceso un catálogo de diferentes tipos de bombas para definir cual seria las diferencias y analizar los resultados al momento de cambiar de una bomba a otra.

**Palabras clave:** <APP DESIGNER>, <BOMBEO DE PETROELO>, <CONTROL DE PROCESOS>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <PETRÓLEO>, < PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)>, <SISTEMA HIDRÁULICO DE BOMBEO DE PETRÓLEO>.

LEONARDO  
FABIO  
MEDINA  
NUSTE

Firmado digitalmente por  
LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE  
Nombre de reconocimiento (DN):  
c=EC, o=BANCO CENTRAL DEL  
ECUADOR, ou=ENTIDAD DE  
CERTIFICACION DE INFORMACION-  
ECIBCE, l=QUITO,  
serialNumber=0000621485,  
cn=LEONARDO FABIO MEDINA  
NUSTE  
Fecha: 2022.04.12 10:48:59 -05'00'



0659-DBRA-UTP-2022

## SUMMARY

The objective is to develop the modeling, simulation and control of a Hydraulic Oil Pumping System as a didactic tool for the subject of Process Control. Before modeling the process, the variables and design parameters that can modify the structure and operation of the Oil Pumping Hydraulic System were determined, then the mathematical modeling of the system was proposed using algebraic and differential equations. Once the mathematical modeling was done, the system was simulated with Matlab, where object-oriented programming was applied to simulate each of the system elements. Simulink was used to control the system, where three blocks of Matlab Function were implemented, with a Proportional Integral Derivative (PID) control for the level of the storage tanks. With the help of the App Designer, the CSS (Crude Storage System) application was created, which works independently of Matlab. Within the application, 4 graphs are obtained where it is illustrated: the level of fluid in the tanks, the flows that pass-through lines B and C, the revolutions per minute of the PB01 pump to control the level in the tank of line B and the percentage of opening of the valve VC02 to control the level of the tank of line C. Finally, it was possible to carry out the modeling, simulation and control of the oil pumping hydraulic system through the use of Matlab and its complements, which allowed the creation of an independent application of Matlab to use it as a didactic tool. It is recommended to include a catalog of different types of pumps in the process to define what the differences would be and analyze the results when changing from one pump to another.

**Keywords:** <APP DESIGNER>, <PETROLEUM PUMPING>, <PROCESS CONTROL>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <PETROLEUM>, < PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)>, <PETROLEUM PUMPING HYDRAULIC SYSTEM>



Firmado electrónicamente por:  
NANCI  
MARGARITA INCA  
CHUNATA

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Antecedentes

Dentro de la industria del petróleo la fase de transporte es una actividad muy importante, ya que dentro de esta fase en nuestro país se lleva el crudo desde la Amazonia hasta Esmeraldas al puerto petrolero de Balao para su posterior venta o exportación, además se conduce el crudo a las refinerías para la obtención de derivados para el consumo local.

El consorcio Texaco-Gulf junto con la compañía William Brothers un 17 de julio de 1970 suscribió el contrato de construcción del SOTE (Sistema de Oleoducto Transecuatoriano), el mismo que se inauguró un 26 de junio de 1972 con una capacidad de 250000 bdp con un crudo de 30 °API. El SOTE fue ampliando su capacidad hasta llegar a su última ampliación de 360000 bdp en 1999 con un petróleo de 28,5 °API, en 1994 el gobierno ecuatoriano transfirió todas las instalaciones del SOTE a la empresa Petroecuador y desde el 2010 este es gestionado por EP Petroecuador, el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano está conformado por seis estaciones de bombeo y cuatro estaciones reductoras de presión (Poveda et al., 2013, p.79-81).

El Oleoducto de Crudos Pesados más conocido como (OCP) es el segundo oleoducto con el que cuenta Ecuador para el transporte del crudo desde la selva Amazónica hasta la zona litoral de nuestro país. Este oleoducto aparece por la insuficiente capacidad de transporte que tenía el SOTE, por esta razón se creó un oleoducto para crudos pesados denominado SOTE, el mismo que empezó a funcionar desde noviembre del 2003 diseñado para el transporte de crudo de 18° a 24° API (Poveda et al., 2013, p. 84).

Debido a razones de economía eficiencia y seguridad para transportar grandes cantidades de crudo o derivados de petróleo por tierra se utilizan los oleoductos que están compuestos de tuberías soterradas a lo largo de su trayecto, estas tuberías presentan perdidas por fricción debido a los líquidos que se transportan a través de estas y perdidas por presión al ser largos tramos de recorrido, para evitar estas pérdidas se ubican estaciones de bombeo en intervalos regulares a lo largo de la tubería con el objetivo de aumentar o reducir la presión a niveles deseados (Axaxl 2020, p. 1-2).

Por lo general una estación de bombeo consta de bombas centrifugas con válvulas de bloqueo y válvulas de retención de modo de que cada bomba puede funcionar independientemente del resto, las pérdidas que puede presentar una estación de bombeo sin detener el flujo de crudo en la tubería disminuirán el caudal, otra causa de perdidas dentro de las estaciones de bombeo es la falta de supervisión humana directa ya que la gran mayoría de estas estaciones de bombeo se encuentran en zonas remotas o con poca población, por lo cual los operadores de una estación de bombeo

deben poner énfasis en los softwares de control automático para evitar dichas pérdidas o catástrofes dentro de las estaciones de bombeo (Axaxl 2020, p.2).

Uno de los softwares más utilizados para la simulación de procesos químicos es Matlab ya que cuenta con una gran biblioteca de modelos, en este software se puede crear de forma inmediata el diseño de plantas en simulink y simularlos mediante la utilización de los diagramas de bloques del subsistema de la biblioteca de Matlab, estas simulaciones permiten a los ingenieros la visualización de aspectos claves del proceso, para la verificación de algoritmos de control los usuarios combinan el modelo de la planta junto con el modelo del sistema de control y así ejecutan simulaciones de circuito cerrado, estas simulaciones permiten la evaluación del rendimiento dinámico y estacionario de toda una planta (Ahmad y Petersen, 2012).

## **1.2. Planteamiento del problema**

En la actualidad un oleoducto es un sistema de transporte de hidrocarburos rápido, rentable seguro, que consiste en ensamblar tubos de acero a lo largo de un trayecto determinado, ya sea sobre la superficie o enterrado bajo tierra, desde el campo productor hasta el punto de refinación y/o de embarque.

En la parte inicial de un oleoducto, una estación de bombeo es la encargada de impulsar el petróleo y dependiendo de la topografía por donde éste pase, se colocan estratégicamente otras estaciones denominadas de reimpulso o refuerzo, necesarias para que le permitan superar sitios de gran altura, como las cordilleras, y transportar el petróleo hasta la estación terminal.

Sin la existencia de un sistema hidráulico de bombeo el cual permita transportar el crudo a través de tuberías para su posterior almacenamiento y fiscalización no sería posible su disposición final como son las refinerías y buques de carga, por cual se debe conocer las diferentes variables y parámetros que rigen este sistema, tomando en cuenta la presión y viscosidad del crudo que se vaya a transportar.

Actualmente los softwares de simulación no han sido potenciados para ser usados en procesos como herramientas didácticas de educación dentro de las diferentes Ingenierías, ya que estas presentan un costo muy elevado al adquirirlas a empresas privadas que ofrecen servicios de aplicaciones para educación virtual.

## **1.3. Justificación del proyecto**

Los sistemas hidráulicos de bombeo de petróleo cumplen un papel muy importante ya que permiten transportar el crudo de un lugar a otro a través del oleoducto, ya que este cuenta con bombas que impulsan al crudo para que fluya a través de las tuberías, además nos permite

almacenar dicho crudo antes de que sea transportado, todo esto con el objetivo saber cuál es el caudal de crudo que se está enviando por las tuberías para su disposición final.

Dentro de la carrera de Ingeniería Química se trata materias relacionadas con el petróleo, las mismas que necesitan de una educación interactiva con los estudiantes, por dicho motivo se optó por simular un sistema hidráulico de bombeo de petróleo que permita modificar las variables que intervienen en el proceso para analizar los resultados que se obtengan. Esta simulación se presenta como una herramienta básica de educación ya que nos ayuda a predecir el comportamiento del petróleo al momento de ser transportado, almacenado y fiscalizado por tal razón los estudiantes la carrera de Ingeniería Química podrán contar con programas que permitan mejorar su educación.

#### **1.4. Objetivos**

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

Modelar, simular y controlar el sistema hidráulico de bombeo de petróleo como herramienta didáctica para Control de Procesos.

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

- Identificar las variables y parámetros de diseño de un sistema hidráulico de bombeo de petróleo
- Modelar matemáticamente en función de las variables y parámetros el sistema hidráulico de bombeo de petróleo.
- Simular el sistema hidráulico de bombeo mediante software, tomando en consideración su interfaz gráfica para la adecuada interacción con el estudiante.
- Realizar un manual de uso de la herramienta didáctica y validar la modelación programada.

## **1.5. Alcance**

El presente trabajo de titulación al basarse en una propuesta tecnológica hace uso de herramientas tecnológicas para el desarrollo del modelado, simulación y control del sistema hidráulico de bombeo de petróleo. Para el modelado se usan ecuaciones que definen a cada elemento del sistema en Matlab, posteriormente se utiliza una herramienta de Matlab llamada Simulink para realizar los lazos de control del sistema, para finalmente utilizar App Designer al momento de crear la interfaz gráfica de usuario como aplicación ejecutable independiente de Matlab.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Estado del Arte

El petróleo tiene un papel muy importante en países con una necesidad de combustible ya sea este para consumo industrial o movilización, con la alta demanda mundial y la disminución de crudos livianos se considera hoy en día a los crudos medianos y pesados como un recurso energético del mundo, debido a la presencia de estos crudos las estaciones de bombeo tanto como oleoductos presentan problemas en el transporte a causa de la viscosidad ya que esta provoca una fuerza de fricción opuesta al flujo, es por eso que la viscosidad es una propiedad física muy importante ya que esta controla el libre flujo del crudo, de tal manera esto hace que las condiciones de bombeo sean altas para largos tramos, solo así se superaran las fuerzas de fricción. (Souas et al., 2020, p.1-2). El transporte de petróleo al igual que el almacenamiento de este se ha convertido en un eslabón clave dentro de toda la producción en los campos petroleros, ya que el objetivo principal es satisfacer la demanda tanto de almacenamiento, medición y transporte del crudo. Un sistema de transporte se lo considera muy complejo y de gran tamaño ya que puede estar compuesto de tanques de almacenamiento, bombas, válvulas y una pluralidad de oleoductos de largar distancia (Yuan, 2018, p.1).

Con el desarrollo acelerado tanto del sistema de almacenamiento como el transporte de crudo en la actualidad se apoya de la tecnología ya que ambos avanzan de la mano, con la ayuda del avance de la tecnología se ha hecho posible simular y optimizar el proceso complejo de varios sistemas operativos de producción (Yuan, 2018, p.2).

Dentro de los estudios de Zakharova y Komkov (2019) se ha visto que en las estaciones de bombeo uno de los principales problemas es la implementación de accionadores eléctricos de autoarranque, este inconveniente se muestra debido a que dentro de las estaciones existen estrictos requisitos para que el crudo pueda ser transportado sin ningún inconveniente por tuberías y posteriormente por un oleoducto.

Estos estudios han llegado a desarrollar una simulación del autoencendido de un conjunto de accionadores eléctricos de composición mixta dentro del programa ETAP para una estación de bombeo, esto con el objetivo de asegurar el autoarranque de motores eléctricos y estudiar la influencia que tienen estos entre sí, con la experimentación de varios modelos se pudo obtener valores de voltaje pertenecientes a la estabilidad estática y dinámica del sistema eléctrico, con la finalidad de determinar las condiciones óptimas del sistema para el autoarranque grupal de las bombas. Con el correcto funcionamiento estos motores se puede dar y facilitar un funcionamiento sin interrupciones (Zakharova y Komkov, 2019, pp.1-2).

El control del transporte de crudo manteniendo la presión deseada durante todo el proceso se lo lleva a cabo electrónicamente, haciendo un control en el variador de frecuencia y válvulas dispuestas en la tubería, durante el bombeo del crudo a través de la tubería puede cambiar el volumen planificado de la bomba y por ende la presión en la tubería junto con el punto de operación en las condiciones de alimentación debido al funcionamiento de las bombas (Starikov et al, 2015, p.1).

Una de las razones para cambiar la posición del punto donde funciona el conjunto de bombas son los diferentes cambios de presión que se dan debido al cambio de tubería transversales, consumo de aceite y válvulas de limitación, con el transporte de diferentes clases de crudos se merma el rendimiento del oleoducto principal ocasionando pérdidas para la empresa, de tal manera resulta muy necesario un control automático de todo el oleoducto de crudo, con esto se garantiza una minimización del consumo de energía eléctrica de las unidades de bombeo y por ende mejora la eficiencia del oleoducto principal (Starikov et al, 2015, p.2).

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. *Petróleo***

Se denomina petróleo a una mezcla compleja natural de compuestos hidrocarbúricos, originados de la descomposición de la materia orgánica (dinosaurios, plantas y árboles prehistóricos) con efecto de la presión y calor en un lapso de miles de años. En Ecuador se conoce de la existencia del petróleo a mediados del siglo XIX, por otra parte, en el año 1858 Manuel Villavicencio un geógrafo ecuatoriano detallo en su libro sobre la geografía del Ecuador que encontró alquitrán y asfalto en los manantiales salitrosos de la cordillera Cutucú (Poveda et al. 2013, pp.13-19).

#### **2.2.1.1. *Características físico-químicas***

El petróleo tiene características tanto físicas como químicas que permite diferenciar a las diferentes clases de petróleo entre sí, entre las características más importantes se tiene:

- Color
- Olor
- Densidad
- Coeficiente de Expansión
- Índice de Refracción
- Viscosidad
- Punto de ebullición
- Punto de congelación
- Poder calórico

Los colores del petróleo varían con la reflexión de la luz estos van desde amarillos pálidos, verdes, rojos pardos hasta el color negro, los crudos negros son pesados y extrapesados, por otra parte, los más livianos llegan a tener un color blanquecino verdoso. En el Ecuador en el Campo Sacha se extrae petróleo con una gravedad API de 27,1 con una producción de 38638.56 BPD (Poveda et al. 2013, pp.13-19). Este crudo será el que se tome en cuenta para la simulación, el mismo cuenta con las siguientes propiedades calculadas en el campo de producción del Sacha:

**Tabla 1-2:** Propiedades del Fluido del campo de producción de Sacha.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	891.75	$kg/m^3$
Viscosidad	0.02083	$Pa \cdot s$
Gravedad Especifica	0.8922	$adm$

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 2.2.2. *Procesos Previos al Sistema Hidráulico de Bombeo*

Antes del Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo tenemos a dos proceso que son de suma importancia hasta llegar al ya mencionado, como primer punto tenemos a la extracción de crudo que se lo hace en los campos petroleros con torres de perforación y bombas que permiten succionar el crudo de los yacimientos, a continuación de esto tenemos a unos de los más importantes que es el proceso de separación de crudo, agua y gas, el crudo que sale de dicho separador trifásico es el que se dirige por tuberías al sistema hidráulico de bombeo de petróleo dicho crudo ingresa a una presión de 2 atm.

### 2.2.3. *Sistema Hidráulico*

Un sistema hidráulico consta de varios dispositivos que mediante el uso de un flujo de líquidos permite generar movimiento de este. La capacitancia de un fluido está relacionado al área transversal del equipo que almacena este flujo, los mismo que normalmente son tanques y tuberías de gran diámetro (Roa Bohórquez et al, 2018, p.78).

La resistencia que se ve presente en el fluido corresponde a una resistencia hidráulica, ya que aquí se hace referencia a los elementos que limitan el paso del flujo que por lo general son válvulas, por otro lado, se tiene a los elementos que causan perdidas longitudinales y por accesorios (Roa Bohórquez et al, 2018, p.79).

#### 2.2.4. Subsistema de almacenamiento

Un tanque hidráulico tiene como función principal la de contener o almacenar el fluido de un sistema hidráulico, un tanque de almacenamiento sirve también para almacenar como su nombre lo dice al igual que enfriar (Roa Bohórquez et al, 2018, p.82).

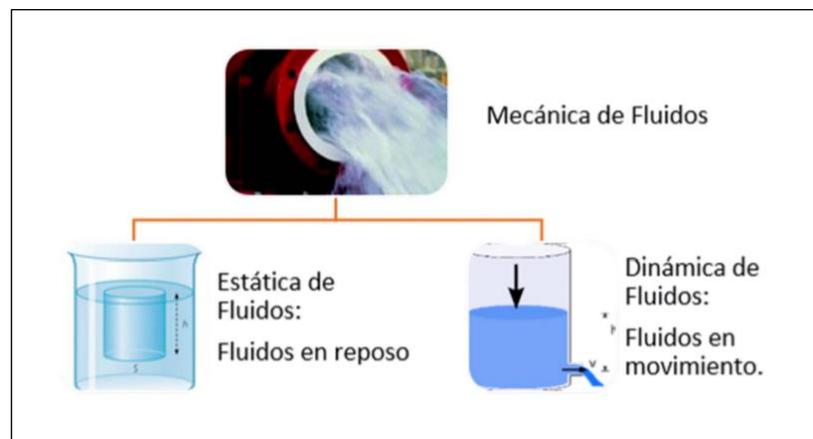
Un aspecto muy importante en el funcionamiento del tanque es la desviación del fluido, por lo cual las líneas que regresan fluido al tanque deben colocarse por debajo del nivel del nivel del fluido y al lado opuesto a la placa deflectora de succión. Los sistemas hidráulicos de mediano o pequeño tamaño utilizan estos tanques o depósitos como base de montaje para válvulas de alivio, bombas todo en conjunto es denominado una unidad generadora de presión o unidad de bombeo (Roa Bohórquez et al, 2018, p.82).

#### 2.2.5. Fundamentos de la Mecánica de Fluidos

La mecánica de fluidos se la define como la ciencia que se encarga de estudiar el comportamiento de los fluidos tanto en reposo como en movimiento y la interacción que estos tienen con otros fluidos o sólidos en las fronteras (Cotos, 2019, p.17).

Dentro de la mecánica de fluidos podemos tener dos puntos de vista que son:

- **Estática de los fluidos:** este campo de la mecánica de fluidos estudia a los fluidos en reposo (Cotos, 2019, p.17).
- **Dinámica de los fluidos:** este campo de la mecánica de fluidos estudia a los fluidos en movimiento (Cotos, 2019, p.17).



**Figura 1-2.** Campos de la Mecánica de Fluidos

Fuente: Cotos, 2019, p.17.

### 2.2.5.1. Fluidos

Los fluidos son sustancia que constantemente se deforman cuando son sometidos a una fuerza cortante o tangencial, los fluidos pueden ser de dos tipos líquidos o gases (Cotos, 2019, pp.17-18).

- **Líquidos:** este tipo de fluido adopta la forma del recipiente que lo contiene, los líquidos son incompresibles (Cotos, 2019, pp.17-18).
- **Gases:** los gases ocupan totalmente todo el recipiente que los contienen, los gases son un fluido compresible (Cotos, 2019, pp.17-18).

### 2.2.5.2. Propiedades de los Fluidos

- Densidad

La densidad se define como la masa contenida en una unidad de volumen del material, sabiendo esto la densidad es una de las formas más útiles para caracterizar una sustancia al especificar la cantidad de sustancia por unidad de volumen (Cotos, 2019, pp.26-27).

La densidad está dada por:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

$m$       Masa  
 $v$       Volumen

- Peso Específico

El peso específico se define como el peso que tiene un cuerpo por unidad de volumen (Cotos, 2019, p.27). El peso específico esta dado por:

$$\gamma = \frac{w}{v}$$

Donde:

$w$       Peso

$v$  Volumen

- Gravedad Específica

La gravedad específica se define como la razón que existen entre la densidad de la sustancia y la densidad que tiene el agua a una temperatura de (4°C) (Cotos, 2019, p.28). La gravedad específica viene dada por:

$$Sg = \frac{\rho_{sustancia}}{\rho_{agua}}$$

- Viscosidad

La viscosidad es la oposición que tiene el fluido a las deformaciones tangenciales, cabe recalcar que todos los fluidos que se conocen presentan una viscosidad dada, por otra parte, un fluido que no tiene viscosidad es considerado como un fluido ideal. Dentro de la viscosidad tenemos a la viscosidad dinámica y a la viscosidad cinemática (Cotos, 2019, pp.31-32).

a) Viscosidad Dinámica

La viscosidad dinámica se define como la propiedad que tiene un fluido que se caracteriza por ejercer una resistencia a fluir, ocasionada por el rozamiento entre las moléculas de este (Cotos, 2019, p.32). La viscosidad dinámica viene dada por:

$$F = A * \mu * \frac{dv}{dy}$$

Donde:

$F$	Fuerza aplicada a la placa superior
$A$	Área de contacto de la placa con el fluido
$\mu$	Viscosidad Dinámica
$dv/dy$	Variación de la velocidad con respecto a la distancia de las dos placas

b) Viscosidad Cinemática

La viscosidad cinemática se define como la medida de resistencia interna del fluido a fluir bajo fuerzas netamente gravitacionales (Cotos, 2019, p.33). La viscosidad cinemática viene determinado por:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

$\mu$	Viscosidad Dinámica
$\rho$	Densidad del fluido
$v$	Viscosidad cinemática del fluido

2.2.5.3. Ecuaciones Fundamentales de Diseño

- Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es la que permite a los fluidos incompresibles y a los fluidos ideales relacionar cambios en la presión y la velocidad a lo largo de una línea de corriente, para esta ecuación se debe analizar todo el sistema para simplificarlo a su máxima expresión (Cotos, 2019, pp.105-106). La ecuación de Bernoulli en dos puntos dados se define como:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_m$$

Donde:

$P_A$	Presión en el punto A
$P_B$	Presión en el punto B
$v_A$	Velocidad en el punto A
$v_B$	Velocidad en el punto B
$\gamma$	Peso Específico
$g$	Constante Gravitacional
$Z_1$	Altura en el Punto 1

$Z_2$	Altura en el Punto 2
$h_f$	Perdidas Primarias
$h_m$	Perdidas Secundarias

- Perdidas Primarias

Las perdidas primarias o también llamadas perdidas por fricción son las que se generan al haber un rozamiento entre las capas de un fluido con la tubería ya sea este fluido laminar o turbulento, por lo cual se puede decir que las perdidas primarias dentro de las tuberías son función tanto de la longitud, factor de fricción, diámetro y velocidad del fluido (Agila y Calahorrano, 2011, pp.25-26). Las perdidas primarias vienen dadas por la fórmula de Darcy-Weisbach como se lo muestra a continuación:

$$h_f = f_D \cdot \frac{L}{\emptyset} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

$f_D$	Factor de Fricción
$L$	Longitud
$\emptyset$	Diámetro
$v$	Velocidad
$g$	Constante Gravitacional

a) Factor de Fricción

El factor de fricción es un numero adimensional que depende del valor del número de Reynolds y la rugosidad relativa, dependiendo de si es un flujo laminar o turbulento se tiene dos fórmulas diferentes para su calcular dicho factor de escala (Agila y Calahorrano, 2011, pp.26-27).

El factor de fricción para un fluido laminar viene dado por:

$$f_D = \frac{64}{Re} \quad Re \leq 2100$$

El factor de fricción para un fluido turbulento viene dado por:

$$f_D = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{e}{3,7 \cdot \emptyset} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad Re \geq 4000$$

Donde:

$e$	Rugosidad Absoluta
$\emptyset$	Diámetro
$Re$	Número de Reynolds

b) Numero de Reynolds

El número de Reynolds es el cociente entre las fuerzas inerciales por las viscosas, este parámetro es utilizado para determinar si un fluido es de régimen laminar o turbulento (Agila y Calahorrano, 2011, p.27). La fórmula para determinar el número de Reynolds viene dada por:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot \emptyset}{\mu}$$

Donde:

$\rho$	Densidad
$v$	Velocidad
$\emptyset$	Diámetro
$\mu$	Viscosidad Dinámica

- Ecuación de Perdidas Menores

Las pérdidas menores o pérdidas secundarias son aquellas que se dan a causa de los accesorios que complementan a las tuberías sean estos codos, válvulas divisiones en T, por lo cual todos los accesorios de la tubería generan pérdidas menores o secundarias (Agila y Calahorrano, 2011, p.28). La fórmula que define a las pérdidas secundarias es:

$$h_m = k \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

$k$	Coefficiente de Resistencia
$v$	Velocidad
$g$	Constante Gravitacional

## 2.2.6. Componentes de una Estación de Bombeo de Petróleo

### 2.2.6.1. Accesorios

- Codos

Los codos son accesorios en forma curva que son utilizados para variar la dirección que va tomando las líneas de tuberías estos pueden variar en sus ángulos y pueden ser de tres tipos como se muestra en la figura 2-2, para el sistema hidráulico de petróleo los codos son de acero al carbono con norma ASTM A234 WPB (esta norma es específica para los accesorios para tubos de acero al carbono) (Brenes et al, 2018, p.45).



**Figura 2-2.** Tipo de Codos

**Fuente:** Octalacero, 2021, p.2.

- División en T

Las tes son accesorios que son utilizadas para la unión entre tuberías para unificar el fluido o por otra parte también se puede utilizar para separar el fluido en dos corrientes diferentes, las entradas de este accesorio pueden ser del mismo tamaño o diferente dependiendo de la necesidad y uso de este, para el sistema hidráulico de petróleo la división en T es de acero al carbono con norma

ASTM A234 WPB (esta norma es específica para los accesorios para tubos de acero al carbono)  
(Brenes et al, 2018, p.45).

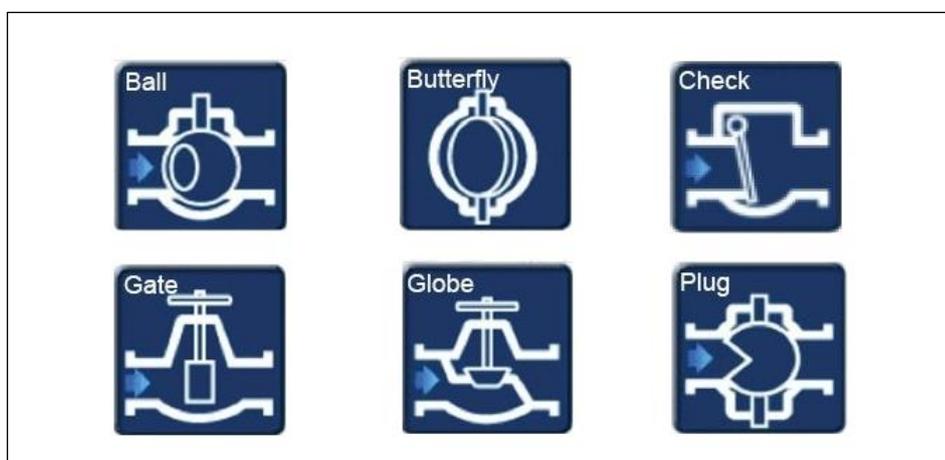


**Figura 3-2.** Division en T

**Fuente:** Octalacero, 2021, p.2.

#### 2.2.6.2. Colectores de Válvulas

Las válvulas se instalan en ubicaciones estratégicas a lo largo de la tubería principal esto con el fin de poder controlar flujos y presiones dentro de la tubería, otro papel muy importante de las válvulas es el da aislar segmentos de tuberías en caso de emergencia que puede ser alguna ruptura o corrosión de esta. Todas las válvulas dispuestas en el sistema de tuberías necesitan un mantenimiento continuo y un control, con el objetivo de monitorear periódicamente su funcionamiento, rendimiento y desgaste (Pharris y Kolpa, 2008, p.8).



**Figura 4-2.** Tipos de Válvulas para Petróleo

**Fuente:** Thompson, 2016, p.12

- Válvulas Regulatoras de Caudal

Las válvulas reguladoras de caudal se utilizan principalmente para controlar el caudal en un sistema de tuberías y sus ramales, dicho proceso de regulación de caudal se lo realiza mediante la regulación manual de una pieza que tapa el paso del fluido total o parcial, estas válvulas nos sirven para controlar el paso del líquidos y gases, en el sistema hidráulico de petróleo se trabaja con válvulas reguladoras de caudal de tipo compuerta las mismas que se adaptan a las tuberías del sistema, esta válvula cumple las especificaciones de la norma ASTM A105 (esta norma específica fabricación de válvulas de acero al carbono) (Agila y Calahorrano, 2011, p.90).



**Figura 5-2.** Válvula de Compuerta para Petróleo

**Fuente:** Valves, 2021, p.5.

- Válvulas de Control

Una válvula de control utiliza una amplia red de bucles de control para mantener una variable constante en el proceso esta puede ser el nivel, la presión, el flujo, etc. Esta válvula me asegura que dichos parámetros se encuentren en el rango establecido para poder garantizar el funcionamiento en este caso del sistema hidráulico de bombeo de crudo, cada uno de los bucles de la válvula generan una perturbación  $q$  afecta a la variable del proceso, para reducir este efecto de las perturbaciones tanto los sensores como transmisores recopilan información acerca de la variable del proceso y si existe algún ajuste que se le quiera realizar. La válvula de control principalmente está compuesta por l cuerpo de la válvula, las piezas internas, el actuador y algunos transductores, dentro de las válvulas de control existen dos tipos dependiendo del cierre de esta, entre los más comunes son las válvulas de vástago deslizante o vástago rotativo, todas estas se rigen a la norma ASTM A105 (esta norma específica fabricación de válvulas de acero al carbono) (Fisher, 2019, pp.15-19).



**Figura 6-2.** Válvula de Control para Petróleo

Fuente: Fisher, 2019, p.7.

### 2.2.6.3. Bombas y Estaciones de Bombeo

Uno de los factores al diseñar y construir una estación de bombeo es el rendimiento de materiales deseados al igual que los factores circunstanciales a lo largo de la tubería, para obtener un tamaño de individual de las bombas y caídas de presión mínimas se basa en las presiones de operación y cambio de grado, estos cambios de grado establecen la ubicación de las estaciones de bombeo. Las estaciones de bombeo son automatizadas completamente, estas pueden también ser diseñadas para ser maniobradas e incluso pueden tener funciones auxiliares como instalaciones de recuperación de crudo o como base para inspeccionar los tramos de tubería principal, la ubicación y el equipamiento se puede ver influenciados por el factor económico por lo cual se genera un gran compromiso al determinar la capacidad de bombeo y el número de estaciones ubicadas a lo largo del oleoducto. La ubicación de las estaciones de bombeo es muy importante para determinar la longitud total de la tubería hasta el destino terminal, al igual que la flexibilidad necesaria para poder quitar o agregar materiales a lo largo de la tubería (Pharris y Kolpa, 2008, pp.31-32).

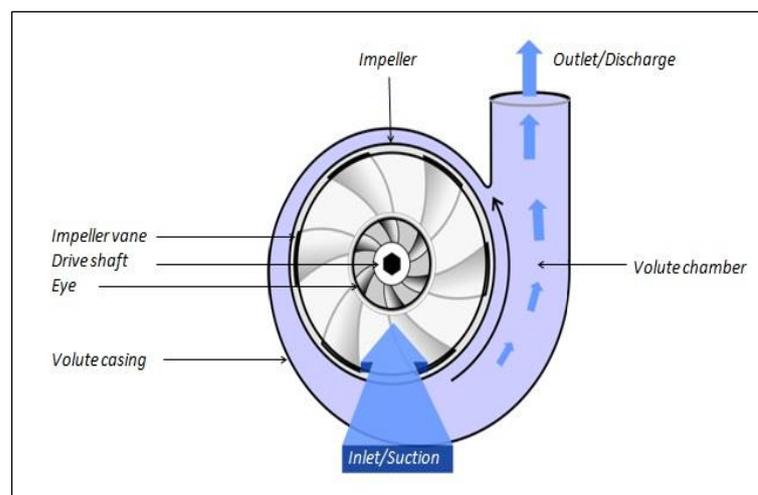
Como mínimo dentro de las estaciones de bombeo se debe incluir bombas (cuya función principal es tener contacto con el fluido y proporcionar la energía cinética necesaria para que este pueda ser llevado de un punto a otro) y motores primarios (proporcionan energía generalmente son fuentes de energía mecánica a las bombas), para evitar paros por fallos y para facilitar el mantenimiento de tuberías en la mayoría de estaciones de bombeo se dispone de bombas en paralelo, dentro de las estaciones de bombeo también se cuenta con tanques de almacenamiento temporal (Pharris y Kolpa, 2008, pp.31-32).

Dentro de las estaciones de bombeo se tienen varios diseños de bombas en tuberías de petróleo y productos derivados del petróleo, para la selección del diseño de las bombas se recurre a la eficiencia deseada como también a las propiedades físicas de los fluidos que se van a mover,

dentro de las principales propiedades físicas se tiene a la gravedad específica y a la viscosidad, otro de los aspectos importantes para el diseño de las bombas es el diferencial de presión el cual nos permite seleccionar bombas que tengan la capacidad de mover los fluidos en diferentes cambios de elevación. Existen dos diseños de uso común de bombas estos son: bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas, estas últimas son las más idóneas para desplazar grandes volúmenes de fluido a presiones moderadas, por otra parte, las bombas de desplazamiento positivo se las ocupa para mover pequeños volúmenes de fluido a presiones elevadas (Pharris y Kolpa, 2008, p.34).

- Bombas Centrífugas

Una bomba centrífuga se caracteriza por ser un dispositivo hidráulico que transforma la energía mecánica del impulsor en energía cinética para impulsar el fluido que pasa a través de esta, en este tipo de bombas el fluido ingresa axialmente a la succión de la bombas hasta ubicarse en el impulsor, posteriormente el impeller hacen que el fluido tenga un movimiento rotacional, de esta manera el fluido se proyecta hacia el exterior gracias dicha fuerza centrífuga del impeller, las bombas centrífugas constan de una carcasa cuyo función es la de cámara recolectora (Solano, Reyes y Ortega, 2012, pp.4-8).



**Figura 7-2.** Bomba Centrífuga

Fuente: Smith, 2021, p.34.

- Ecuaciones de Diseño

Para el diseño de una bomba centrífuga se debe tomar muy en cuenta los siguientes términos y ecuaciones:

a) Caudal de referencia

Mediante la determinación de cuál es el caudal de referencia que pasa a través de la bomba se puede calcular la altura de carga de referencia de esta haciendo usos de los catálogos de fábrica de bombas que nos permiten ver la curva de funcionamiento en este caso la bomba va a ser de la marca KSB modelo 100-080-400. Para saber cuál es el caudal de referencia que pasa por la bomba se basa en las fórmulas del modelado de una bomba centrífuga de Matworks (2021, p2), la fórmula es la siguiente:

$$q_{ref} = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \left(\frac{w_{ref}}{w}\right) \cdot \left(\frac{1}{fs}\right)^3$$

Donde:

$\dot{m}$	Flujo Másico
$\rho$	Densidad
$w_{ref}$	Velocidad de Giro Nominal de la Bomba
$w$	Velocidad de Giro Requerida
$fs$	Factor de Escala

b) Carga Elástica total

La carga elástica total nos ayuda a encontrar la altura de carga de la bomba es decir la carga elástica de succión de la bomba que va a tener al funcionar en nuestro sistema hidráulico de bombeo de petróleo, para calcular dicha carga elástica total se hace uso de la siguiente ecuación:

$$h_B = h_A + h_{ref}$$

Donde:

$h_A$	Altura de Carga en el Punto A
$h_{ref}$	Altura de Carga de Referencia

c) Presión

Para definir la presión de salida de la bomba se hace referencia a la ecuación de Bernoulli para un punto dado como se muestra a continuación:

$$h = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z_1$$

Donde:

$P$	Presión
$v$	Velocidad
$\gamma$	Peso Específico
$g$	Constante Gravitacional
$Z_1$	Altura en el Punto 1

#### 2.2.6.4. *Tanques de Almacenamiento*

En la mayoría de los sistemas de bombeo a través de tuberías se tiene la capacidad de recibir o almacenar temporalmente el crudo o producto enviado desde el extremo de llegada a dicho sistema, el almacenamiento de este depende de factores como la tubería y del tipo de crudo que se bombea, para el diseño y construcción de tanques de almacenamiento se ha decretado estándares ASME y API (Pharris y Kolpa, 2008, p.5).

El almacenamiento de crudo puede ser tanto en tanques aéreos o en subterráneos, pero generalmente siempre predominan los tanques aéreos, para el diseño de estos se incluyen tanques de techo cónico, techo flotante abiertos, techo flotante cubiertos y tanques esféricos este último utilizado para el almacenamiento de gases (Pharris y Kolpa, 2008, p.6). los más utilizados para el almacenamiento de crudo son los tanques de techo flotante los mismos que se van a describir a continuación.

- **Tanque de Almacenamiento de Techo Flotante**

Estos tipos de tanques son de construcción similar a los tanques de techo cónico, pero se diferencian porque los tanques de techo flotante tienen una tapa superior que flota con el crudo que se almacena. Este tipo de tanques no nos deja espacio la superficie del crudo y a cubierta esto debido a que la presión en el interior de estos tanques es semejante a la atmosférica, por esta razón la presión al interior de estos tanques es igual a la presión atmosférica. Este tipo de tanques se los

puede construir debido a la volatilidad y tipo de fluido que se va a almacenar (Mateus y Vivas, 2007, pp.4-7).

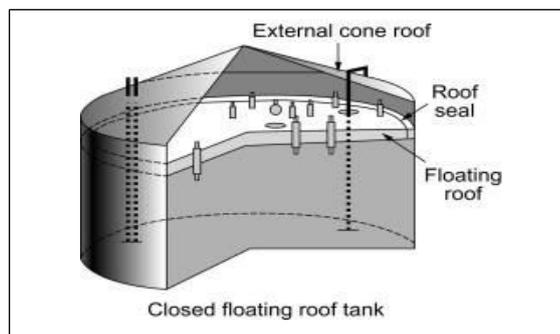
Dentro de las características de los tanques de techo flotante del campo de producción de Sacha se tiene:

**Tabla 2-2:** Propiedades estructurales de los tanques de almacenamiento del Sacha.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	3,00	m
Altura	4,00	m
Altura de Seguridad	2,00	m

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Estos tanques de techo fijo tienen una altura de seguridad que permite controlar el nivel en este caso la altura de seguridad para este tanque del campo del sachá con esas dimensiones es de 2 m, estos tanques se ubican sobre un área específica que alberga varios de estos para almacenar el crudo y poder distribuirlos a través de las líneas de crudo por acción de las bombas cuya función es hacer fluir al crudo que se encuentra al interior de estos tanques. En la figura 8-2 se puede observar la estructura de un tanque de techo fijo para almacenar crudo (Mateus y Vivas, 2007, pp.4-7).



**Figura 8-2.** Tanque de Techo Flotante

Fuente: Barker, 2018, p.15.

#### 2.2.6.5. Tuberías de Bombeo

Estas tuberías están diseñadas para el transporte de materiales a largas distancias, dentro de estos materiales están el petróleo crudo y derivados del mismo, se ha visto que para el transporte de grandes cantidades de materiales por tuberías se debe recurrir a un bombeo de multiestación, ya que para un bombeo de una sola estación se requiere una altura de bombeo alta por lo cual se necesitaría tuberías más resistentes y por ende más costosas, en el bombeo de varias etapas

mediante un proceso de enumeración se conoce el número óptimo de etapas, dicho proceso no ayuda a identificar una dependencia entre las variables de diseño y los parámetros de entrada (Swamee, 1996, p.1).

Las tuberías que se utilizan para el bombeo de petróleo cumplen con los estándares API 5L, ASTM A53, ASTM A105, ASTM A179, ASTM A192, ASTM A252, ASTM A333 estándares normalizados para tuberías de acero al carbono, dentro de las características de las tuberías de acero al carbono de la marca Octal se tienen las siguientes:

**Tabla 3-2:** Propiedades de la tubería de Acero al Carbono.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro Exterior	10.3 - 1500	<i>mm</i>
Rugosidad	0.45	<i>mm</i>
Longitud	personalizada	<i>m</i>

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

- Tipos de Tuberías de Bombeo

La tubería más utilizada para el transporte de crudo es de acero al carbono la misma que se fabrica de acuerdo con las especificaciones API (American Petroleum Institute), ASME (American Society of Mechanical Engineers), ANSI (American National Standards Institute) y ASTM (American Society of Testing Materials) (Pharris y Kolpa, 2008, p.4).

Dentro de los diferentes tipos de tuberías se las puede clasificar por su grado de resistencia teniendo así una tubería de grado A con un límite elástico de 30000 psi, grado B con un límite elástico de 35000 psi, otra manera de diferenciar estas tuberías es por el método de fabricación dentro de estas se encuentra a la tubería de grado X42 con un límite elástico de 42000 psi, tubería de grado X60 con un límite elástico de 60000 psi, en la actualidad existe la presencia de nuevos grados X70 y X805 (Pharris y Kolpa, 2008, p.4).

Dichas tuberías pueden ser fabricadas sin costura o con costura, cuando llevan costura se fabrican sin una soldadura longitudinal, mientras que los tubos con costura se los fabrica con varios procesos siendo esta la más utilizada en tuberías de petróleo crudo (Pharris y Kolpa, 2008, p.4).

#### 2.2.6.6. Puntos de Medición

Al final del sistema hidráulico de bombeo de petróleo se encuentra un punto de medición de caudal para medir el volumen del crudo todo esto con fines de facturación y entrega, otro punto de medición suele colocarse en los tanques de almacenamiento para verificar cual es la capacidad

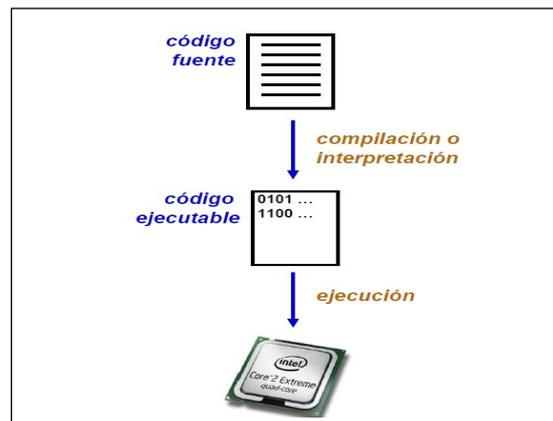


- a. **Current Folder:** Este panel de Matlab nos ayuda acceder a las carpetas o archivos dentro de nuestro ordenador (MathWorks, 2021b).
- b. **Command Window:** Este panel se lo utiliza para introducir datos y comandos para la ejecución del código de Matlab (MathWorks, 2021b).
- c. **Workspace:** Este panel tiene como función principal explorar los datos o resultados generados, de la misma forma nos permite importar archivos. (MathWorks, 2021b)

### 2.2.7.2. Lenguaje de programación en Matlab

- Programas

Cuando se habla de un programa se dice que es un conjunto de instrucciones hacia un ordenador a través de un lenguaje de programación, también se hace referencia a que programa se refiere a un código ejecutable o un código fuente. Un código ejecutable es un archivo binario el cual contiene instrucciones las mismas que se ejecutaran directamente por el procesador, mientras que un código fuente en si es un archivo de texto que también contiene instrucciones en lenguaje determinado (Ataurima, 2013, pp.41-43).

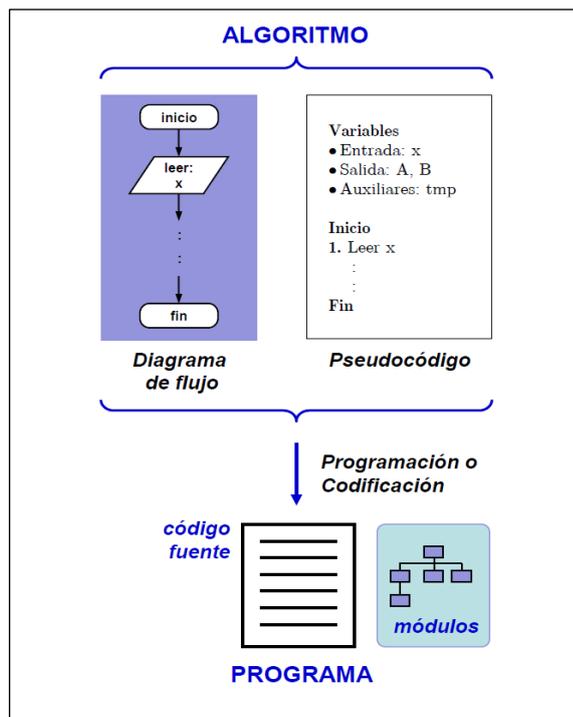


**Figura 10-2.** Código Fuente y Ejecutable

Fuente: Ataurima, 2013, p.41.

- Algoritmos y Programación

Un algoritmo es básicamente una secuencia de pasos para llegar a solucionar un problema, estos algoritmos pueden presentarse como pseudocódigo o como generalmente siempre están en diagrama de flujo, la programación se complementa con los algoritmos ya que en este proceso los algoritmos se convierten en programas a través de un lenguaje de programación determinado (Ataurima, 2013, pp.41-43).



**Figura 11-2.** Proceso de Algoritmo a Programa

Fuente: Ataurima, 2013, p.42.

- Lenguaje de Programación

Un lenguaje de programación como lo dice su nombre es un lenguaje que utiliza para el control de máquinas en especial de computadoras. Este lenguaje de programación cuenta de varios símbolos y reglas tanto semánticas como sintácticas las mismas que permiten definir su estructura al igual que el significado de sus elementos. El lenguaje de programación se puede clasificar en:

- Por el nivel de Abstracción
- Por la forma de Ejecución
- Por el Paradigma de Programación

Dentro del presente proyecto se va a hacer uso del lenguaje de programación por el paradigma de programación, este tipo de lenguaje de programación se utiliza en la elaboración de un software dentro de este tipo de lenguaje podemos mencionar a diferentes paradigmas como lo es el imperativo, funcional, lógico paralelo y el que va a ser de uso para el desarrollo de este proyecto que es el orientado a objetos (Ataurima, 2013, pp.41-43).

### 2.2.7.3. Programación Orientada a Objetos

La programación orientada a objetos utiliza clases para su desarrollo, estas clases son un tipo de datos abstractos los mismos que se definen por las capacidades operativas, para definir una clase se debe definir tanto los datos como las funciones que manipulan a estos datos. Los datos que se definen dentro de la clase son denominados propiedades y estos son muy similares a las variables ya que ambos almacenan valores, por otra parte, las funciones se denominan métodos (Attaway, 2019, pp.383-419).

Cuando ya se ha definido una clase se pueden crear objetos a partir de esta, los objetos que se crean en la clase se denominan instancias, para hacer referencia a las propiedades y métodos del objeto se utiliza el nombre del objeto y el operador acompañado de un punto. Una de las propiedades de las clases es que puede crear herencia esto sucede cuando una clase se deriva de otra, la clase inicial se denomina superclase y la derivada de esta se llama subclase (Attaway, 2019, pp.383-419).

Una subclase es una nueva clase que posee las propiedades y métodos de la superclase, esta subclase también puede tener sus propios métodos y propiedades. En Matlab existen dos tipos de clases: clases de tipo valor y clases de tipo referencia (Attaway, 2019, p383-419).

Las clases de tipo valor permite realizar varias replicas independientes heredando las propiedades de la superclase, mientras que las clases de tipo referencia crean copias que apuntan a la primera es decir si se cambia un valor de la subclase se modifica los valores de la superclase (Attaway, 2019, pp.383-419).

## 2.3. Marco Legal

### 2.3.1. Normativa para el uso de tecnologías

**Tabla 4-2:** 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). Título 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).

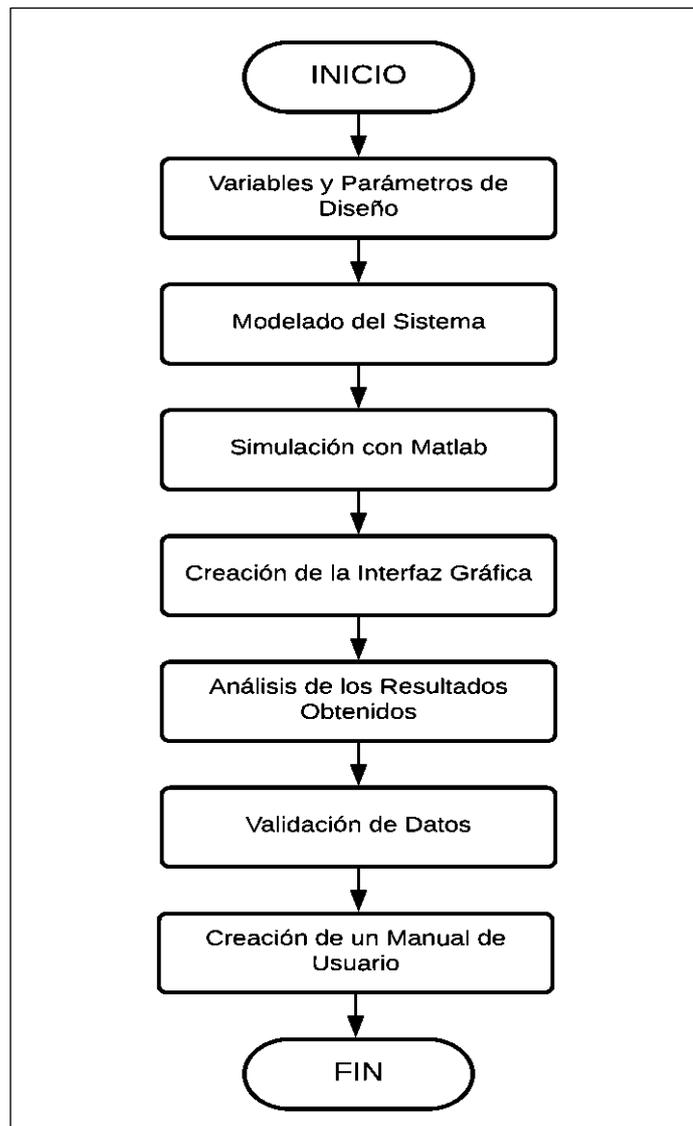
**Fuente:** Asamblea Nacional del Ecuador, 2008; 2016.

**Realizado por:** Gabriel García, 2022.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

El trabajo de integración curricular va orientado al modelado simulación y control del sistema hidráulico de bombeo de petróleo como herramienta didáctica para control de procesos, con el fin de complementar el aprendizaje teórico con el práctico, para desarrollar este proyecto se siguió una serie de pasos detallados en el siguiente esquema:



**Figura 1-3.** Metodología del Proyecto

Realizado por: García, Gabriel, 2022

A continuación, se va a detallar de forma simplificada los pasos a seguir mencionados en la figura anterior:

- a) **Variables y Parámetros de Diseño:** Dentro de las variables y parámetros de diseño se va a determinar cuáles son los componentes que al variar modifican la estructura y el funcionamiento del sistema hidráulico de bombeo de petróleo.
- b) **Modelado del Sistema:** En el modelado del sistema se plantea las ecuaciones que rigen a cada uno de los elementos que componen el Sistema Hidráulico de Petróleo, para los tanques de almacenamiento se realiza un balance de masa para definir la ecuación diferencial que va a controlar el nivel del crudo, para las válvulas y bombas se tomaron datos de curvas de funcionamiento reales de artículos científicos y con estos se pudo escalar a los diámetros necesarios para funcionar dentro del sistema.
- c) **Simulación con Matlab:** Para la simulación del sistema hidráulico de bombeo de petróleo se utiliza el software Matlab, en el mismo se hace uso de la programación orientada a objetos, es así que se crean clases independientes de cada elemento en base a un algoritmo y modelado del sistema, para realizar el control se utiliza la herramienta de Matlab Simulink, dentro de esta herramienta se crean tres bloques de Matlab Function el primer bloque denominado inputPipeline es el que engloba las entradas antes de los tanques de almacenamiento, el segundo bloque denominado outputPipeline contiene los tanques de almacenamiento hasta el final de la línea, el último bloque denominado StorageSystem se encarga de controlar el nivel del crudo en los tanques de almacenamiento.
- d) **Creación de la Interfaz Gráfica:** La Interfaz gráfica se la realiza utilizando el App Designer de Matlab, esta herramienta tiene la facilidad de funcionar como una aplicación independiente.
- e) **Análisis de los Resultados Obtenidos:** Con la interfaz gráfica ya en funcionamiento se analiza cada una de las gráficas tomando en cuenta los diferentes casos de estudio del sistema.
- f) **Validación de Datos:** Para la validación de los datos se utilizó el software de OpenModelica.
- g) **Creación de un Manual de Usuario:** Para el desarrollo del manual de usuario se dará una explicación detallada de como instalar la aplicación en la computadora donde se la va a utilizar, dentro de este manual también se dará a conocer aspectos claves para el correcto funcionamiento de la aplicación.

### 3.1. Variables y Parámetros de Diseño

#### 3.1.1. Parámetros que Intervienen en el Control

Dentro de los parámetros que intervienen en el control tenemos a las pérdidas primarias y secundarias al igual que a la altura de carga, estos se especifican en la siguiente tabla:

**Tabla 1-3:** Parámetros que Intervienen en el Control.

Parámetro	Valor	Unidades
Altura de Carga de Seguridad	2	<i>m</i>
Pérdidas Primarias	Se determina a través del cálculo de las pérdidas primarias $h_f$ dentro de las tuberías	<i>m</i>
Pérdidas Secundarias	Se determina con la fórmula de pérdidas secundarias $h_m$ dependiendo de los accesorios que cuente el sistema	<i>m</i>

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

#### 3.1.2. Variables de Ingreso

Las variables de ingreso son aquellas que se van a modificar para variar tanto el caudal como la presión del crudo a la entrada del sistema hidráulico de petróleo, en la tabla 1-3 se observan los valores que se tomaron para las entradas de dichas variables.

**Tabla 2-3:** Variables de Ingreso.

Variable	Valor	Unidades
Caudal de Crudo de Ingreso	0.0711	$m^3/s$
Presión de entrada	202650	<i>Pa</i>

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.1.3. Propiedades del Fluido

Las propiedades del crudo juegan un papel muy importante dentro del sistema hidráulico de bombeo de petróleo, en la tabla 2-3 se dan a conocer las propiedades principales para un crudo de 27.1 °API del campo de producción del Sacha.

**Tabla 3-3:** Propiedades del Fluido del campo de producción de Sacha.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	891.75	$kg/m^3$
Viscosidad	0.02083	$Pa \cdot s$
Gravedad Especifica	0.8922	$adm$

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Para el calcular la densidad del fluido uso de la ecuación (1) en donde se necesita los grados API del crudo para el cálculo de esta.

$$\rho = 62.4 * \left( \frac{141.5}{API + 131.5} \right) \quad (1)$$

Por otra parte, para determinar la gravedad especifica del crudo se utilizó la fórmula de los grados API donde se tiene de forma implícita a la gravedad especifica.

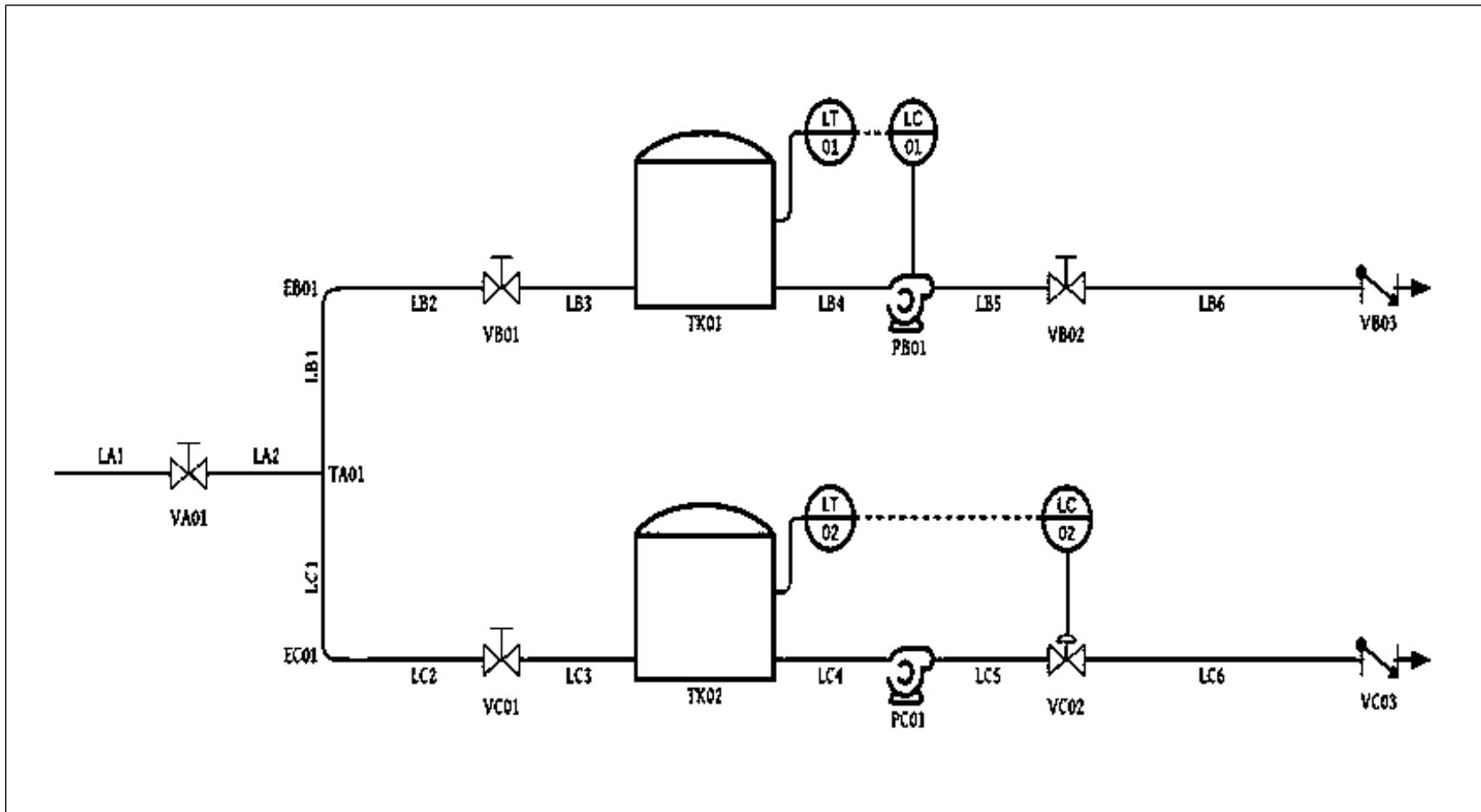
$$API = \frac{141.5}{Gravedad\ especifica} - 131.5 \quad (2)$$

Despejando la gravedad especifica obtenemos la ecuación final para el cálculo de esta y se define como:

$$Gravedad\ especifica = \frac{141.5}{API + 131.5} \quad (3)$$

### 3.2. Modelado del Sistema

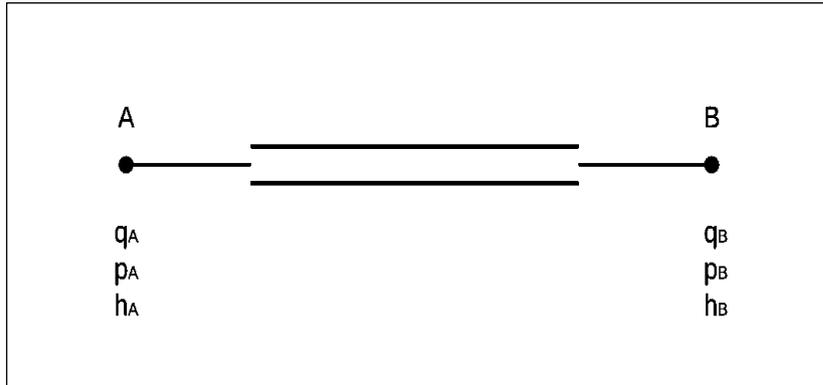
Para realizar el modelo del sistema hidráulico de bombeo de petróleo se ha tomado en cuenta los diferentes elementos que conforman dicho sistema como se observa en la figura 2-3, a su vez se analiza cada uno de estos con el objetivo de llegar a las ecuaciones que los definen, como podemos observar a continuación:



**Figura 2-3.** Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.2.1. Tubería horizontal



**Figura 3-3.** Tubería Horizontal

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Por teorema de la Continuidad se tiene que el caudal que sale es igual al que entra:

$$q_A = q_B \quad (4)$$

Donde:

$q_A$	Caudal en el punto A	$m^3/s$
$q_B$	Caudal en el punto B	$m^3/s$

Para definir la presión de salida en el punto B se hace referencia a la ecuación de Bernoulli para dos puntos dados como se muestra:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_m \quad (5)$$

Donde:

$P_A$	Presión en el punto A	$Pa$
$P_B$	Presión en el punto B	$Pa$
$v_A$	Velocidad en el punto A	$m/s$
$v_B$	Velocidad en el punto B	$m/s$
$\gamma$	Peso Específico	$kg/m^2 \cdot s^2$

$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$
$Z_1$	Altura en el Punto 1	$m$
$Z_2$	Altura en el Punto 2	$m$
$h_f$	Perdidas Primarias	$m$
$h_m$	Perdidas Secundarias	$m$

Los valores de la velocidad se anulan ya que el diámetro de la tubería va a ser el mismo tanto en el punto A como en el punto B, las pérdidas menores son igual a cero ya que en el medio de la tubería no existe ningún accesorio, por otro lado, el sistema se encuentra al mismo nivel por lo que las alturas tanto en A como en B se anulan, tomando en cuenta estas especificaciones la ecuación simplificada es la siguiente:

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = h_f \quad (6)$$

El siguiente paso es despejar la presión en B para obtener como resultado la ecuación (7).

$$P_A - P_B = \gamma \cdot h_f$$

$$P_B = P_A - \gamma \cdot h_f \quad (7)$$

En la ecuación (7) se tiene como incógnita a las pérdidas primarias o pérdidas por fricción la misma que se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_f = f_D \cdot \frac{L}{\emptyset} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

Donde:

$f_D$	Factor de Fricción	$adm$
$L$	Longitud	$m$
$\emptyset$	Diámetro	$m$
$v$	Velocidad	$m/s$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$

- Fórmula para el cálculo del Factor de Fricción

$$f_D = \frac{64}{Re} \quad Re \leq 2100 \quad (9)$$

$$f_D = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{e}{3,7 \cdot \emptyset} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad Re \geq 4000 \quad (10)$$

Donde:

$e$	Rugosidad Absoluta	$m$
$\emptyset$	Diámetro	$m$
$Re$	Número de Reynolds	$adm$

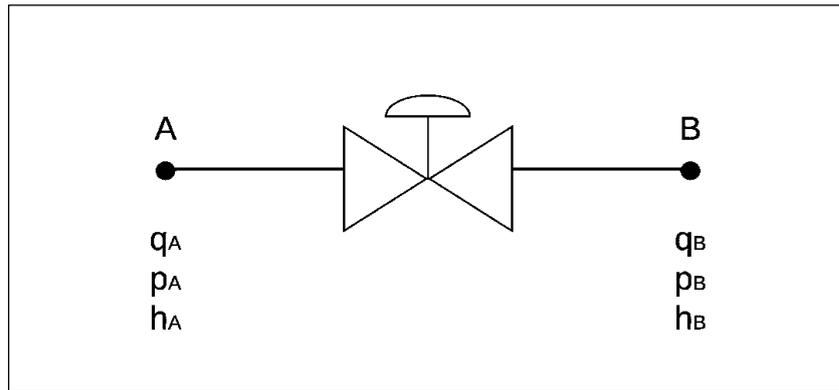
Para saber cuál de estas dos ecuaciones se va a utilizar se relaciona con el número de Reynolds al ser menor o igual a 2100 se utiliza la ecuación (9) y al ser mayor o igual a 2400 se utiliza la ecuación (10), a continuación, se detalla la fórmula para calcular el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot \emptyset}{\mu} \quad (11)$$

Donde:

$\rho$	Densidad	$kg/m^3$
$v$	Velocidad	$m/s$
$\emptyset$	Diámetro	$m$
$\mu$	Viscosidad Dinámica	$kg/m \cdot s$

### 3.2.2. Válvula



**Figura 4-3.** Válvula de control

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Para modelar la válvula se tomó como referencias a las ecuaciones de Alimonti (2014, p261) el mismo que hace referencia a la caracterización experimental de válvulas de globo y compuerta, dichas ecuaciones se enuncian a continuación:

- Cálculo de la presión

$$\Delta p = k_0 \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} + dp_{min} \quad (12)$$

Donde:

$k_0$	Coefficiente de pérdida de la válvula	$adm$
$\rho$	Densidad	$kg/m^3$
$v$	Velocidad	$m/s$
$dp_{min}$	Caída de Presión Mínima	$Pa$

- Presión en el punto B

$$P_B = P_A - dp \quad (13)$$

Donde:

$P_B$	Presión en el punto A	$Pa$
$P_A$	Presión en el punto B	$Pa$
$dp$	Caída de Presión	$Pa$

- Cálculo del caudal

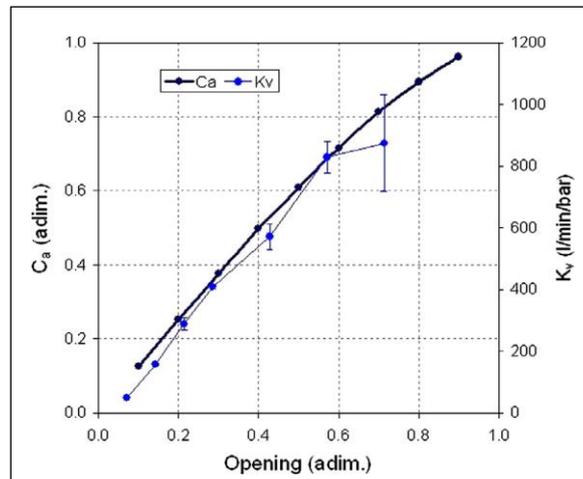
$$q = k_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{Sg}} \quad (14)$$

Donde:

$k_v$	Coefficiente de la válvula	$(m^3/h)(bar)$
$\Delta p$	Variación de la presión	$Pa$
$Sg$	Gravedad Específica	$adm$

Para obtener los datos tanto de Kv y Ko se basa en las curvas del Porcentaje de Apertura de la Válvula vs Kv y el Porcentaje de Apertura de la Válvula vs Ko para válvulas con un diámetro nominal de 2 pulgadas de Alimonti (2014, p261), dichas graficas se escalan al diámetro de válvula que se necesite y posteriormente se obtienen los valores de Kv y Ko al interpolar ingresando con los valores del porcentaje de apertura de la válvula.

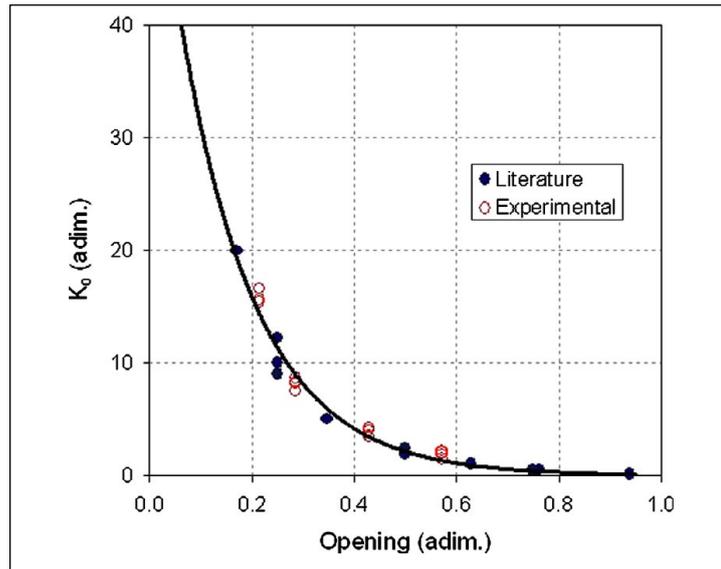
- Grafica del Porcentaje de Apertura de la Válvula 2" DN



**Gráfico 1-3.** Apertura vs coeficiente de la válvula

Fuente: (Alimonti, 2014)

- Grafica del Porcentaje de Apertura de la Válvula vs  $K_o$  2" DN



**Gráfico 2-3.** Apertura vs coeficiente de pérdida de la válvula

Fuente: (Alimonti, 2014).

- Ecuación para escalar el diámetro de la válvula

La ecuación que se va a describir a continuación es la que permitirá escalar el diámetro de la válvula de 2" al diámetro que se necesite, la ecuación es la siguiente:

$$f_s = \frac{Kv_i}{Kv_{ref}} \quad (15)$$

Donde:

$Kv_i$	Coeficiente de la válvula nueva	$(m^3/h * bar^{0.5})$
$Kv_{ref}$	Coeficiente de la válvula de referencia	$(m^3/h * bar^{0.5})$

Dentro del modelo de la válvula se va a hacer uso de ecuaciones subsidiarias que son:

- Cálculo de la sección transversal

$$A = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \quad (16)$$

Donde:

$\emptyset$       Diámetro       $m$

- Cálculo de la velocidad

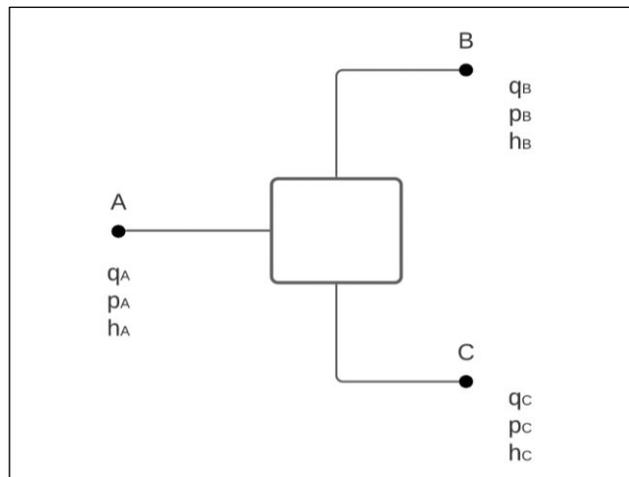
$$v = \frac{q}{A} \quad (17)$$

Donde:

$q$       Caudal       $m^3/s$

$A$       Área (Sección Transversal)       $m^2$

### 3.2.3. Unión en T



**Figura 5-3.** Unión en T

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022

Para realizar el modelo de la unión en T, se basó en ecuaciones derivadas de la ecuación principal de Bernoulli las mismas que se describen a continuación:

- Cálculo del caudal

$$q_A = q_B + q_C \quad (18)$$

Para el cálculo del caudal que pasa a través de T hacia el punto B y C se utilizan ecuaciones derivadas a la ecuación de Bernoulli como se puede observar a continuación:

- Caudal en el lado B

$$q_B = \frac{K}{1 + K} \cdot q_A \quad (19)$$

Donde:

$K$	Constante	$adm$
$q_A$	Caudal de A	$m^3/s$

- Caudal en el lado C

$$q_C = \frac{1}{1 + K} \cdot q_A \quad (20)$$

Donde:

$K$	Constante	$adm$
$q_A$	Caudal de A	$m^3/s$

- Constante

$$K = \sqrt{\frac{\varnothing_B}{\varnothing_C}}$$

Donde:

$\varnothing_B$	Diámetro de B	$m$
$\varnothing_C$	Diámetro de C	$m$

Dentro del modelo de la T se va a hacer uso de ecuaciones subsidiarias que son:

- Cálculo de la sección transversal

$$A = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \quad (21)$$

Donde:

$\emptyset$	Diámetro	$m$
-------------	----------	-----

- Cálculo de la velocidad

$$v = \frac{q}{A} \quad (22)$$

Donde:

$q$	Caudal	$m^3/s$
$A$	Área (Sección Transversal)	$m^2$

Para definir la presión de salida en el punto B se hace referencia a la ecuación de Bernoulli para dos puntos dados como se muestra:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + Z_2 + h_k + h_m \quad (23)$$

Donde:

$P_A$	Presión en el punto A	$Pa$
$P_B$	Presión en el punto B	$Pa$
$v_A$	Velocidad en el punto A	$m/s$
$v_B$	Velocidad en el punto B	$m/s$
$\gamma$	Peso Específico	$kg/m^2 \cdot s^2$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$
$Z_1$	Altura en el Punto 1	$m$
$Z_2$	Altura en el Punto 2	$m$
$h_k$	Perdidas Cinética	$m$
$h_m$	Perdidas Secundarias	$m$

Los valores de la velocidad se anulan ya que la T va a tener el mismo diámetro en sus tres diferentes puntos A, B y C, por otro lado, el sistema se encuentra al mismo nivel por lo que las alturas tanto en A como en B se anulan, tomando en cuenta estas especificaciones la ecuación simplificada es la siguiente:

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = h_k + h_m \quad (24)$$

El siguiente paso es despejar la presión en B para obtener como resultado la ecuación (25).

$$\begin{aligned} P_A - P_B &= \gamma \cdot (h_k + h_m) \\ P_B &= P_A - \gamma \cdot (h_k + h_m) \end{aligned} \quad (25)$$

Para definir la presión de salida en el punto C se hace referencia a la ecuación de Bernoulli para dos puntos dados como se muestra:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{v_C^2}{2g} + Z_2 + h_k + h_m \quad (26)$$

Donde:

$P_A$	Presión en el punto A	$Pa$
$P_B$	Presión en el punto B	$Pa$
$v_A$	Velocidad en el punto A	$m/s$
$v_B$	Velocidad en el punto B	$m/s$
$\gamma$	Peso Específico	$kg/m^2 \cdot s^2$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$
$Z_1$	Altura en el Punto 1	$m$
$Z_2$	Altura en el Punto 2	$m$
$h_k$	Perdidas Cinética	$m$
$h_m$	Perdidas Secundarias	$m$

Los valores de la velocidad se anulan ya que la T va a tener el mismo diámetro en sus tres diferentes puntos A, B y C, por otro lado, el sistema se encuentra al mismo nivel por lo que las alturas tanto en A como en B se anulan, tomando en cuenta estas especificaciones la ecuación simplificada es la siguiente:

$$\frac{P_A - P_C}{\gamma} = h_k + h_m \quad (27)$$

El siguiente paso es despejar la presión en B para obtener como resultado la ecuación (28).

$$P_A - P_C = \gamma \cdot (h_k + h_m)$$

$$P_C = P_A - \gamma \cdot (h_k + h_m) \quad (28)$$

Para el cálculo de las pérdidas localizadas en un accesorio o pérdidas menores se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_m = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (29)$$

Donde:

$k$	Coeficiente de Resistencia	$adm$
$v$	Velocidad	$m/s$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$

- Cálculo del Coeficiente de Resistencia de la T

$$k = \beta \cdot f_T \quad (30)$$

Donde:

$\beta$	Coeficiente de pérdida	$adm$
$f_T$	Factor de Fricción de la Tubería Aguas Arriba	$m/s$

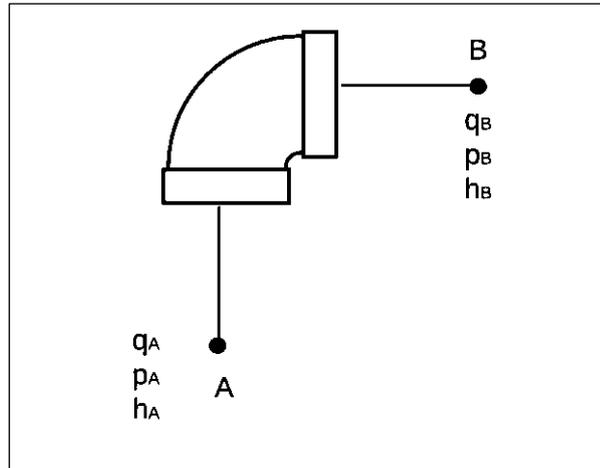
Para el cálculo de las pérdidas cinéticas se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_k = \frac{v_A^2 - v_B^2}{2g} \quad (31)$$

Donde:

$v_A$	Velocidad en el Punto A	$m/s$
$v_B$	Velocidad en el Punto B	$m/s$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$

### 3.2.4. Codo



**Figura 6-3.** Codo

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Por teorema de la Continuidad se tiene que el caudal que sale es igual al que entra:

$$q_A = q_B \quad (32)$$

Donde:

$q_A$	Caudal en el punto A	$m^3/s$
$q_B$	Caudal en el punto B	$m^3/s$

Dentro del modelo del codo se va a hacer uso de ecuaciones subsidiarias que son:

- Cálculo de la sección transversal

$$A = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \quad (33)$$

Donde:

$\emptyset$  Diámetro  $m$

- Cálculo de la velocidad

$$v = \frac{q}{A} \quad (34)$$

Donde:

$q$  Caudal  $m^3/s$

$A$  Área (Sección Transversal)  $m^2$

Para definir la presión de salida en el punto B se hace referencia a la ecuación de Bernoulli para dos puntos dados como se muestra:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + Z_2 + h_m \quad (35)$$

Donde:

$P_A$	Presión en el punto A	$Pa$
$P_B$	Presión en el punto B	$Pa$
$v_A$	Velocidad en el punto A	$m/s$
$v_B$	Velocidad en el punto B	$m/s$
$\gamma$	Peso Específico	$kg/m^2 \cdot s^2$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$
$Z_1$	Altura en el Punto 1	$m$
$Z_2$	Altura en el Punto 2	$m$
$h_m$	Perdidas Secundarias	$m$

La velocidad se anula ya que el diámetro del codo va a ser el mismo tanto en el punto A como en el punto B, en cuanto a las cotas el sistema se encuentra al mismo nivel por lo que las alturas tanto en A como en B se anulan, tomando en cuenta estas especificaciones la ecuación simplificada es la siguiente:

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = h_m \quad (36)$$

El siguiente paso es despejar la presión en B para obtener como resultado la ecuación (37).

$$P_A - P_B = \gamma \cdot h_m$$

$$P_B = P_A - \gamma \cdot h_m \quad (37)$$

Para el cálculo de las pérdidas localizadas en un accesorio o pérdidas menores se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_m = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (38)$$

Donde:

$k$	Coeficiente de Resistencia	$adm$
$v$	Velocidad	$m/s$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$

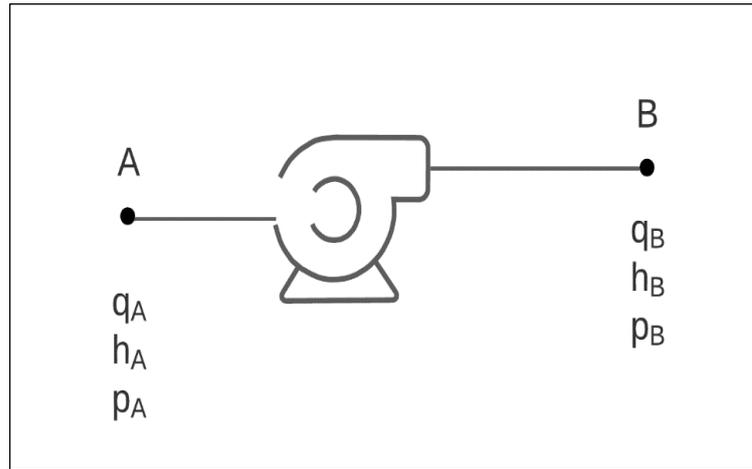
- Cálculo del Coeficiente de Resistencia del codo

$$k = \beta \cdot f_T \quad (39)$$

Donde:

$\beta$	Coeficiente de pérdida	$adm$
$f_T$	Factor de Fricción de la Tubería Aguas Arriba	$m/s$

### 3.2.5. Bomba Centrífuga



**Figura 7-3.** Bomba Centrífuga

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Dentro del modelo de la bomba se va a hacer uso de ecuaciones subsidiarias que son:

- Cálculo de la sección transversal

$$A = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \quad (40)$$

Donde:

$\emptyset$       Diámetro                       $m$

- Cálculo de la velocidad

$$v = \frac{q}{A} \quad (41)$$

Donde:

$q$       Caudal                               $m^3/s$

$A$       Área (Sección Transversal)       $m^2$

Para saber cuál es el caudal de referencia que pasa por la bomba se basa en las fórmulas del modelado de una bomba centrífuga de Matworks (2021, p2), la fórmula es la siguiente:

$$q_{ref} = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \left(\frac{w_{ref}}{w}\right) \cdot \left(\frac{1}{fs}\right)^3 \quad (42)$$

Donde:

$\dot{m}$	Flujo Másico	$kg/s$
$\rho$	Densidad	$kg/m^3$
$w_{ref}$	Velocidad de Giro Nominal de la Bomba	$rpm$
$w$	Velocidad de Giro Requerida	$rpm$
$fs$	Factor de Escala	$adm$

Para calcular la altura de carga de la bomba se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_B = h_A + h_{ref} \quad (43)$$

Donde:

$h_A$	Altura de Carga en el Punto A	$m$
$h_{ref}$	Altura de Carga de Referencia	$m$

Para definir la presión de salida de la bomba se hace referencia a la ecuación de Bernoulli para un punto dado como se muestra a continuación:

$$h = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z_1 \quad (44)$$

Donde:

$P$	Presión	$Pa$
$v$	Velocidad	$m/s$
$\gamma$	Peso Específico	$kg/m^2 \cdot s^2$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$
$Z_1$	Altura en el Punto 1	$m$

La bomba se encuentra en el plano de referencia por lo cual la altura se anula, tomando en cuenta estas especificaciones la ecuación simplificada es la siguiente:

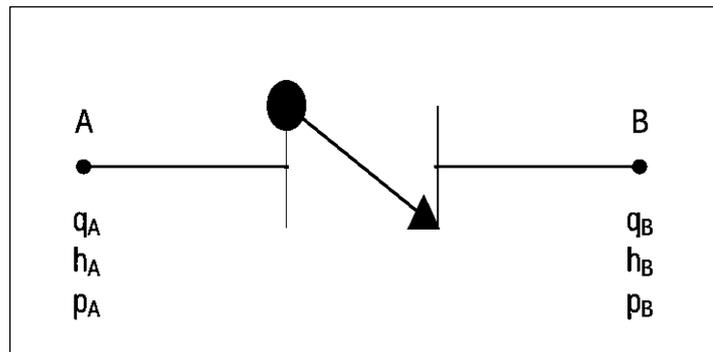
$$h = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

$$\frac{P}{\gamma} = h - \frac{v^2}{2g} \quad (45)$$

Al despejar la presión obtenemos la ecuación que permite saber la presión de salida de la bomba, la formula se muestra a continuación:

$$P = \gamma \cdot \left( h - \frac{v^2}{2g} \right) \quad (46)$$

### 3.2.6. Válvula Check



**Figura 8-3.** Válvula Check

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Por teorema de la Continuidad se tiene que el caudal que sale es igual al que entra:

$$q_A = q_B \quad (47)$$

Donde:

$q_A$	Caudal en el punto A	$m^3/s$
$q_B$	Caudal en el punto B	$m^3/s$

Dentro del modelo de la válvula check se va a hacer uso de ecuaciones subsidiarias que son:

- Cálculo de la sección transversal

$$A = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \quad (48)$$

Donde:

$\emptyset$	Diámetro	$m$
-------------	----------	-----

- Cálculo de la velocidad

$$v = \frac{q}{A} \quad (49)$$

Donde:

$q$	Caudal	$m^3/s$
$A$	Área (Sección Transversal)	$m^2$

Para definir la presión de salida en el punto B se hace referencia a la ecuación de Bernoulli para dos puntos dados como se muestra:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + Z_2 + h_m \quad (50)$$

Donde:

$P_A$	Presión en el punto A	$Pa$
$P_B$	Presión en el punto B	$Pa$
$v_A$	Velocidad en el punto A	$m/s$
$v_B$	Velocidad en el punto B	$m/s$
$\gamma$	Peso Específico	$kg/m^2 \cdot s^2$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$
$Z_1$	Altura en el Punto 1	$m$
$Z_2$	Altura en el Punto 2	$m$
$h_f$	Perdidas Primarias	$m$
$h_m$	Perdidas Secundarias	$m$

La velocidad se anula ya que el punto A y B de la válvula tiene el mismo diámetro, en cuanto a las alturas pasa lo mismo que la velocidad, estas se eliminan ya que la válvula se encuentra en el plano de referencia, tomando en cuenta estas especificaciones la ecuación simplificada es la siguiente:

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = h_m \quad (51)$$

El siguiente paso es despejar la presión en B para obtener como resultado la ecuación (52).

$$\begin{aligned} P_A - P_B &= \gamma h_m \\ P_B &= P_A - \gamma h_m \end{aligned} \quad (52)$$

Para el cálculo de las pérdidas localizadas o pérdidas menores se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_m = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (53)$$

Donde:

$k$	Coficiente de Resistencia	$adm$
$v$	Velocidad	$m/s$
$g$	Constante Gravitacional	$m/s^2$

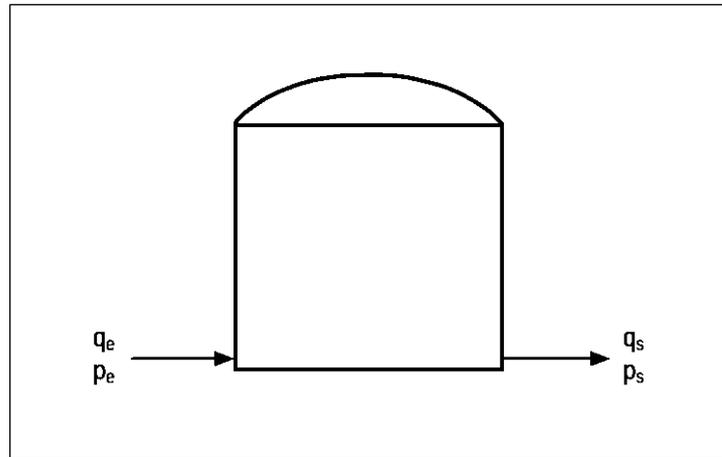
- Cálculo del Coeficiente de Resistencia de la válvula check

$$k = \beta \cdot f_T \quad (54)$$

Donde:

$\beta$	Coficiente de pérdida	$adm$
$f_T$	Factor de Fricción de la Tubería Aguas Arriba	$m/s$

### 3.2.7. Tanque de Almacenamiento



**Figura 9-3.** Tanque de Almacenamiento

Realizado por: García, Gabriel, 2021.

El modelo de los tanques va a ser el mismo para ambos, una vez detallada esta información se empieza con la ecuación de la continuidad para un régimen dinámico:

$$E = S + A$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s + \frac{dm}{dt}$$

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (55)$$

Donde:

$\dot{m}_e$	Flujo Másico de Entrada	$kg/s$
$\dot{m}_s$	Flujo Másico de Salida	$kg/s$

El flujo masico de ecuación (55) es igual a:

$$\dot{m} = \rho \cdot q \quad (56)$$

Donde:

$\rho$	Densidad	$kg/m^3$
$q$	Caudal	$m^3/s$

La densidad de ecuación (55) es igual a:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (57)$$

Donde:

$m$	Masa	$kg$
$v$	Volumen	$m^3$

Despejando la masa de la ecuación (57) tenemos:

$$m = \rho \cdot v \quad (58)$$

- Reemplazando la ecuación (56) y (58) en (55) obtiene la siguiente ecuación:

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} = \rho \cdot q_e - \rho \cdot q_s \quad (59)$$

Despejando la densidad y pasándola a dividir para cada termino al lado derecho de la ecuación 56 se obtiene:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho \cdot q_e}{\rho} - \frac{\rho \cdot q_s}{\rho} \quad (60)$$

Al simplificar la densidad en ambos términos obtenemos la ecuación simplificada:

$$\frac{dv}{dt} = q_e - q_s \quad (61)$$

Donde:

$q_e$	Caudal de Entrada	$m^3/s$
$q_s$	Caudal de Salida	$m^3/s$

De la ecuación (61) el volumen es igual a:

$$V = A \cdot h \quad (62)$$

Donde:

$A$	Área	$m^2$
$h$	Altura	$m$

- Reemplazando la ecuación (62) en (61) tenemos:

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = q_e - q_s \quad (63)$$

Al despejar el diferencial de la altura sobre el diferencial del tiempo se tiene la ecuación final 61 que controla el nivel de los tanques en el sistema hidráulico de bombeo de petróleo, dicha ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot (q_e - q_s) \quad (64)$$

Dentro del modelo de los tanques de almacenamiento se va a hacer uso de la ecuación para calcular la sección transversal de los mismos:

$$A = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \quad (65)$$

Donde:

$\emptyset$	Diámetro	$m$
-------------	----------	-----

### 3.2.8. Sistema de Control

Los sistemas de control que estarán presentes en el sistema hidráulico de bombeo de petróleo son dos, los mismos que nos permitirán controlar el nivel de crudo en los tanques de almacenamiento, estos tienen la misma función que es controlar el nivel de crudo, su única diferencia es que al uno se le aplica el control a la bomba y el otro a una válvula, en la tabla 4-3 se detalla los controles.

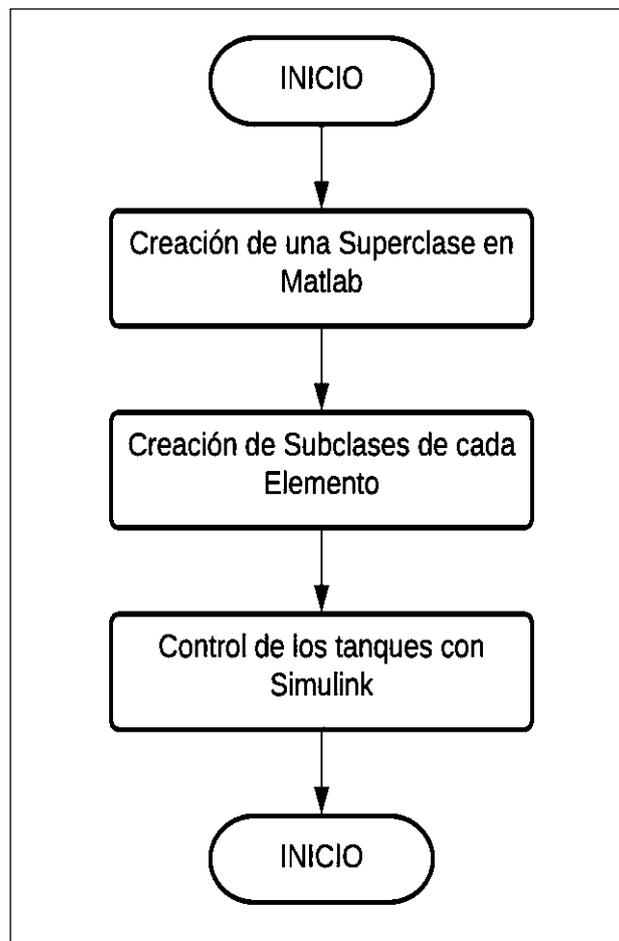
**Tabla 4-3:** Parámetros de Control del Sistema.

Lazo de Control	Tipo de Control	Dispositivo de Control	Parámetro para Controlar
01	PID	Bomba PB01	Nivel de crudo en el tanque
02	PID	Válvula VC02	Nivel de crudo en el tanque

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3. Simulación con Matlab

Dentro del software de Matlab se va a desarrollar la programación orientada a objetos mediante la cual se crearán varias clases las mismas que representarán a cada elemento de la simulación, después de crear dichas clases se implementara los lasos de control para el sistema mediante Simulink:



**Figura 10-3.** Diagrama de Programación en Matlab

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3.1. Creación de una super clase en Matlab

#### 3.3.1.1. Pipeline Element

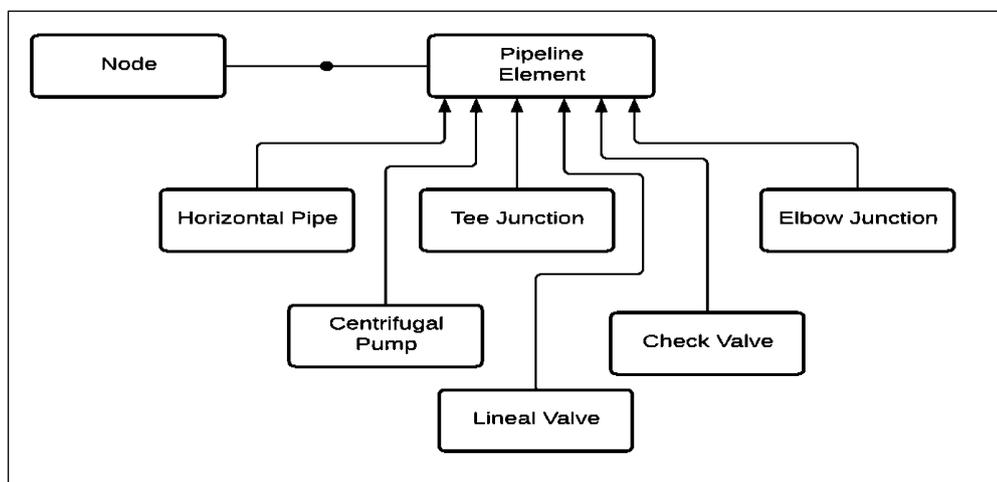
Esta super clase de Matlab va a ser el punto de partida para todas las clases siguientes que se van a crear, ya que esta heredara sus propiedades, esta clase contara con las propiedades y métodos principales como lo son:

**Tabla 5-3.** Atributos y Métodos de la clase Pipeline Element

Propiedades	Métodos
Nodo → A	Setter
Nodo → B	Solve
Propiedades de los Fluidos	
Constantes	
Datos	

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Dentro de la clase de Matlab las propiedades son elementos que se almacena en las clases, mientras que los métodos nos sirven para definir desde un principio los valores por defecto para las propiedades o también llamados atributos. Por otra parte, el método solve es el que resolverá la clase que se crea dentro de este método se colocan las ecuaciones que definen a cada uno de los elementos. En la siguiente figura se observa todas las clases derivadas de Pipeline Element.



**Figura 11-3.** Class Diagram

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

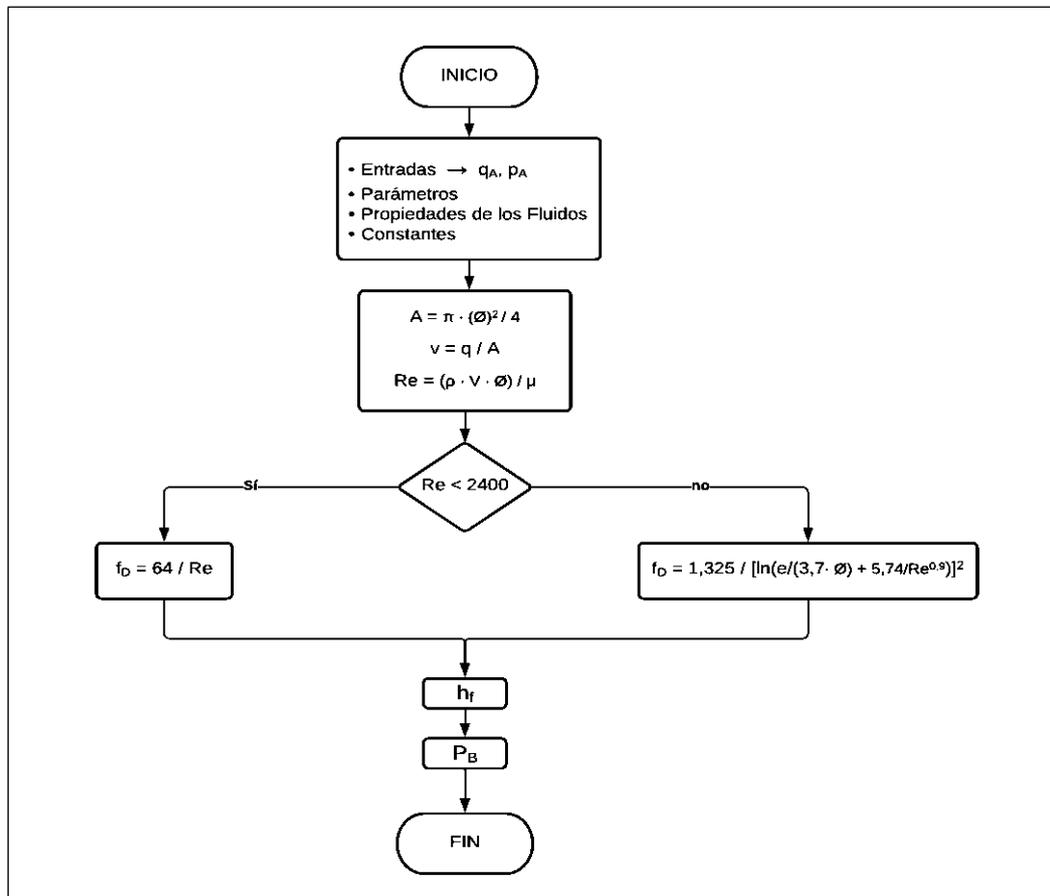
### 3.3.2. Creación de subclases de cada elemento

#### 3.3.2.1. Horizontal Pipe

La clase horizontal pipe pertenece al elemento de tuberías horizontales del sistema hidráulico de bombeo de petróleo dentro de esta clase se almacenan las siguientes propiedades:

- Diámetro
- Rugosidad
- Longitud
- Área superficial del Tubo
- Velocidad del Fluido
- Factor de Fricción
- Pérdidas Primarias
- Numero de Reynolds

Dentro de la clase se utiliza el método setter el mismo que nos va a servir para restringir el modelo y no permitir el ingreso de palabras u otros símbolos en vez de valores numéricos tanto para el diámetro, longitud y rugosidad. A continuación, se observa el algoritmo para crear la clase.



**Figura 12-3.** Algoritmo Horizontal Pipe

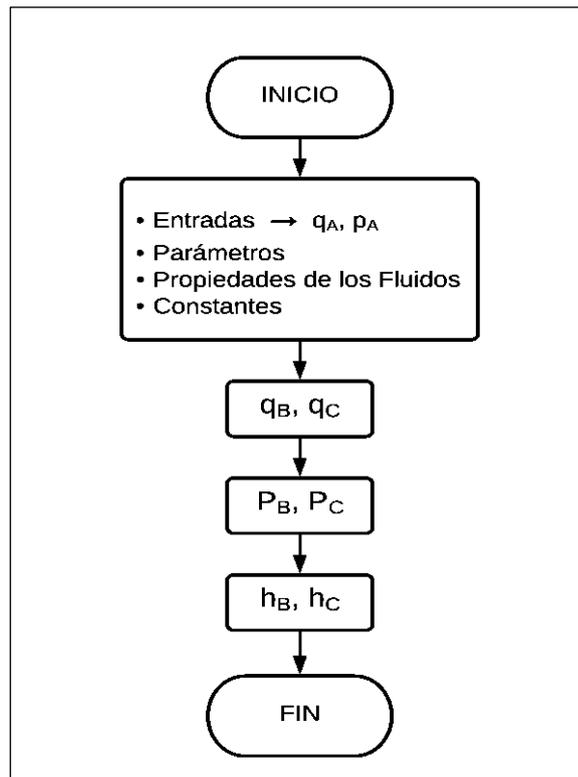
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3.2.2. Tee Junction

Para la creación de la clase Tee Junction la cual representa a la unión en T se debe tener en claro cuáles son los diámetros tanto de A, B y C además de esto se considera consideran las siguientes propiedades:

- Factor de Fricción
- Constante k de la unión en T
- Sección Transversal de A
- Sección Transversal de B
- Sección Transversal de C
- Velocidad del Fluido en A
- Velocidad del Fluido en B
- Velocidad del Fluido en C
- Pérdidas Cinéticas en el Tramo A-B
- Pérdidas Cinéticas en el Tramo A-C
- Pérdidas Menores en el Tramo A-B
- Pérdidas Menores en el Tramo A-C

Dentro de la clase se utiliza el método setter el mismo que nos va a servir para restringir el modelo haciendo que el diámetro en el nodo A, B y C deben ser mayor a 0, de igual forma la constante k de la unión en T debe ser un valor mayor que se. A continuación, se observa el algoritmo para crear la clase.



**Figura 13-3.** Algoritmo Tee Junction

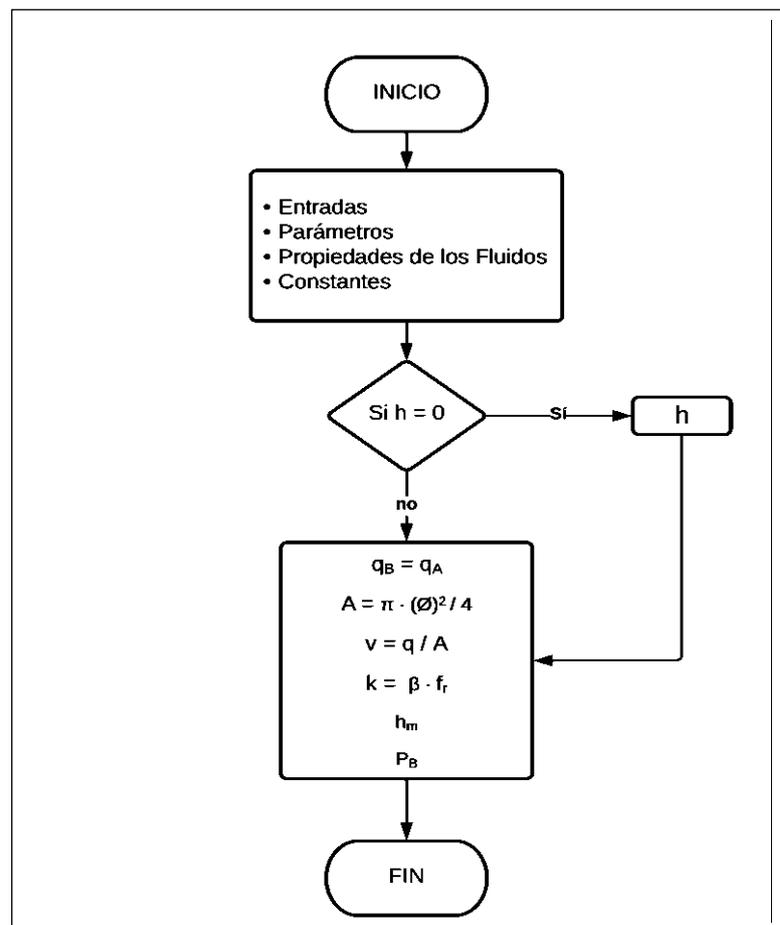
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3.2.3. Elbow Junction

La clase Elbow Junction representa a la unión en codo, en este se considera el principio de la continuidad ya que se va a tener el mismo diámetro, el codo a utilizarse va a ser uno de 90 de radio largo las propiedades principales para el codo son:

- Diámetro
- Factor de Fricción
- Área Superficial del codo
- Velocidad del Fluido
- Pérdidas Menores

Dentro de la clase se utiliza el método setter el mismo que nos va a servir para restringir el modelo haciendo que el diámetro del codo y el factor de fricción sea mayor a 0. A continuación, se observa el algoritmo para crear la clase.



**Figura 14-3.** Algoritmo Elbow Junction

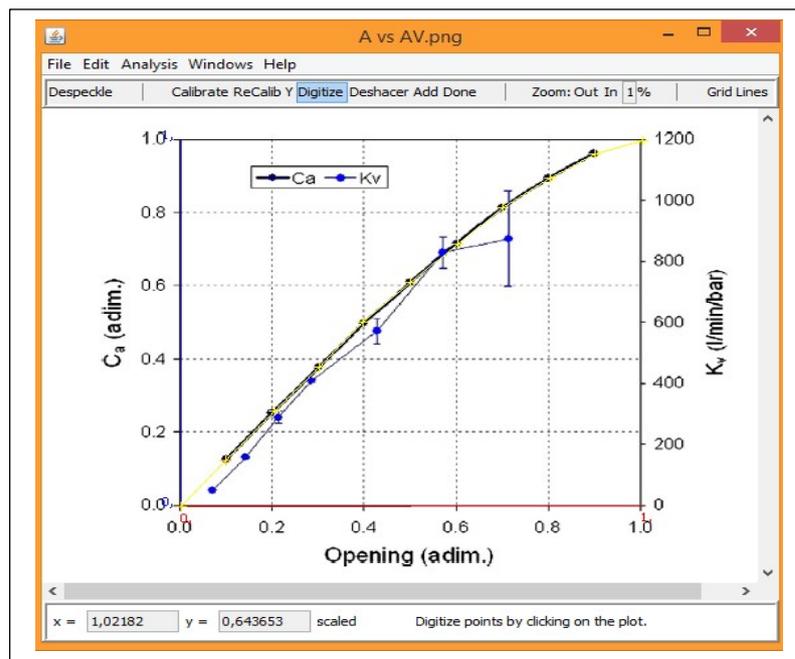
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3.2.4. Lineal Valve

La clase Lineal Valve representa a una válvula, el modelo de la válvula es el más sencillo que se utiliza en control de procesos, dentro de esta clase las propiedades principales almacenadas son:

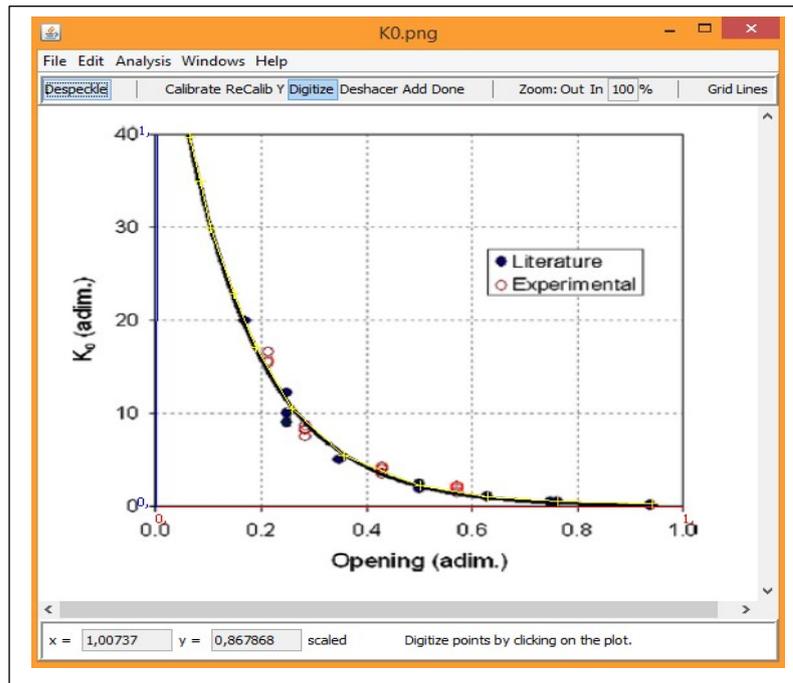
- Diámetro
- Caída de Presión Mínima
- Factor de Escala
- Porcentaje de Apertura de la Válvula
- Sección Transversal
- Velocidad del Fluido A
- Valor Interpolado de kv
- Velocidad del Fluido A
- Caída de Presión (dp)
- Coeficiente de pérdida de la válvula (ko) vs Porcentaje de Apertura
- Coeficiente de la válvula (kv) vs Porcentaje de Apertura
- Valor Interpolado de ko

Para obtener los datos reales de las gráficas de Kv vs %Apertura y ko vs %Apertura se utiliza el programa PlotDigitizer el mismo que permite tomar los valores de las curvas antes mencionadas, en las siguientes imágenes se observa la como se realiza el proceso mencionado.



**Gráfico 3-3.** Plot Digitizer de Kv vs %Apertura

Realizado por: García, Gabriel, 2022.



**Gráfico 4-3.** Plot Digitizer de  $K_v$  vs %Apertura

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Al culminar de tomar los valores de las curvas de ambas graficas los datos se almacenan en un bloc de notas los mismos que son conocidos como archivos de valores separados por comas, dichos valores se copian a Matlab como una matriz que viene a ser la tabla donde se va a interpolar los valores de  $k_v$  y  $k_o$ .

```

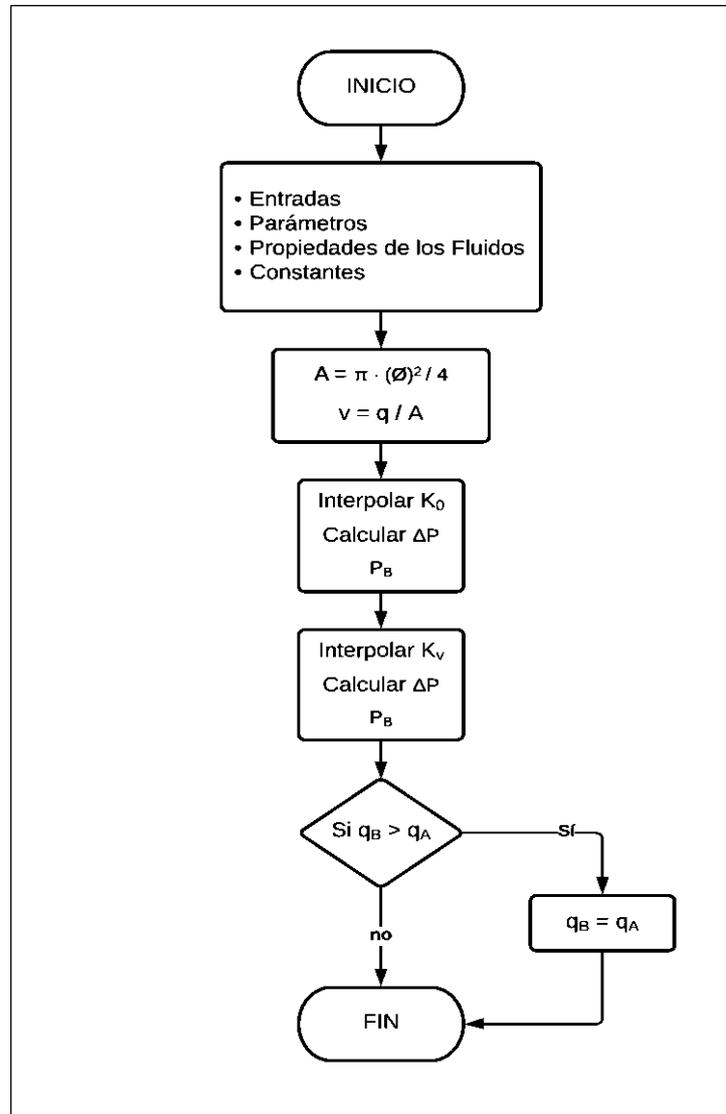
Editor - C:\Users\casa\Desktop\Tesis G\Final\respaldo\CrudeStorageSystem\func\LinealValve.m*
main.m LinealValve.m*
29 obj.vpk0 = [[0 56.305];...
30 [0.0614251 40];...
31 [0.0786241 35.6757];...
32 [0.103194 30.1502];...
33 [0.125307 25.8258];...
34 [0.164619 20.0601];...
35 [0.201474 15.7357];...
36 [0.243243 11.8919];...
37 [0.267813 10.0901];...
38 [0.307125 7.6979];...
39 [0.358722 5.52553];...
40 [0.402948 4.2042];...
41 [0.459459 2.88288];...
42 [0.520885 1.92192];...
43 [0.601966 1.2012];...
44 [0.665848 0.840841];...
45 [0.734644 0.720721];...
46 [0.938575 0.24024];...
47 [1 0];]
48 obj.vpkv = [[0 0];...
49 [0.102514 151.722];...
50 [0.199313 303.423];...
51 [0.298977 451.532];...
52 [0.395785 599.629];...
53 [0.498331 736.937];...
54 [0.598052 859.82];...
55 [0.697782 979.999];...
56 [0.797561 1076.76];...
57 [0.894523 1156.39];...
58 [0.95156 1203.44];...

```

**Figura 15-3.** Valores de  $K_v$  y  $K_o$  vs %Apertura en Matlab

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Una vez ya con los valores de las tablas se puede interpolar y sacar los valores de  $k_v$  y  $k_o$  respectivamente y a la vez escalar el diámetro de la válvula que se vaya a utilizar en el modelo del Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo. A continuación, se observa el algoritmo para crear la clase.



**Figura 16-3.** Lineal Valve

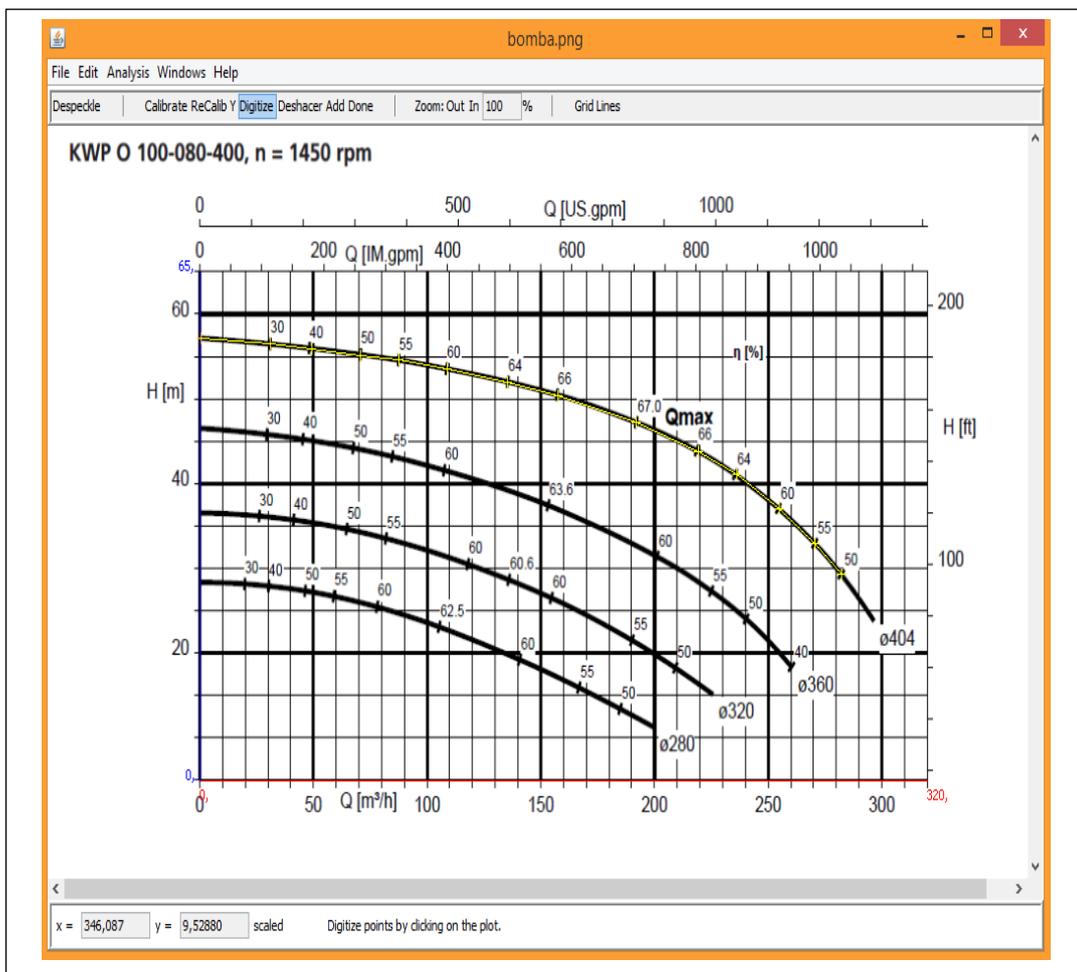
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3.2.5. Centrifugal Pump

La clase Centrifugal Pump representa a la bomba centrífuga que va a estar ubicada a la salida de los tanques la misma que nos va a permitir mover el fluido a lo largo de las tuberías, para esta clase se almacena como propiedades principales a:

- Velocidad del Eje de Referencia de la Bomba
- Velocidad del Eje de la Bomba
- Flujo Nominal
- Diámetro Hidráulico
- Factor de Escala del Impeller de la Bomba
- Matriz del Caudal
- Matriz de la Altura de Carga
- Área Superficial
- Velocidad del Fluido
- Caudal de Referencia
- Altura de Carga de Referencia

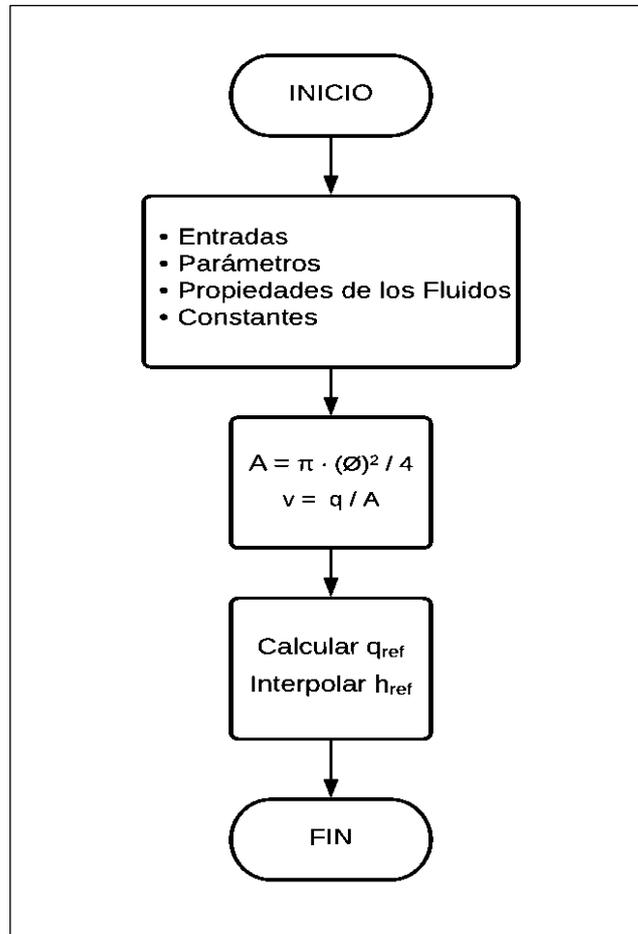
Para obtener los datos reales de la gráfica de Q vs H se utiliza el programa PlotDigitizer el mismo que permite tomar los valores de la curva, en las siguientes imágenes se observa cómo se realiza el proceso mencionado.



**Gráfico 5-3.** Plot Digitizer de Q vs H

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Al obtener los valores de la curva de la gráfica del Q (caudal) vs H (altura de carga) se entra con los valores del  $q_{ref}$  (caudal de referencia) para interpolar y obtener los valores de la  $h_{ref}$  (altura de carga de referencia). A continuación, se observa el algoritmo para crear la clase.



**Figura 17-3.** Centrifugal Pump

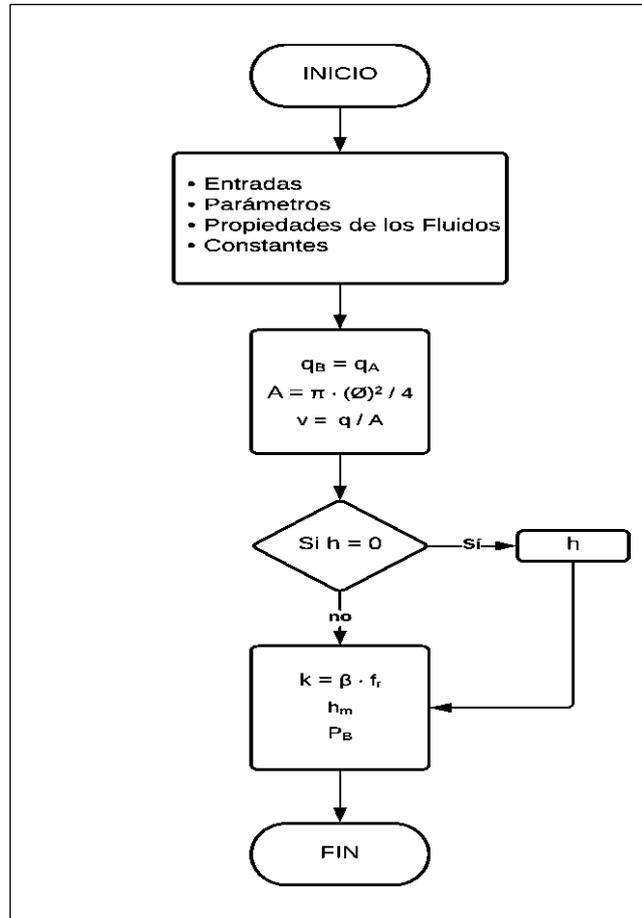
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3.2.6. Check Valve

La clase Check Valve representa a la válvula check dentro del sistema hidráulico de petróleo esta válvula va a controlar el retorno del líquido dentro de las líneas de crudo, para esta clase las propiedades principales que se guardan dentro son:

- Diámetro
- Factor de Fricción
- Área Superficial
- Velocidad del Fluido
- Pérdidas Menores

En esta clase se utiliza el método setter el mismo que nos va a servir para restringir el modelo ya que el diámetro de la válvula debe ser un valor mayor a cero. A continuación, se observa el algoritmo para crear la clase.



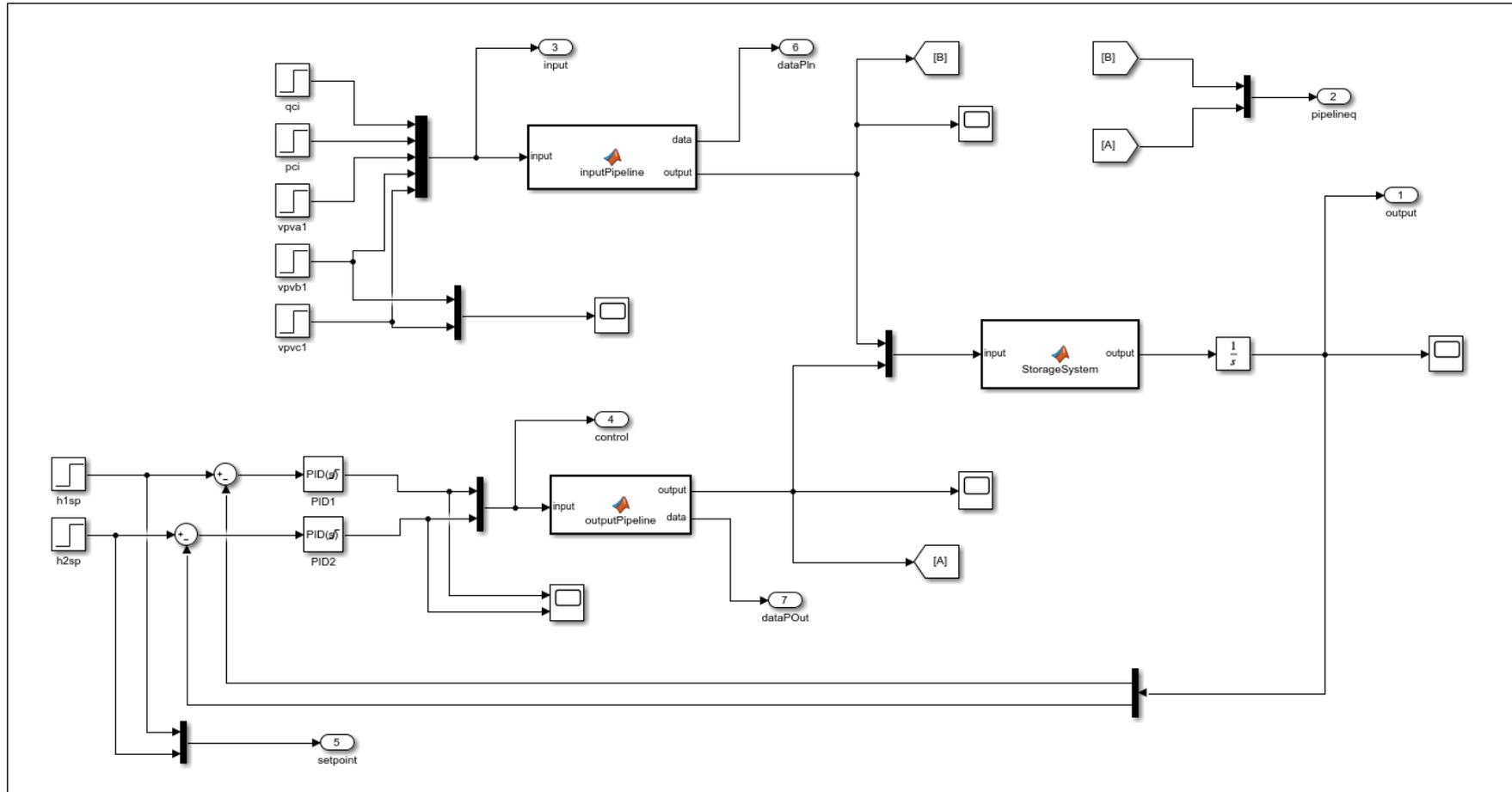
**Figura 18-3.** Check Valve

Realizado por: García, Gabriel, 2021.

### 3.3.3. Control de los Tanques con Simulink

Dentro de Simulink se creará un diagrama de bloques el cual permita realizar el control del nivel de los tanques, el mismo que contiene tres bloques Matlab Function, el primero llamado StorageSystem el mismo que va a contener las ecuaciones del modelo de los tanques de techo fijo que se van a simular en el sistema hidráulico de petróleo, el segundo bloque llamado inputPipeline contiene todos los elementos del sistema hasta los tanques de almacenamiento y el ultimo bloque llamado outputPipeline contiene los elementos que van después de los tanques de almacenamiento hasta el final de la línea del sistema, a continuación se muestra el diagrama.

### 3.3.3.1. Diagrama de bloques en Simulink



**Figura 19-3.** Diagrama de Bloques Simulink

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.3.3.2. Storage System

Dentro del bloque de Simulink de Matlab se lleva a cabo el control de la altura de carga de los tanques de almacenamiento de crudo, dentro de este se tienen Inputs (entradas) y Outputs (salidas).

- Inputs

Dentro del bloque de Matlab Function las Inputs o más conocidas como entradas son las que permiten desde un espacio de trabajo cargar los datos de entrada para la simulación. Dentro de las entradas del bloque de Storage System tenemos:

**Tabla 6-3:** Parámetros de entrada en los tanques de almacenamiento.

Parámetro	Nomenclatura	Valor	Unidad
Caudal de Ingreso al tanque TK01	qiB	0.03555	$m^3/s$
Caudal de Ingreso al tanque TK02	qiC	0.03555	$m^3/s$
Caudal de Salida al tanque TK01	qoB	0.08333	$m^3/s$
Caudal de Salida al tanque TK02	qoC	0.08333	$m^3/s$

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

- Outputs

Los Outputs dentro de Simulink en el diagrama de bloques se encargan de guardar datos o resultados de la altura de carga que se tiene en los tanques de almacenamiento de crudo. A continuación, se muestra en la tabla las salidas:

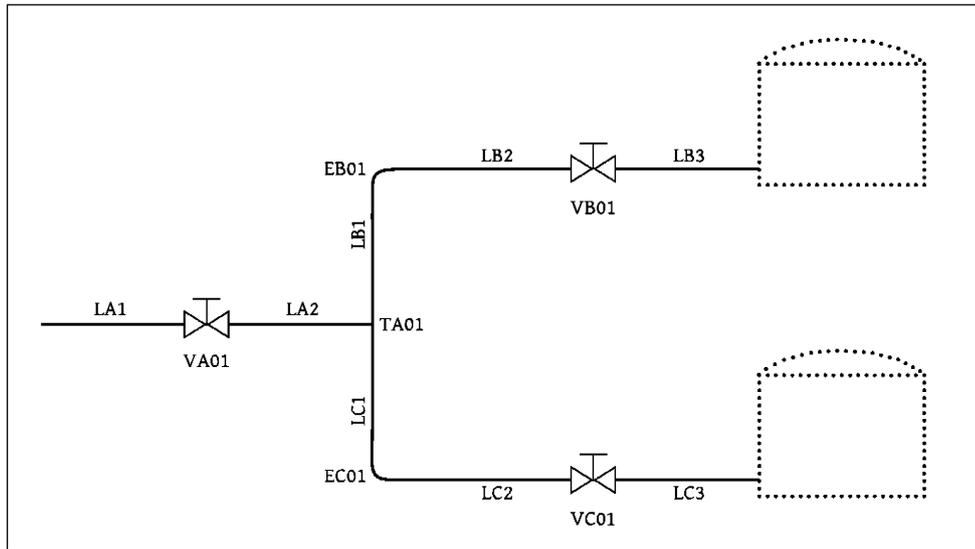
**Tabla 7-3:** Parámetros de salida en los tanques de almacenamiento.

Parámetro	Nomenclatura
Altura de carga en el tanque TK01	dhB
Altura de carga en el tanque TK02	dhC

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

### 3.3.3.3. Input Pipeline

Este bloque de Matlab Function representa todos los dispositivos hasta antes de entrar a los tanques de almacenamiento de crudo como se muestra en la figura 21-3, por otra parte, este bloque también cuenta con Inputs (entradas), Outputs (salidas) y Data (datos).



**Figura 20-3.** Diagrama Input Pipeline

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

- Inputs

Para este bloque de Matlab Function llamado Input Pipeline se tiene como entradas principales al caudal y presión de ingreso, así como el porcentaje de apertura de las válvulas que constan dentro de este bloque. A continuación, se las describe en la siguiente tabla:

**Tabla 8-3:** Parámetros de entrada en Input Pipeline.

Parámetro	Nomenclatura	Valor	Unidad
Caudal de Ingreso al Sistema	qi	0,0711	$m^3/s$
Presión de Ingreso al Sistema	pi	202650	Pa
% de apertura de la Válvula VA01	vpa01	1	adm
% de apertura de la Válvula VB01	vpb01	1	adm
% de apertura de la Válvula VC01	vpc01	1	adm

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

- Outputs

Como salidas o resultados tenemos dentro del bloque de Matlab Function a las dos líneas principales que entran a los tanques de almacenamiento de crudo los mismo que se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 9-3:** Parámetros de salida en Input Pipeline.

Parámetro	Nomenclatura	Valor	Unidad
Caudal del nodo B (salida) en la tubería LB3	pipeB03.B.q	0.03555	$m^3/s$
Caudal del nodo C (salida) en la tubería LC3	pipeC03.B.q	0.03555	$m^3/s$

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

- Data

La Variable data me permite guardar los valores calculados dentro del bloque los mismo que nos servirán más adelante para resolver el modelo. A continuación, se describen dichos valores:

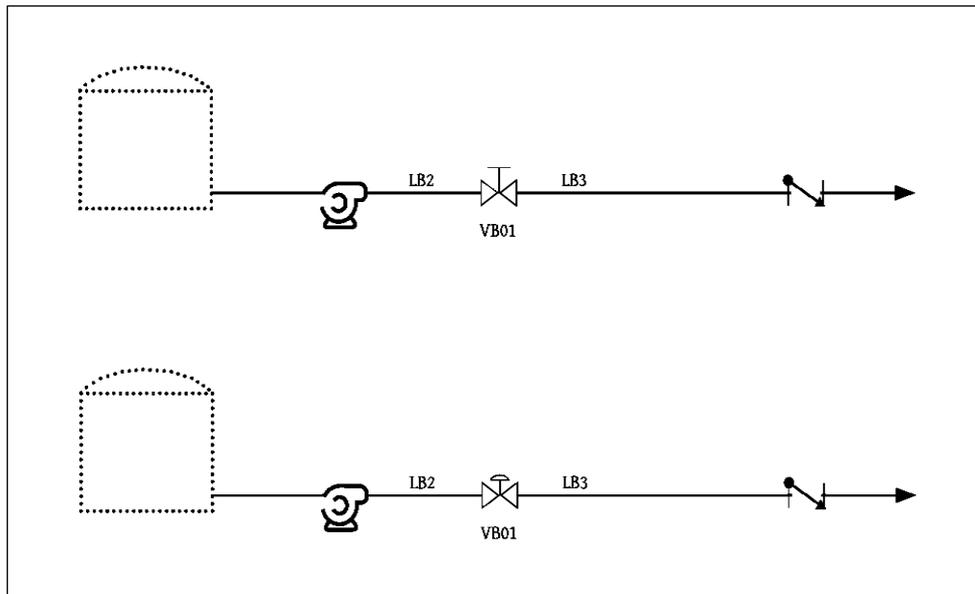
**Tabla 10-3:** Datos dentro del Bloque Input Pipeline.

Parámetro	Nomenclatura
Altura de Carga del nodo B (salida) en la tubería LB3	pipeB03.B.h
Presión del nodo B (salida) en la tubería LB3	pipeB03.B.p
Altura de Carga del nodo C (salida) en la tubería LC3	pipeC03.B.h
Presión del nodo C (salida) en la tubería LC3	pipeC03.B.p

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

#### 3.3.3.4. Output Pipeline

El bloque de Matlab Function llamado Output Pipeline contiene todos los elementos que se encuentran después de los tanques de almacenamiento hasta el final de las líneas del sistema hidráulico de bombeo de petróleo, en la figura 22-3 se muestra los elementos que conforman este bloque de Matlab Function, de igual manera se describe los Inputs (entradas), Outputs (salidas) y Data (datos).



**Figura 21-3.** Diagrama Output Pipeline

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

- Inputs

Como entradas dentro de este diagrama de bloques tenemos a los setpoints del tanque TK01 y TK02, el primer setpoint del tanque TK01 alimenta al control PID para accionar o no la bomba y así controlar el nivel del tanque y el segundo setpoint del tanque TK02 alimenta al control PID para abrir o cerrar la válvula y así controlar el nivel del tanque, en la siguiente tabla 6-3 se puede observar las entradas del diagrama de bloque que se han determinado como setpoints en los tanques.

**Tabla 11-3:** Parámetros de entrada en Output Pipeline.

Set Points	Nomenclatura	Unidad
Nivel del Crudo en el tanque TK01	h1sp	m
Nivel del Crudo en el tanque TK02	h2sp	m

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

- Outputs

Dentro de las salidas de este bloque de Matlab Function tenemos a los caudales que van a pasar a través de las válvulas check ya que se aplica el principio de continuidad donde se explica que lo que entra es igual a lo que sale, en la siguiente tabla 7-3 se detallan las salidas del bloque.

**Tabla 12-3:** Parámetros de salida en Output Pipeline.

Parámetro	Nomenclatura	Valor	Unidad
Caudal del nodo B (salida) en la válvula check VB03	checkB001.B.q	0.03555	$m^3/s$
Caudal del nodo C (salida) en la válvula check VC03	checkC001.B.q	0.03555	$m^3/s$

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

- Data

Dentro de la variable data se encuentran los valores que se utilizaran posteriormente para seguir resolviendo el modelo, estos valores se expresan en la tabla 8-3.

**Tabla 13-3:** Datos dentro del Bloque Input Pipeline.

Parámetro	Nomenclatura
Altura de Carga del nodo B (salida) en la válvula check VB03	checkB001.B.h
Presión del nodo B (salida) en la válvula check VB03	checkB001.B.p
Altura de Carga del nodo C (salida) en la válvula check VC03	checkC001.B.h
Presión del nodo C (salida) en la válvula check VC03	checkC001.B.p

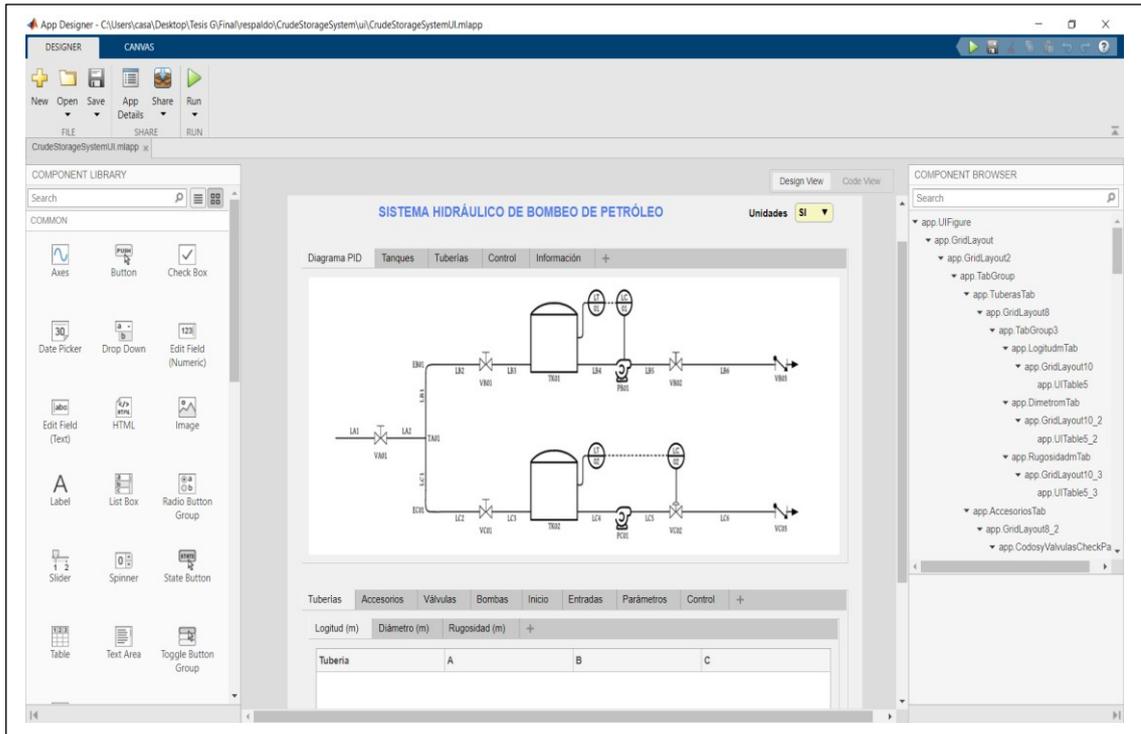
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

### 3.4. Creación de la Interfaz Gráfica

Para la creación de la interfaz gráfica de usuario se hará uso de otra herramienta de Matlab llamada App Designer dentro de la misma se va a trabajar para crear dicha interfaz gráfica, la misma que comenzará con el diseño de la pantalla de inicio para posterior finalizar con el código de programación de la interfaz gráfica.

#### 3.4.1. Diseño de la pantalla de inicio

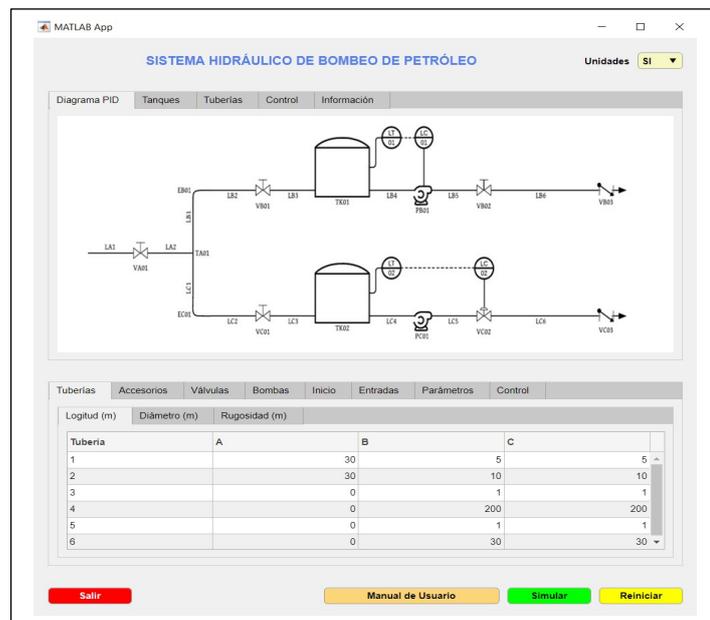
Para la creación de la pantalla de inicio de la interfaz gráfica nos ayudamos del Component Library, dentro del mismo encontramos todos los elementos que va a constar en la interfaz gráfica, en common se encuentran los check box, axes, label, list box y table, mientras que en containers se encuentran los grid layout, panel y tab group, dichos elementos deben ser asignados de manera didáctica para que el usuario que va a hacer uso de la aplicación se sienta cómodo al utilizarla como se muestra en la figura 26-3.



**Figura 22-3.** Elementos de la Interfaz Gráfica

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

Al obtener ya una versión final de cómo va distribuidos los elementos dentro de la pantalla de inicio se corre el programa para visualizar como se ejecuta la interfaz gráfica, como se muestra en la figura 27-3.



**Figura 23-3.** Pantalla de Inicio de la Interfaz Gráfica

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

### 3.4.2. *Pasos para iniciar la simulación*

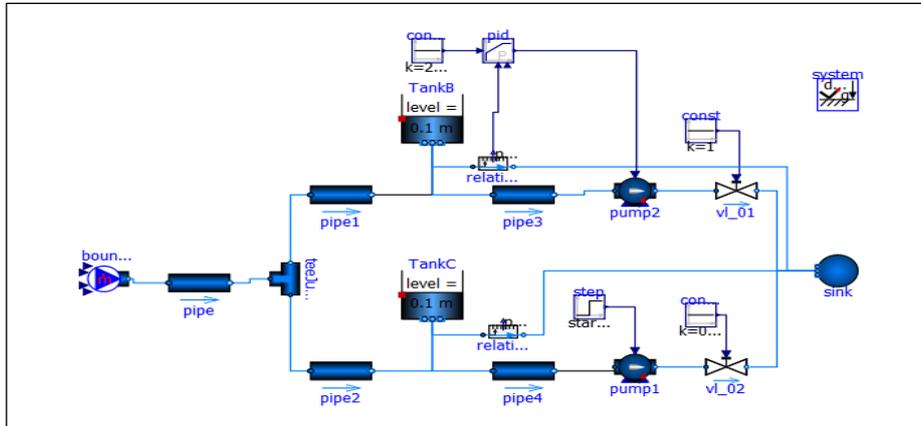
Estos puntos son los más importantes dentro del código de la interfaz gráfica para poder correr la simulación y hacer que la interfaz gráfica funcione a continuación se los detalla:

- **Configurar el Modelo:** Dentro de la configuración del modelo debemos llamar a dos funciones la primera `getDatta` obtiene los datos y los carga en las tablas dispuestas en la pantalla de inicio, la segunda denominada `cfgModel`, esta función permite configurar el modelo pasando los parámetros, cuando inicia, cuando finaliza y el tamaño de paso de la simulación.
- **Ejecutar la Simulación:** Para ejecutar la simulación hacemos uso de una de las propiedades del código de la `AppDesigner` llamado `Model` el mismo que guarda o almacena a la función `cfgModel` para empezar a ejecutar la simulación, además utilizamos un alternador que nos mostrara en el botón simular la palabra `Simular` cuando este prendido y `simulando` cuando este apagado.
- **Guardar los Resultados:** Los resultados se van a guardar dentro de una estructura llamada `results` esta albergara los del tiempo, salidas, entradas, control, setpoints y resultados no convertidos.
- **Convertir los Resultados:** Para convertir los resultados ejecutaremos la función `convertResults`, la misma que tendrá un condicional dependiendo de cuál de los dos sistemas de unidades que cuenta el programa (`SI`, `IMP`) necesite el usuario, dependiendo del caso que se necesite las unidades `IMP` el programa convertirá os resultados dentro de las gráficas a las unidades del sistema `IMP`, caso contrario mantendrá las del `SI`.
- **Graficar los Resultados:** Dentro de esta función se grafican los resultados de las gráficas del nivel de fluido del tanque, caudales por línea tubería (b,c) y los resultados del control tanto con la bomba como con la válvula.

### 3.5. Validación de Datos Obtenidos

Mediante la simulación del llenado de tanques es posible determinar el nivel de fluido contenido en ellos, este nivel de crudo será validado con el simulador de `OpenModelica`, con el objetivo de comparar los datos y gráficos de nivel de crudo dentro de los tanques de almacenamiento.

Para la simulación del llenado de los tanques en OpenModelica se utilizó el diagrama que se observa en la figura 24.3, el mismo que nos permite determinar cuál es el nivel de crudo en los tanques de almacenamiento.



**Figura 24-3.** Diagrama utilizado en OpenModelica para la validación

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

## CAPÍTULO IV

### 4. GESTIÓN DEL PROYECTO

#### 4.1. Cronograma

**Tabla 1-4.** Cronograma del Proyecto

ACTIVIDAD	TIEMPO																			
	1º mes				2º mes				3º mes				4º mes				5º mes			
	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
Curso de Simulación en Matlab			x	x	x															
Identificación de las variables de diseño					x	x	x	x												
Simulación en Matlab y Redacción del Proyecto								x	x	x	x	x	x							
Elaboración de la Interfaz Gráfica de Usuario													x	x	x	x				
Creación de un Manual de Usuario de la App creada																	x	x	x	
Presentación y Corrección del trabajo Final																	x	x	x	
Defensa del trabajo																				x

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

## 4.2. Presupuesto

**Tabla 2-4.** Presupuesto del Proyecto

<b>MATRIZ DE PRESUPUESTO</b>			
<b>ACTIVIDAD</b>	<b>MONTO (\$)</b>	<b>FUENTE DE FINANCIAMIENTO</b>	
		<b>INTERNA</b>	<b>EXTERNA</b>
Cursos de aprendizaje en línea	220	X	
Licencia de Matlab	60	X	
Internet	100	X	
Impresiones	25	X	
Empastado	25	X	
<b>TOTAL</b>	<b>\$430</b>		

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

## 4.3. Recursos materiales

Dentro del desarrollo del trabajo de titulación se utilizó el software Matlab y dentro del mismo se utilizó dos herramientas fundamentales para el desarrollo del proyecto que son:

- *Simulink*
- *App Designer*

## 4.4. Resultados

Dentro de este punto se va a analizar los resultados obtenidos de la implementación de la interfaz gráfica de usuario, antes de eso se enuncian los parámetros de ingreso de crudo para obtener dichos resultados en la tabla 14-4.

**Tabla 3-4:** Parámetros de Ingreso de la Interfaz.

<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caudal de Crudo	qci	0.0711	$m^3/s$
Presión de Flujo	pci	202650	$Pa$
Densidad del Crudo	$\rho$	891.75	$kg/m^3$
Viscosidad del Crudo	$\mu$	0.0208	$Pa \cdot s$
Gravedad Especifica del Crudo	SG	0.8922	adm

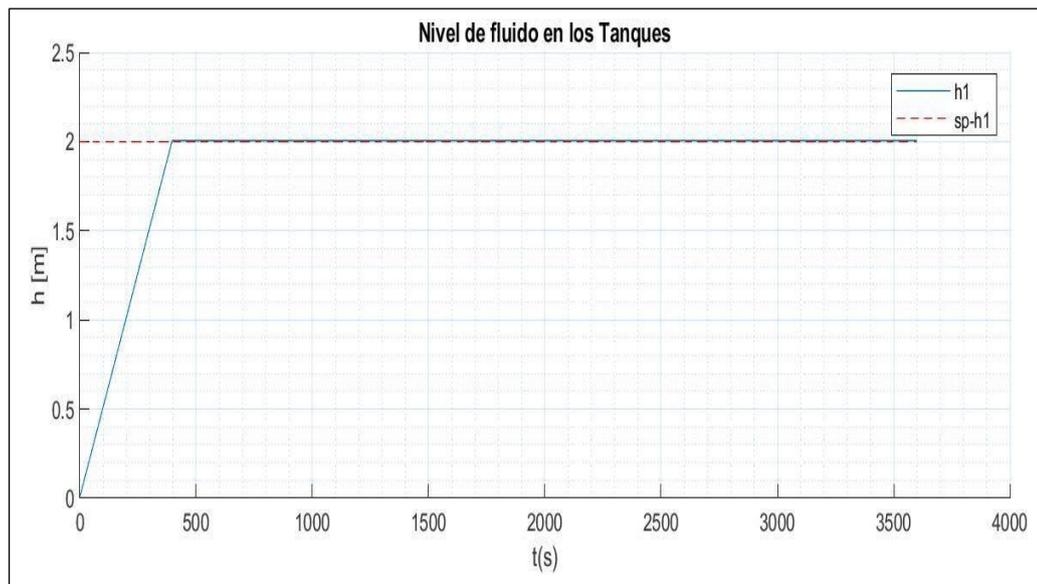
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Una vez establecidos los parámetros iniciales se simula el proceso y se pueden analizar las diferentes graficas de la Interfaz.

#### 4.4.1. Caso 1

##### 4.4.1.1. Nivel de Fluido en los Tanques

- Nivel de Fluido en el Tanque TK01



**Gráfico 6-3.** Gráfica del Nivel de Crudo TK01

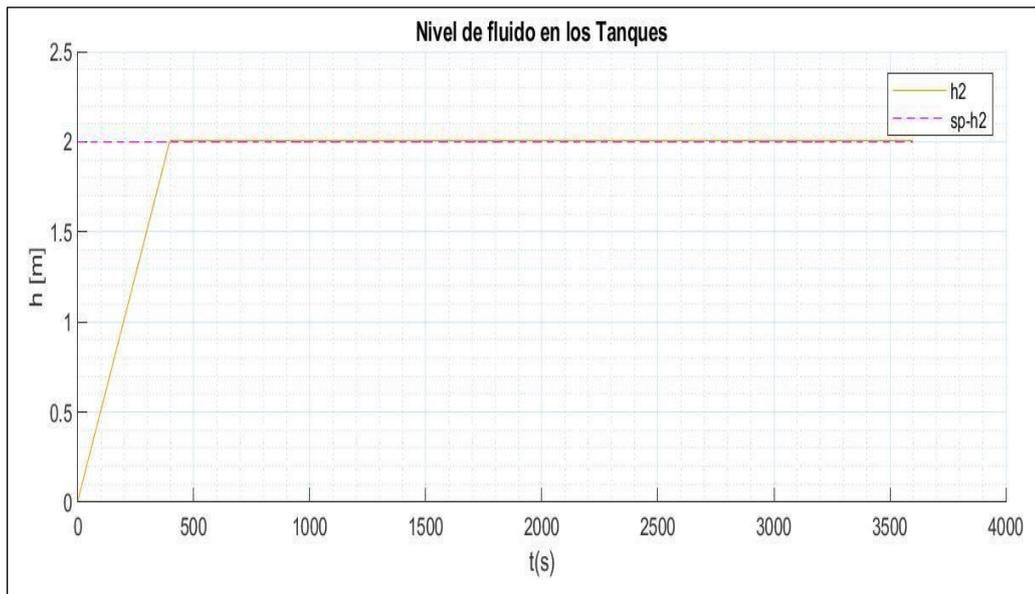
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Donde:

- $h1$  Nivel en el Tanque TK01  
 $sp - h1$  Setpoint del Nivel en el Tanque TK01

En el gráfico se observa que el nivel del crudo comienza con 0.0010 m que viene a ser 0.00328 ft, esta es la altura mínima que tienen los tanque que contendrán el crudo, el nivel del crudo sigue subiendo progresivamente hasta alcanzar su setpoint, al segundo 400 ya comienza a haber crudo a través de la bomba PB01 en el tramo B.

- Nivel de Fluido en el Tanque TK02



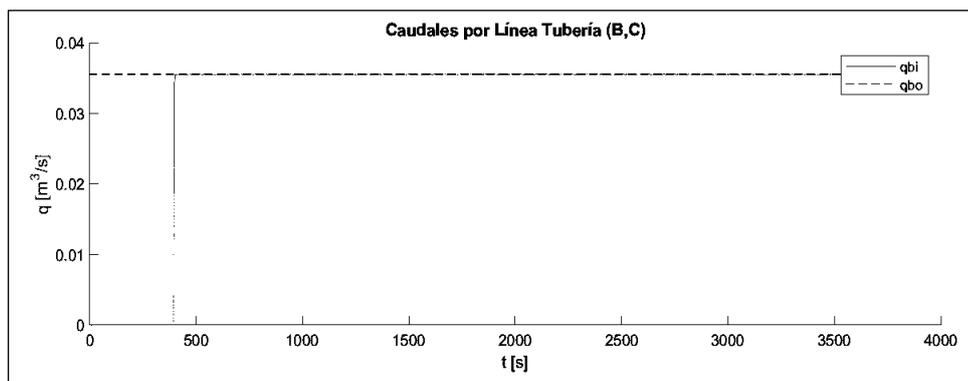
**Gráfico 7-3.** Nivel de Crudo TK02

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Se observa en el gráfico que el nivel del crudo comienza con 0.0010 m que viene a ser 0.00328 ft, esta es la altura mínima que tienen los tanque que contendrán el crudo, el nivel del crudo sigue subiendo progresivamente hasta alcanzar su setpoint, al segundo 400 ya comienza a haber crudo a través de la válvula VC02 en el tramo C.

#### 4.4.1.2. Caudal por línea Tubería (B,C)

- Caudales por Línea Tubería B

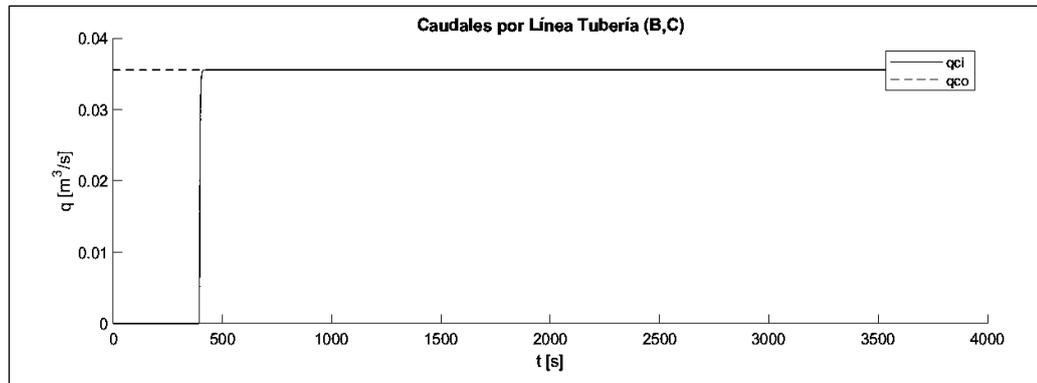


**Gráfico 8-3.** Caudal de salida de la Línea B

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Dentro del gráfico se observa que no hay paso de crudo a través de la línea de tubería B hasta el segundo 400 en donde el tanque de almacenamiento ya llega a su setpoint y progresivamente se ve que ya comienza a haber crudo en la línea B hasta llegar a los  $0.0355 \text{ m}^3/\text{s}$  en donde el caudal se iguala al caudal que entra y se observa que el caudal de entrada de la línea B es igual al caudal de salida de la línea B.

- Caudales por Línea Tubería C



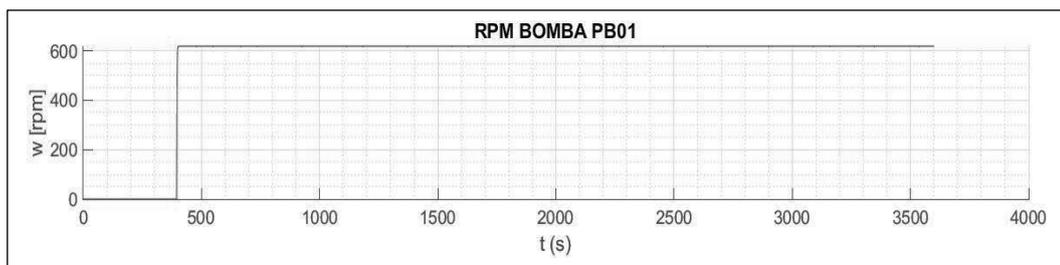
**Gráfico 9-3.** Caudal de salida de la Línea C

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

Se puede observar que en el gráfico no hay paso de crudo a través de la línea de tubería C hasta el segundo 400 en donde el tanque de almacenamiento ya llega a su setpoint y progresivamente se ve que ya comienza a haber crudo en la línea C hasta llegar a los  $0.0355 \text{ m}^3/\text{s}$  en donde el caudal se iguala al caudal que entra y se observa que el caudal de entrada de la línea C es igual al caudal de salida de la línea C.

#### 4.4.1.3. Gráficas de Control

- Control de Nivel con la Bomba PB01

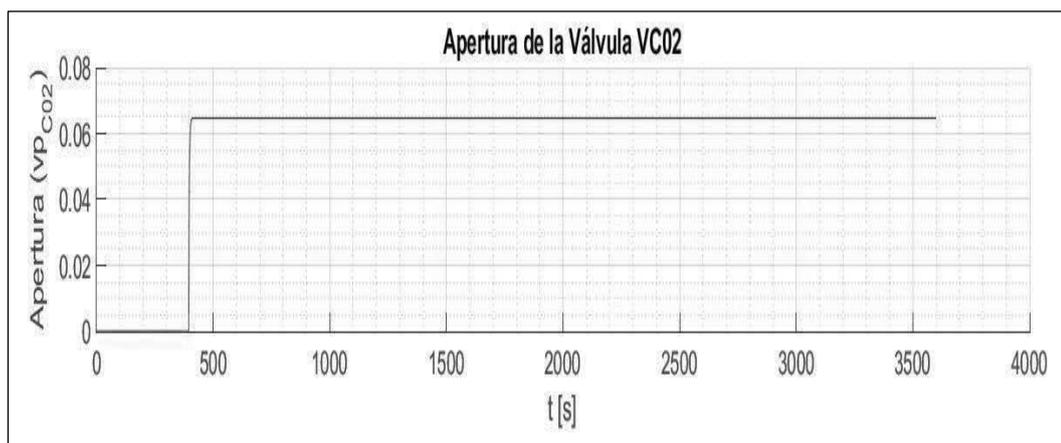


**Gráfico 10-3.** RPM de las Bomba PB01

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

El nivel de crudo del tanque de almacenamiento TK01 es controlado a través de la bomba PB01 la misma que se encargara de aumentar o disminuir los rpm para bombear crudo en caso de que haya un exceso de crudo en el tanque o apagarse en el caso de que el nivel de crudo en el tanque sea menor al setpoint, en el grafico se observa como la bomba permanece apagada hasta llegar a los 400 segundos en donde el tanque de almacenamiento TK01 llega a su setpoint y la bomba progresivamente sube las revoluciones hasta llegar a las 618 rpm en donde el proceso ya comienza a controlar el nivel del tanque de crudo.

- Control de Nivel con la Válvula PB01



**Gráfico 11-3.** Gráfica de la Apertura de la Válvula VC02

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

En el tanque de almacenamiento TK02 el nivel es controlado por la válvula VC02, esta válvula se cierra en caso de que el nivel del tanque de almacenamiento sea menor al setpoint y por otra parte se abre si el tanque de almacenamiento llega a su setpoint la válvula se abre para dar paso a la salida de crudo, dentro del grafico podemos observar que la válvula permanece cerrada hasta el segundo 400 en donde ya se empieza a abrir lentamente hasta llegar a un 6,5% de apertura de la válvula en donde ya el sistema de control empieza a actuar perfectamente para controlar el nivel en el tanque TK02.

#### 4.4.2. Caso 2

##### 4.4.2.1. Nivel de Fluido en los Tanques

- Nivel de Fluido en el Tanque TK01



**Gráfico 12-3.** Gráfica del Nivel de Crudo TK01

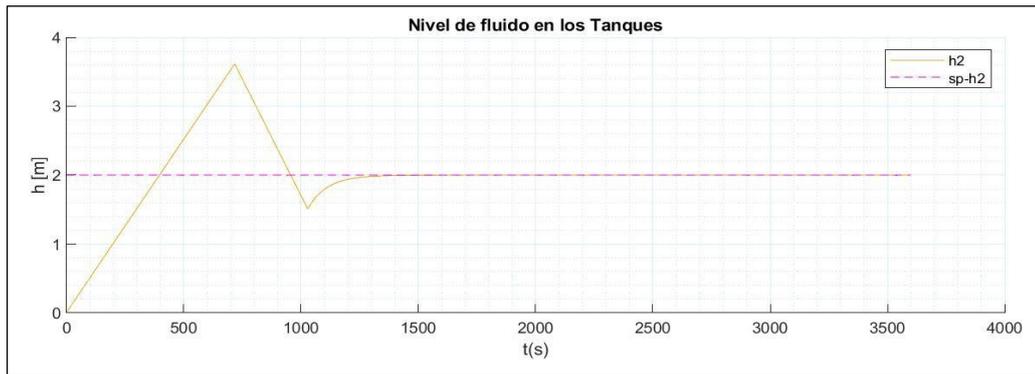
Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Donde:

- $h1$  Nivel en el Tanque TK01
- $sp - h1$  Setpoint del Nivel en el Tanque TK01

En el gráfico se observa que el nivel del crudo comienza con 0.0010 m que viene a ser 0.00328 ft, esta es la altura mínima que tienen los tanques que contendrán el crudo, el nivel del crudo sigue subiendo progresivamente hasta llegar a un máximo de 3.477 m y a partir de ello empieza a descender ya que la bomba PB01 empieza a funcionar al máximo hasta ajustarse a su setpoint, al segundo 1560 ya el nivel de crudo se ajusta al setpoint y desde ese segundo la bomba PB01 bombea el crudo de forma constante a través de la tubería en el tramo B.

- Nivel de Fluido en el Tanque TK02



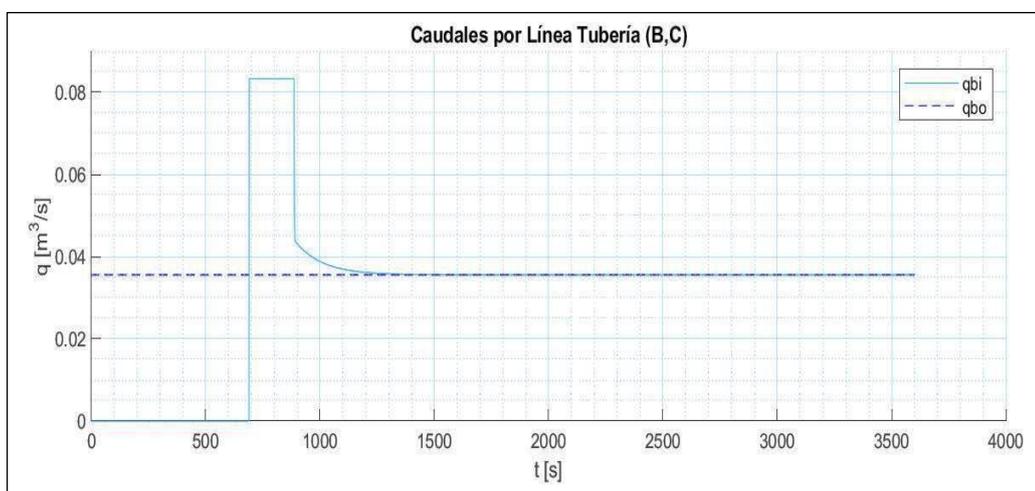
**Gráfico 13-3.** Nivel de Crudo TK02

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Se observa en el gráfico que el nivel del crudo comienza con 0.0010 m que viene a ser 0.00328 ft, esta es la altura mínima que tienen los tanque que contendrán el crudo, el nivel del crudo sigue subiendo progresivamente hasta alcanzar un nivel máximo de 3.6 m al segundo 717 a partir de este empieza a descender ya que la válvula VC02 se abre completamente y por este efecto hasta regular el porcentaje de apertura de la válvula, el nivel desciende a 1.512 m, al segundo 1650 el nivel se ajusta a su setpoint, dejando un paso constante de crudo en el tramo de tubería C.

#### 4.4.2.2. Caudal por línea Tubería (B,C)

- Caudales por Línea Tubería B

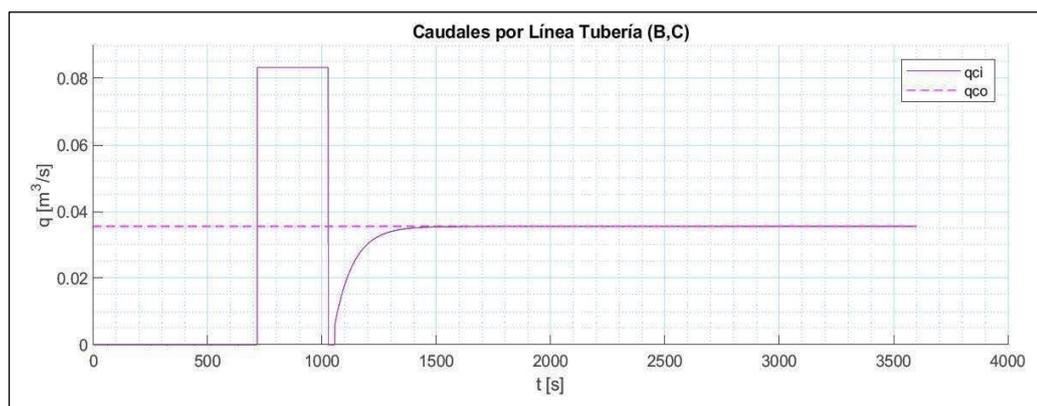


**Gráfico 14-3.** Caudal de salida de la Línea B

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Dentro del grafico se observa que no hay paso de crudo a través de la l línea de tubería B hasta el segundo 689.7, a partir de este tiempo el caudal aumenta hasta llegar a un máximo de  $0.0833 \text{ m}^3/\text{s}$  en las tuberías ya que la bomba PB01 empieza a trabajar al máximo hasta llegar al nivel requerido, al segundo 886 el caudal empieza a disminuir junto con los rpm de la bomba hasta llegar a tener un caudal constante de crudo al segundo 1560 con un caudal de  $0.0355 \text{ m}^3/\text{s}$ , en donde el caudal se iguala al caudal que entra y se observa que el caudal de entrada de la línea B es igual al caudal de salida de la línea B.

- Caudales por Línea Tubería C



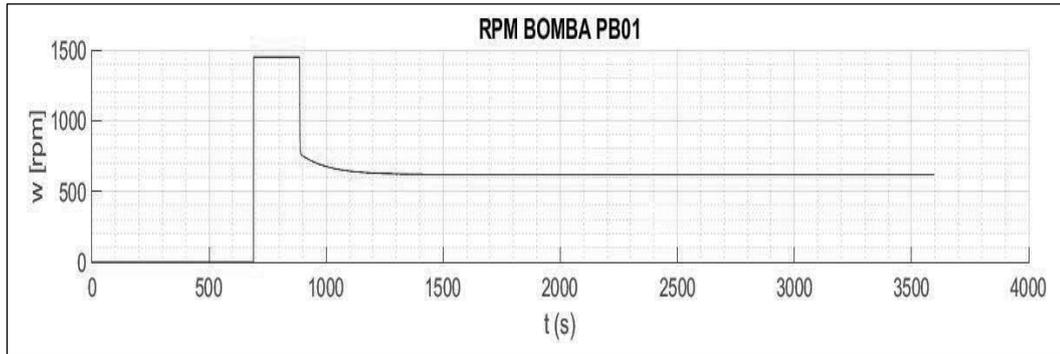
**Gráfico 15-3.** Caudal de salida de la Línea C

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

Se puede observar que en el grafico no hay paso de crudo a través de la línea de tubería C hasta el segundo 716.7, en donde el caudal aumenta hasta llegar a un máximo de  $0.0833 \text{ m}^3/\text{s}$  en las tuberías ya que la válvula VC02 se abre al máximo hasta llegar al nivel requerido, al segundo 1028 el caudal empieza a disminuir junto con la apertura de la válvula hasta llegar a tener un caudal constante de crudo al segundo 1605 con un caudal de  $0.0355 \text{ m}^3/\text{s}$ , en donde el caudal se iguala al caudal que entra y se observa que el caudal de entrada de la línea C es igual al caudal de salida de la línea C.

#### 4.4.2.3. Graficas de Control

- Control de Nivel con la Bomba PB01

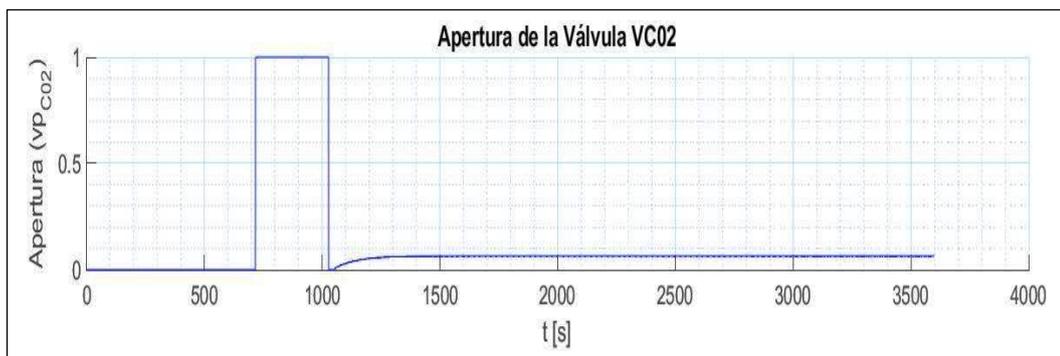


**Gráfico 16-3.** RPM de las Bomba PB01

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

En el gráfico se observa como la bomba permanece apagada hasta llegar a los 690.3 segundos en donde esta empieza a funcionar hasta llegar al máximo a 1450 rpm para controlar el nivel, al segundo 886.3 la bomba empieza a bajar las revoluciones hasta llegar al nivel de crudo deseado, esto sucede al segundo 1560 donde la bomba ya empieza a bombear crudo de manera constante por la tubería con un caudal de  $0.0355 \text{ m}^3/\text{s}$  a 619 rpm.

- Control de Nivel con la Válvula PB01



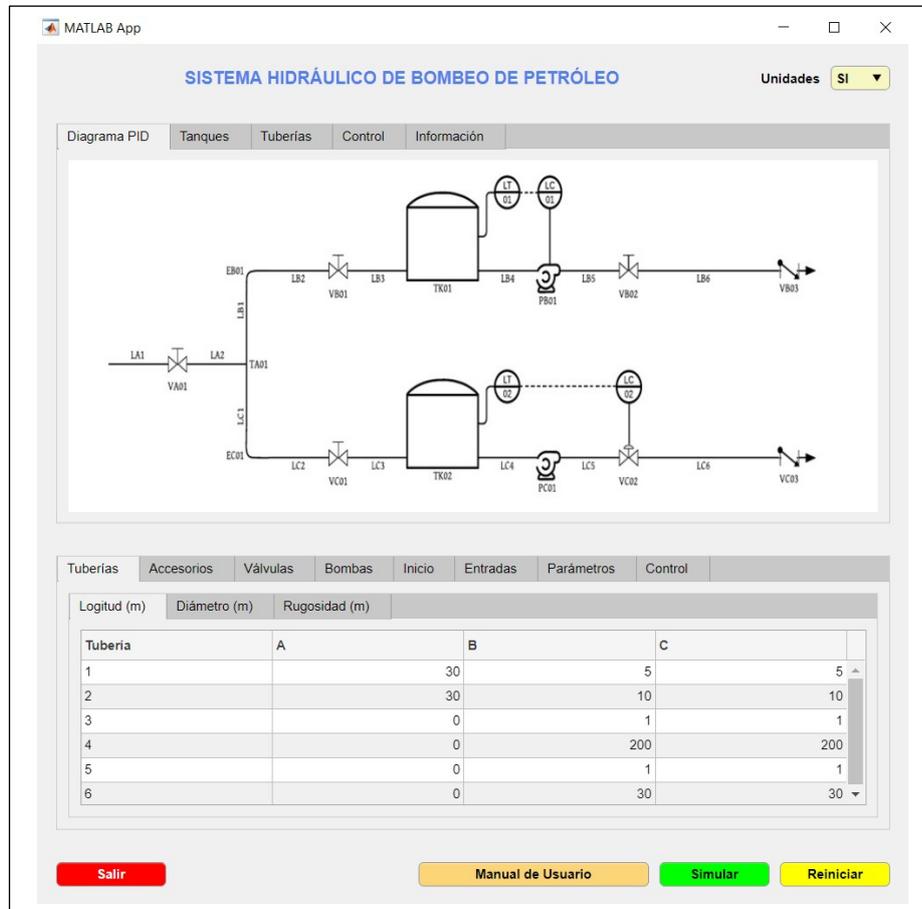
**Gráfico 17-3.** Gráfica de la Apertura de la Válvula VC02

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Dentro del gráfico podemos observar que la válvula permanece cerrada hasta el segundo 717 en donde la válvula VC02 se abre al máximo y deja pasar el crudo hasta el segundo 1028 en donde la válvula se cierra sin dejar el paso del crudo, ya que el nivel del crudo en el tanque desciende hasta 1,512 m, hasta que regule dicho nivel la válvula se empieza a abrir de manera progresiva hasta

llegar al setpoint, al segundo 1650 se llega al nivel de crudo deseado con un caudal constante de  $0.0355 \text{ m}^3/\text{s}$  a un porcentaje de apertura de la válvula de 0.0646 %.

#### 4.4.3. Interfaz de usuario como herramienta didáctica



**Figura 25-3.** Interfaz de usuario pantalla principal

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

Esta es la pantalla de inicio que se presenta en la interfaz de usuario la misma que va a ser utilizada como herramienta didáctica con los estudiantes.

#### 4.4.4. Validación del control de nivel en los tanques de almacenamiento

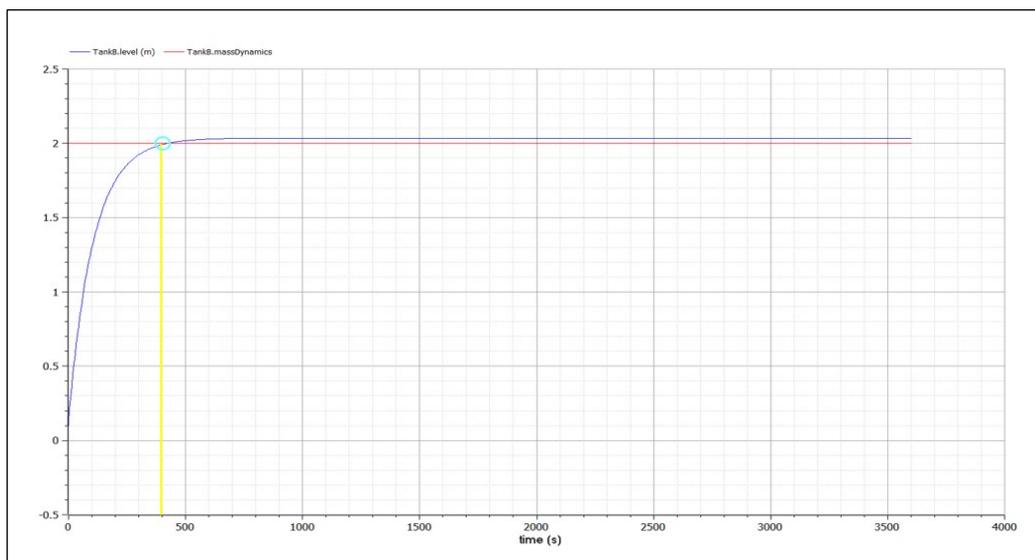
Para validar los resultados obtenidos dentro de la interfaz de usuario creada se toma como referencia al nivel de crudo en los tanques de almacenamiento, se simuló el proceso en OpenModelica para comparar resultados del nivel de crudo de cada tanque, para el cálculo del error porcentual se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$Ep = \left| \frac{V_d - V_e}{V_d} \right| * 100 \quad (66)$$

Donde:

$Ep$  Error Porcentual  
 $V_d$  Valor Deseado  
 $V_e$  Valor Experimental

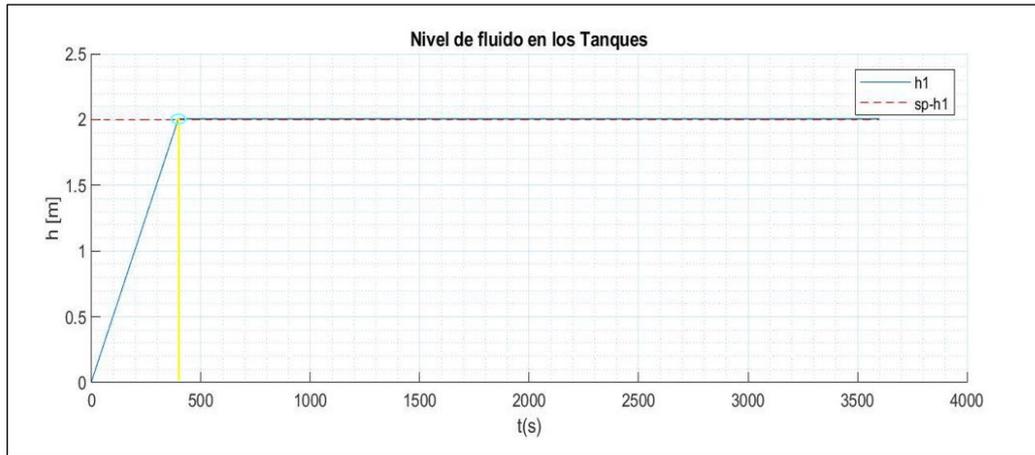
#### 4.4.4.1. Nivel de crudo en el tanque de la línea B



**Gráfico 18-3.** Gráfica del Nivel de Crudo TK01 en OpenModelica

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

En la gráfica se puede observar que el sistema de OpenModelica actúa de igual forma que el sistema de la Matlab, en ambas graficas se puede ver que el nivel de crudo máximo llega al setpoint al segundo 400 como lo muestra la línea amarilla y el círculo celeste, en el caso de OpenModelica con un nivel máximo de crudo en el TK01 de 2,0353 m, por otra parte el nivel máximo de crudo en el TK01 para el de Matlab es de 2,0050 m ambos niveles de crudo llegan a su setpoint mostrado, en la gráfica de OpenModelica se observa una pequeña pendiente hasta llegar al setpoint, mientras que en Matlab tenemos una perpendicular esto sucede debido a que en OpenModelica las propiedades fisicoquímicas se calculan mientras se simula, por otro lado en Matlab los modelos de las sustancias son constantes por lo que se utiliza una tabla en la aplicación.



**Gráfico 19-3.** Gráfica del Nivel de Crudo TK01 en la App

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

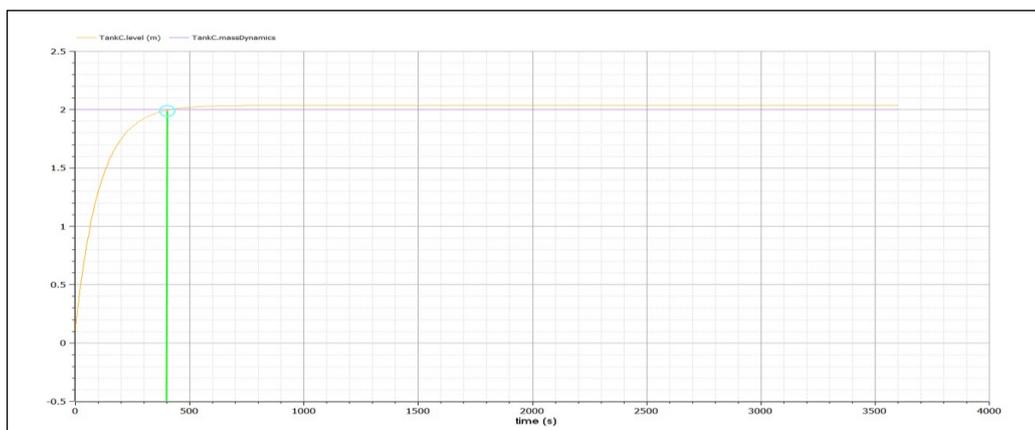
**Tabla 4-4:** Error y Resultados obtenidos en el TK01

Parámetro	Valor	Unidad
Nivel de crudo máximo deseado en el TK01	2,0353	m
Nivel de crudo máximo experimental en el TK01	2,0050	m
Error Porcentual	1,4892	%

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

Como se muestra en la tabla 4-4 el porcentaje de error entre el nivel de crudo deseado y experimental es de 1,4892%, al determinar esto se muestra que los resultados obtenidos en la interfaz de usuario del sistema hidráulico de bombeo de petróleo son muy aceptables y parecidos.

#### 4.4.4.2. Nivel de crudo en el tanque de la línea C



**Gráfico 20-3.** Gráfica del Nivel de Crudo TK02 en OpenModelica

Realizado por: García, Gabriel, 2022.

En la gráfica se puede observar que el sistema de OpenModelica actúa de igual forma que el sistema de la Matlab, en ambas graficas se puede ver que el nivel de crudo máximo llega al setpoint al segundo 400 como lo muestra la línea verde y el círculo celeste, en el caso de OpenModelica con un nivel máximo de crudo en el TK02 de 2,0378 m, por otra parte el nivel máximo de crudo en el TK02 para el de Matlab es de 2,0050 m ambos niveles de crudo llegan a su setpoint mostrado, en la gráfica de OpenModelica se observa una pequeña pendiente hasta llegar al setpoint, mientras que en Matlab tenemos una perpendicular esto sucede debido a que en OpenModelica las propiedades fisicoquímicas se calculan mientras se simula, por otro lado en Matlab los modelos de las sustancias son constantes por lo que se utiliza una tabla en la aplicación.



**Gráfico 21-3.** Gráfica del Nivel de Crudo TK02 en la App

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

**Tabla 5-4:** Error y Resultados obtenidos en el TK02

Parámetro	Valor	Unidad
Nivel de crudo máximo deseado en el TK02	2,0378	m
Nivel de crudo máximo experimental en el TK02	2,0050	m
Error Porcentual	1,6105	%

**Realizado por:** García, Gabriel, 2022.

Como se muestra en la tabla 5-4 el porcentaje de error entre el nivel de crudo deseado y experimental es de 1,6105%, al determinar esto se muestra que los resultados obtenidos en la interfaz de usuario del sistema hidráulico de bombeo de petróleo son muy aceptables y parecidos.

## CONCLUSIONES

- Se desarrolló el modelado, simulación y control del sistema hidráulico de bombeo de petróleo mediante la utilización del software Matlab junto con sus herramientas Simulink en donde se realizó el lazo de control para controlar el nivel de crudo en los tanque y App Designer para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario la misma que funciona de manera independiente de Matlab, cuya herramienta didáctica será utilizada con fines educativos dentro de la catedra de Control de Procesos.
- Se identificó tanto las variables como parámetros de diseño del sistema hidráulico de bombeo de petróleo, las mismas que pueden modificar el funcionamiento como la estructura del sistema a simular estas variables y parámetros, como los parámetros que intervienen en el sistema de control, las variables de ingreso y los parámetros del fluido todos estos son los más importantes dentro del sistema hidráulico de bombeo de petróleo.
- Se modeló matemáticamente el sistema hidráulico de bombeo de petróleo mediante la utilización de ecuaciones algebraicas y ecuaciones diferenciales, para ello se consideró tanto los parámetros estructurales de cada uno de los elementos que forman parte del sistema hidráulico de petróleo, de igual manera se debe conocer propiedades del fluido (crudo) que será el que va a bombear dicho sistema a simular.
- El sistema de control se programó con la herramienta didáctica de Matlab Simulink, dentro de esta herramienta se creó un diagrama de bloques con tres bloques principales el primero Input Pipeline este bloque de Matlab Function representa todos los dispositivos hasta antes de entrar a los tanques de almacenamiento de crudo, el segundo Output Pipeline este bloque de Matlab Function llamado Output Pipeline contiene todos los elementos que se encuentran después de los tanques de almacenamiento hasta el final de las líneas del sistema hidráulico de bombeo de petróleo, y el ultimo Storage System dentro de este bloque de Simulink de Matlab se lleva a cabo el control de la altura de carga de los tanques de almacenamiento de crudo, por otra parte se utilizó App Designer para crear la interfaz gráfica..
- Se creó un manual de usuario, que tiene como objetivo servir de guía al usuario al momento de manejar la aplicación en el ordenador, dentro de este manual de usuario se detallan los pasos desde la instalación de la app hasta que valores podemos modificar y las recomendaciones para su correcto funcionamiento y familiarización inmediata con el usuario.

## **RECOMENDACIONES**

- Trabajar con un catálogo de bombas amplio que incluya por lo menos tres bombas diferentes para una mejor interacción con el usuario.
- Simular el proceso para otro tipo de tanques con dimensiones diferentes a las de los tanques de techo flotante.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGILA, F; & CALAHORRANO, I.** *Diseño y construcción de un banco de pruebas para bombas centrífugas conectadas en serie y paralelo.* Universidad Politécnica Salesiana, 2011. pp. 35-38.

**AHMAD, FANI; & PETERSEN, FANI.** *Modeling Industrial Chemical Processes with MATLAB and Simulink at HUGO PETERSEN GmbH - MATLAB & Simulink.* [blog]. 2012. [Consulta: 25 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/modeling-industrial-chemical-processes-with-matlab-and-simulink-at-hugo-petersen-gmbh.html>.

**ALIMONTI, C.** “Experimental characterization of globe and gate valves in vertical gas–liquid flows”. *Experimental Thermal and Fluid Science.* [en línea], 2014. vol. 54, pp. 259-266. [Consulta: 24 julio 2021]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.01.001>.

**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. 41-43

**ATTAWAY, S.** *MATLAB una introducción práctica a la programación y la resolución de problemas* [en línea]. Quinta. Boston-USA: Elsevier, 2019. [Consulta: 6 octubre 2021]. ISBN 978-0-12-815479-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02955-5>

**AXAXL.** “Property Risk Consulting Guidelines”. *Risk Consulting* [en línea], 2020, (United States of America). S.n, pp. 1-2. [Consulta: 25 febrero 2021]. Disponible en: [https://axaxl.com/prc-guidelines/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-17/prc1733crudeoilandpetroleumproductspumpingstationsv1.pdf?sc\\_lang=en&hash=D4B0622AE2641A7F0E8CCF3D5B749C70](https://axaxl.com/prc-guidelines/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-17/prc1733crudeoilandpetroleumproductspumpingstationsv1.pdf?sc_lang=en&hash=D4B0622AE2641A7F0E8CCF3D5B749C70).

**BARKER, G.** *The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2018. [Consulta: 26 marzo 2021]. Disponible en: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjws/81/5/81\\_416/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjws/81/5/81_416/_article/-char/ja/).

**BRENES, L; & GÓMEZ, D.** Planta de producción de cloruro de vinilo. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Mecánica. Canals [en línea], 2018. pp. 1-49. [Consulta: 26 marzo 2021]. Disponible en: [https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2018/199195/TFG\\_MOA\\_part04.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2018/199195/TFG_MOA_part04.pdf).

**COTOS, R.** Mecánica de fluidos. [en línea]. Primera, 2019. pp. 1-49. [Consulta: 18 octubre 2021]. ISBN 9702608058. Disponible en: [https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2018/199195/TFG\\_MOA\\_part04.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2018/199195/TFG_MOA_part04.pdf).

**FISHER.** 2019. Guía de Válvulas de Control. [en línea]. Quinta, 2019. pp. 56-67. Iowa: Emerson.

**MATEUS, M.; & VIVAS, D. 2007.** Mantenimiento de tanques hidrostáticos de techo fijo para la Industria Petrolera. Escuela Politécnica Nacional [en línea], 2007 .S.l. pp. 34-46.

**MATHWORKS.** *Descripción del producto MATLAB - MATLAB & Simulink – MathWorks España.* The MathWorks, Inc. [blog]. 2021. [Consulta: 10 junio 2021]. Disponible en: [https://es.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html).

**MATHWORKS.** *Conceptos básicos sobre el escritorio - MATLAB & Simulink - MathWorks España, Inc.* [blog]. 2021. [Consulta: 1 octubre 2021]. Disponible en: [https://es.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/desktop.html](https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/desktop.html).

**OCTALACERO.** Especificaciones para Codo de Acero al Carbon y Inoxidable. OCTALSTEEL. [blog]. 2021. [Consulta: 10 octubre 2021]. Disponible en: <https://www.octalacero.com/codo-de-acero-al-carbon-y-inoxidable>.

**PHARRIS, T; & KOLPA, R.L.** *Overview of the design, construction, and operation of interstate liquid petroleum pipelines.* [blog]. 2008. [Consulta: 12 marzo 2021]. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/925387-B9Bf0i/>.

**POVEDA, R; et al.** *El Petróleo en el Ecuador la Nueva Era Petrolera* [en línea]. S.l.: 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>.

**ROA, O; et al.** “Modelado matemático, simulación, análisis y control de un sistema hidráulico interactivo-tres tanques en serie”. *Revista de Tecnología* [en línea], 2018, vol. 16, no. 1, pp. 77. [Consulta: 8 noviembre 2020]. Disponible en: <http://revistas.unbosque.edu.co/RevTec/article/view/2318>.

**SMITH, M.** *Useful information on centrifugal pumps. UK's Leading Pump Specialist* [blog]. 2021. [Consulta: 26 marzo 2021]. Disponible en: <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/centrifugal-pumps>.

**SOLANO, A; et al.** Sistema de Control de Presión para el Suministro de Agua en la Central de Servicios del Centro Médico Nacional La Raza. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica [en línea], 2012, S.l. [Consulta: 28 abril 2021]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/11487/1/10.pdf>.

**SOLORZANO, R.** *Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas. Hydraulics & Pneumatics* [blog]. 2016. [Consulta: 26 marzo 2021]. Disponible en: <https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-en-espanol/article/21886594/principios-ingenieriles-bsicos-bombas-hidrulicas>.

**SOUSAS, Farid; et al.** “A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation”. *Petroleum Research* [en línea], 2020, (Algeria). S.l.: s.n., pp. 1-2. [Consulta: 4 marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001>.

**STARIKOV, D; et al.** “The pipeline oil pumping engineering based on the Plant Wide Control technology”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [en línea], 2015, vol. 81, pp. 012111. [Consulta: 9 marzo 2021]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/81/1/012111>.

**SWAMEE, P.** “Design of Multistage Pumping Main”. *Journal of Transportation Engineering*. [en línea], 1996. vol. 122, no. 1, pp. 1-4. [Consulta: 11 marzo 2021]. Disponible en: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%281996%29122%3A1%281%29>.

**THOMPSON, B.** *Different Valve Types, Applications & Suitability*. *Linked in* [blog]. 2016. [Consulta: 2 abril 2021]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/different-valve-types-applications-suitability-brian-g-thompson--1>.

**VALVES, F.** 2021. Válvulas para el sector Petrolero y Gas. Flow Control Aplications [blog]. 2021. [Consulta: 18 noviembre 201]. Disponible en: <https://www.fcavalves.com/es/sector/oil-y-gas/oilandgas/>.

**YUAN, X.** “Research on crude oil storage and transportation based on optimization algorithm”. AIP Conference Proceedings [en línea], 2018, (China). S.l.: s.n., pp. 1-3. [Consulta: 4 marzo 2021]. Disponible en: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5033746>.

**ZAKHAROVA, A: & KOMKOV, N.** “Simulation of Electric Drive Self-Start of Head Units at the Oil Pumping Station”. *Electrotechnical Systems and Complexes* [en línea], 2019, no. 2(43), pp. 35-42. [Consulta: 8 marzo 2021]. Disponible en: <http://esik.magtu.ru/en/48-english/no-2-43-jun-2019/432-35.html>.

**ANEXOS**

**ANEXO A: MANUAL DE USUARIO**

# **SISTEMA HIDRÁULICO DE BOMBEO DE PETRÓLEO**

**MANUAL DE USUARIO VOLUMEN 1**



**Autor:** Gabriel Fernando García Buenaño

**Correo:** gabriel.garcia@epoch.edu.ec

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

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

## **TABLA DE CONTENIDO**

1	INTRODUCCIÓN
1.1	Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo
1.1.1	Funcionamiento del sistema
1.1.2	Control del sistema
1.2	Conceptos Básicos
1.2.1	Variable Controlada
1.2.2	Variable Manipulada
1.2.3	Controlador PID
2	INSTALACIÓN DE LA APP
3	GUÍA DE USO DE LA INTERFAZ GRÁFICA
3.1	Sección de Parámetros
3.1.1	Tuberías
3.1.2	Accesorios
3.1.3	Válvulas
3.1.4	Bombas
3.1.5	Inicio
3.1.6	Entradas
3.1.7	Parámetros
3.1.8	Control
3.2	Sección de Resultados
3.3	Panel de Botones

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Sistema Hidráulico de Bombeo de Petróleo

#### 1.1.1. Funcionamiento del sistema

El sistema hidráulico de bombeo de petróleo recibe el crudo ya separado de sus fases aditivas que son agua y gas, este crudo pasa a través de las tuberías de acero al carbono y de las válvulas hasta llegar a los tanques de almacenamiento donde se almacena dicho crudo hasta llegar al setpoint de nivel en ambos tanques una vez alcanzado este nivel el crudo empieza a salir, en la línea B el nivel del crudo en el tanque TK01 es controlado a través de una bomba centrífuga la misma que se enciende cuando ya se alcanza el nivel requerido y se apaga cuando el nivel del tanque es inferior al requerido, mientras que para la línea C el nivel del tanque TK02 es controlado a través de la válvula VC02 la misma que se abre al tener el nivel de crudo deseado y se cierra si el nivel de crudo es inferior al deseado, al final de cada línea del sistema hidráulico de bombeo de petróleo tanto para la línea B y C se colocan válvulas check las mismas que impedirán que el crudo retorne al sistema.

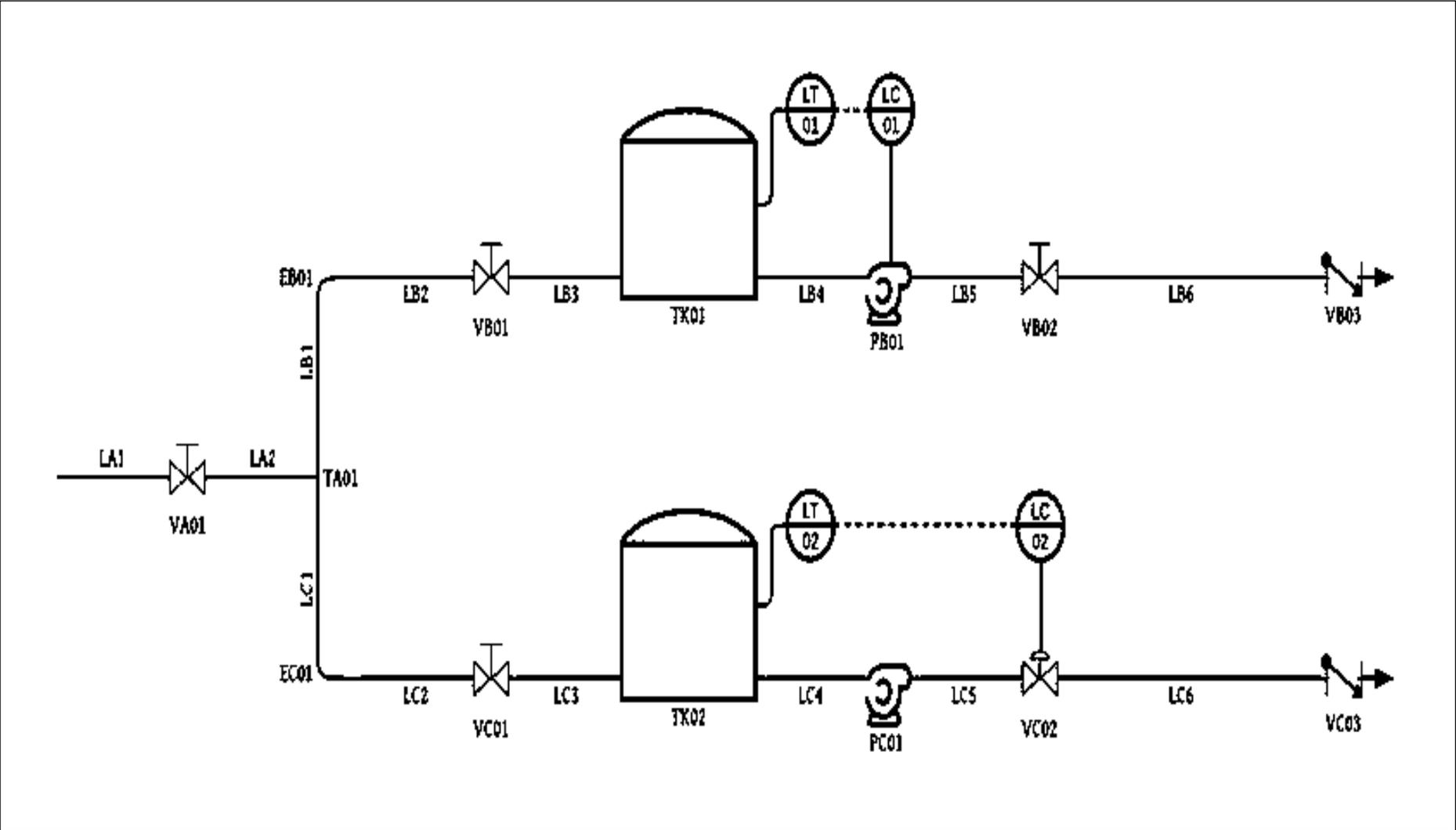
#### 1.1.2. Control del sistema

Los sistemas de control que estarán presentes en el sistema hidráulico de bombeo de petróleo son dos, los mismos que nos permitirán controlar el nivel de crudo en los tanques de almacenamiento, estos tienen la misma función que es controlar el nivel de crudo, su única diferencia es que a uno se le aplica el control a la bomba y el otro a una válvula, en la tabla 1-3 se detalla los controles.

**Tabla 1-1:** Parámetros de Control del Sistema.

Lazo de Control	Tipo de Control	Dispositivo de Control	Parámetro para Controlar
01	PID	Bomba PB01	Nivel de crudo en el tanque
02	PID	Válvula VC02	Nivel de crudo en el tanque

En la siguiente figura se puede observar los elementos que componen al sistema, al igual que el sistema de control para los tanques.



## **1.2. Conceptos Básicos**

### ***1.2.1. Variable Controlada***

Dentro del control este parámetro es el más importante del proceso, por lo cual debe mantenerse constante sin cambios ya que su variación causaría alteraciones en el sistema, para monitorear esta variable se utiliza un sensor que pasa la señal al controlador, para que el control sobre esta variable se lleve a cabo.

### ***1.2.2. Variable Manipulada***

La variable manipulada es el parámetro a partir del cual se va a corregir las perturbaciones del proceso, en otras palabras, son las condiciones o parámetros que son modificados para controlar un proceso.

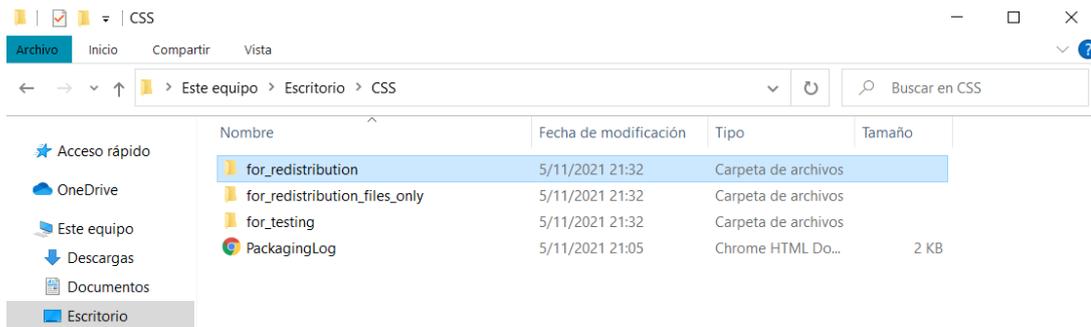
### ***1.2.3. Controlador PID***

Es un sistema de control que a través de un actuador puede mantener un proceso o una variable en un punto anhelado dentro del rango de medida de un sensor que se encarga de medir y es ajustado a través de un setpoint.

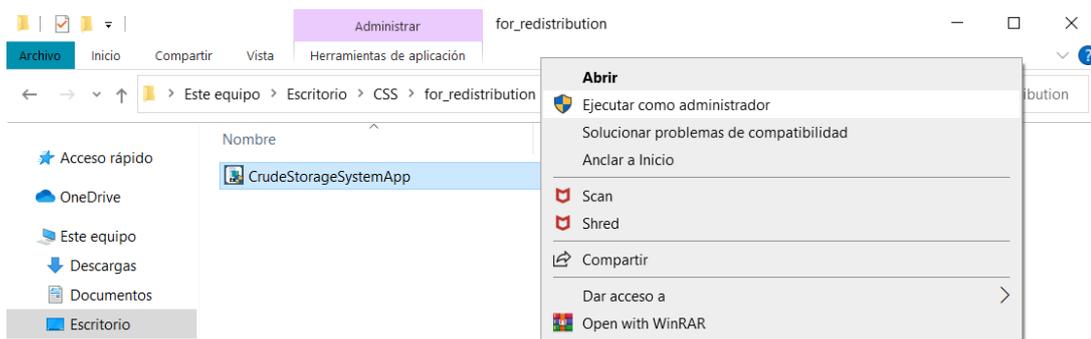
## **2. INSTALACIÓN DE LA APP**

Para instalar la app se debe seguir los siguientes pasos de una forma ordenada como se muestra a continuación:

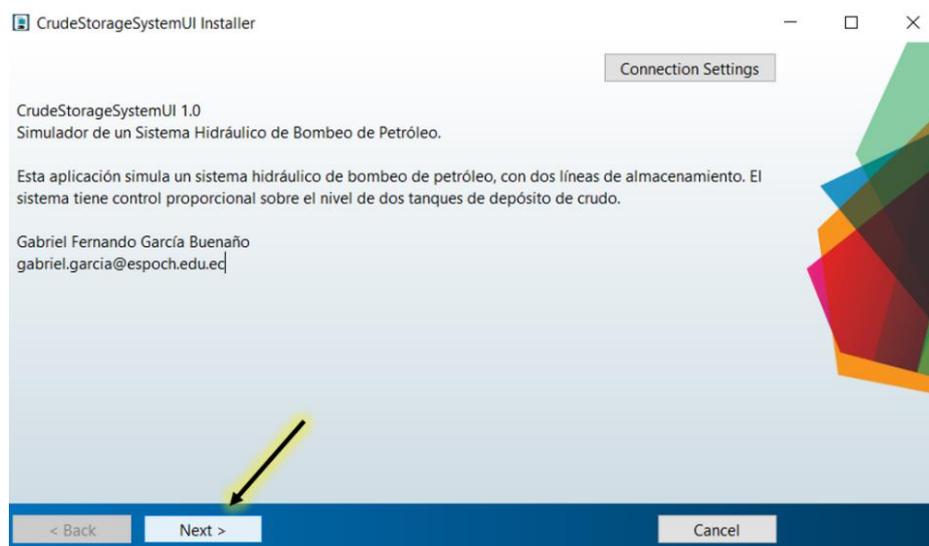
1. Como primer paso se debe localizar la carpeta de archivos de instalación de la App, esta carpeta está en formato rar por lo cual se debe descomprimir los archivos que lleva dentro, al tener ya todos los archivos del rar descomprimidos, nos dirigimos sobre la carpeta con el nombre for\_redistribution y le damos doble clic.



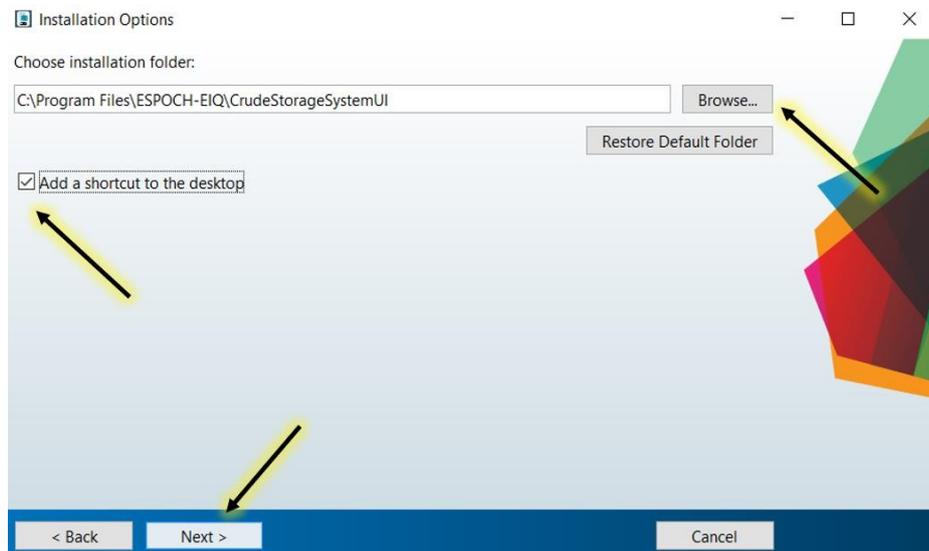
2. Dentro de la carpeta for redistribution encontramos el archivo ejecutable de la aplicación, a este archivo le damos clic derecho y lo ejecutamos como administrador, dicho archivo es el que contiene los paquetes de la App y el Runtime de Matlab.



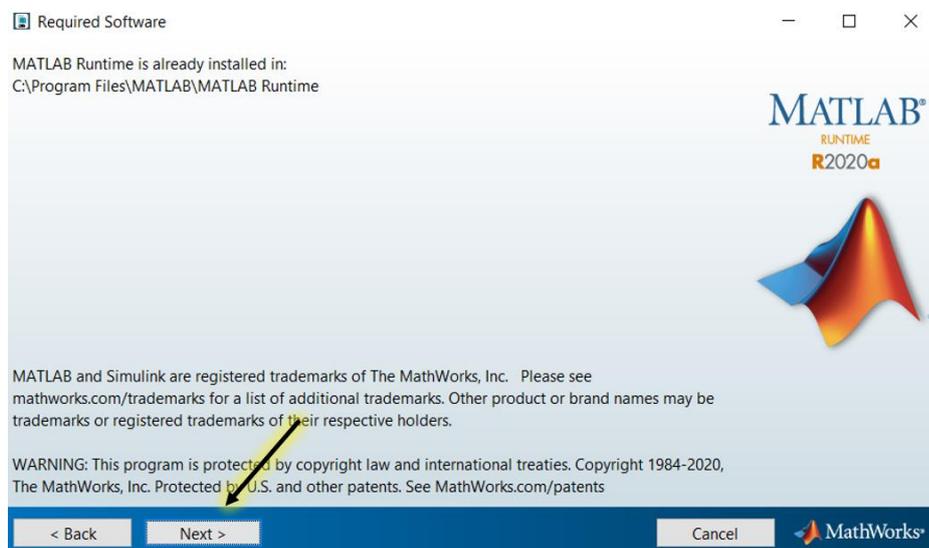
3. Al momento de ejecutarse la aplicación nos abre una ventana que tendrá información acerca de la aplicación y datos personales, para continuar la instalación le damos clic en next.



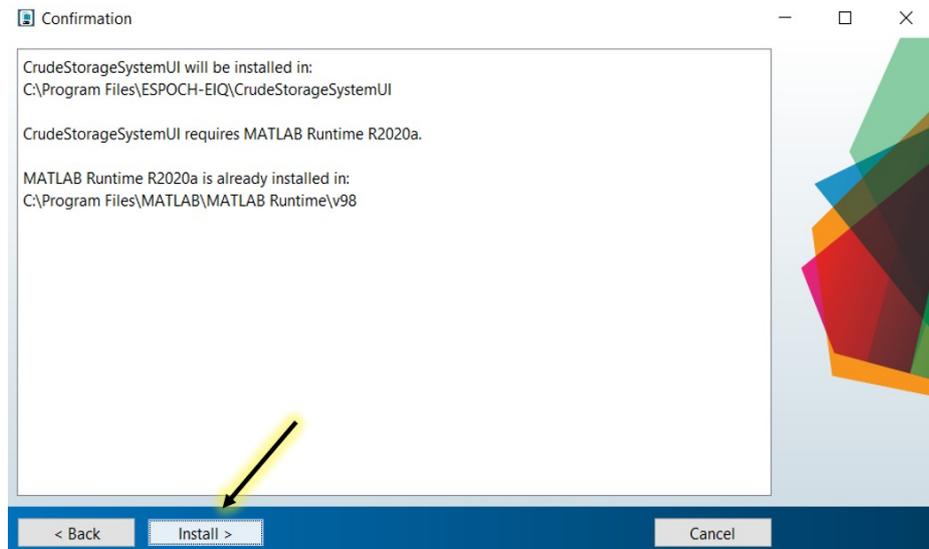
4. En la siguiente ventana nos da la opción de donde se requiere instalar todos los archivos de instalación de la app, la aplicación por defecto se guardará en el disco local C en caso de que no se haya cambiado el destino de los archivos de instalación, adicional a esta tiene un recuadro donde nos permite activar o desactivar la opción para crear un acceso directo al escritorio de nuestro ordenador, para continuar la instalación le damos clic en next.



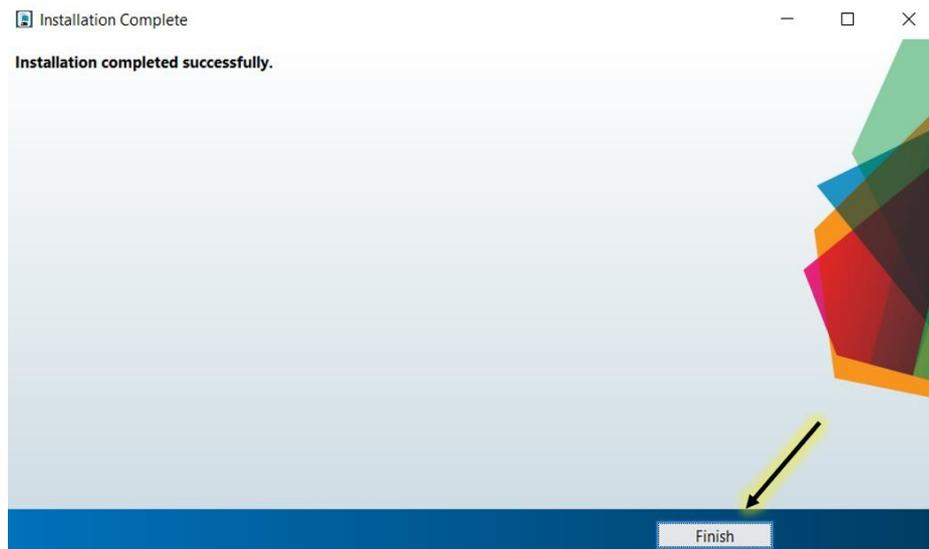
5. La siguiente ventana que nos aparece nos permite instalar el runtime de Matlab, la misma que contiene todas las funcionalidades y librerías que nos permiten ejecutar a la app, el runtime de Matlab de igual forma por defecto se instalara en el disco local C en caso de que no se haya cambiado el destino de los archivos de instalación, para continuar la instalación le damos clic en next.



6. En este paso ya nos muestra la pantalla final con una breve descripción de en qué lugar se instalará la aplicación y el runtime de Matlab, verificamos que estén de acuerdo a los que nosotros pusimos en los anteriores pasos y le damos a next.



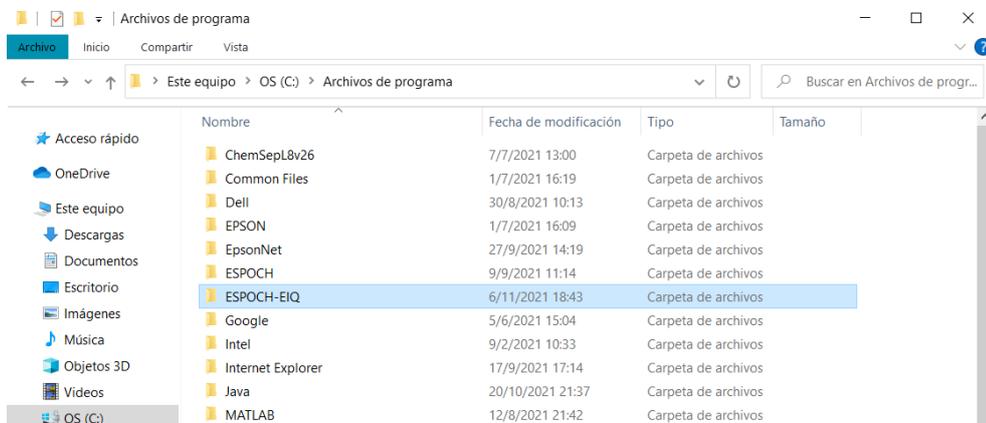
7. Al culminar de la instalación dentro de la ventana nos aparecerá un mensaje en donde nos dicen que la instalación fue exitosa, y le damos clic a finalizar.



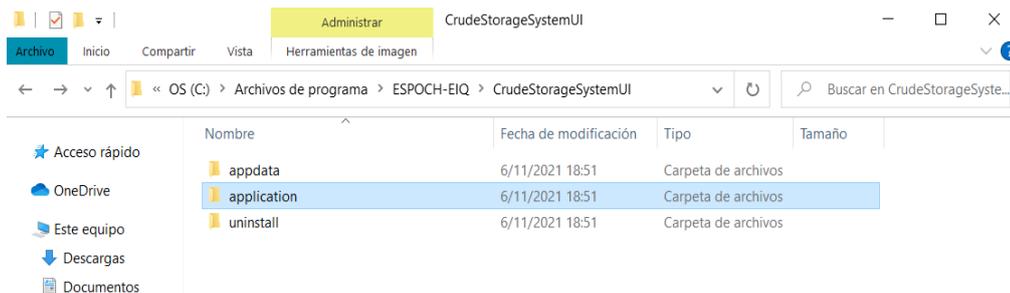
8. Si activamos la ventana de crear un acceso directo vamos a ver que en nuestro escritorio ya tenemos a la App con el siguiente logo, esta se va a abrir al hacer clic sobre el logo.



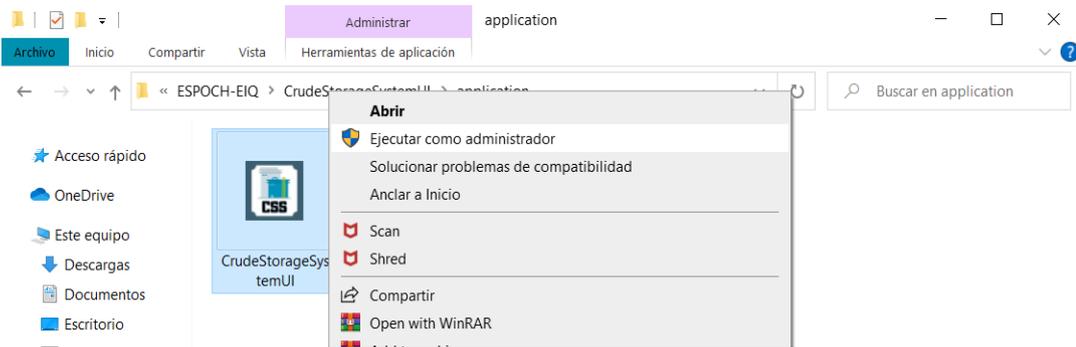
9. Si no le dimos a crear acceso directo al escritorio debemos buscar la app dentro del disco local C en archivos del programa la carpeta que contiene a la app se llama ESPOCH-EIQ a esta carpeta le damos clic.



10. Dentro de la carpeta ESPOCH-EIQ vamos a visualizar una carpeta llamada application, dentro de esta carpeta se encuentra la app por lo cual procedemos a darle clic.



11. En la carpeta application se encuentran cuatro archivos, la aplicación se encuentra con el nombre de StorageSystemUI, le damos clic derecho y la ejecutamos como administrador.



### 3. GUÍA DE USO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Cuando se inicializa la aplicación vamos a encontrar la pantalla de inicio de la interfaz gráfica como se muestra en la siguiente imagen:

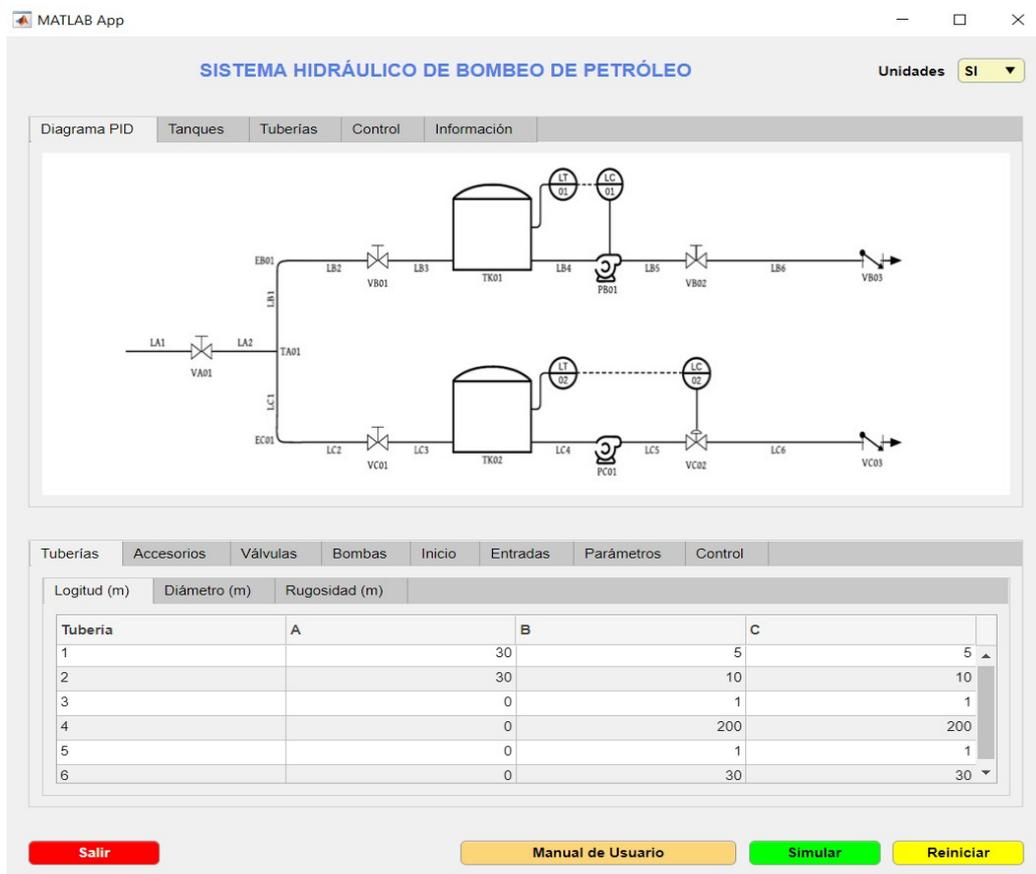


Figura 3-1. Pantalla de Inicio de la Interfaz Gráfica

Dentro de la aplicación existen dos secciones definidas, la sección de resultados que se encuentran en la parte superior y la sección de parámetros que se encuentra en la parte inferior, además de esto tenemos un panel de botones los que se pueden visualizar en la parte inferior de la app.

### 3.1. Sección de Parámetros

Dentro de la sección de parámetros tenemos diferentes ventanas dentro de las cuales se alojan los diferentes parámetros para la simulación del proceso, a continuación, se explicará cada uno de ellos.

#### 3.1.1. Tuberías

Dentro de la ventana de tuberías tenemos tres aspectos importantes que son:

- Longitud

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control
Logitud (m)	Diámetro (m)	Rugosidad (m)					
Tubería	A	B	C				
1		30	5	5			
2		30	10	10			
3		0	1	1			
4		0	200	200			
5		0	1	1			
6		0	30	30			

Dentro de esta ventana vamos a tener los datos de longitud de cada una de las tuberías horizontales que conforman sistema hidráulico de bombeo de petróleo, esta ventana comprende cuatro columnas la primera contiene la numeración de la tubería la segunda los datos del tramo A, la tercera los tramos del lado B y la cuarta los datos del tramo C, en el caso del tramo A solo tenemos dos tuberías por lo cual solo constan dos datos de longitud los demás son 0 ya que no existen más tuberías en el tramo A.

- Diámetro

Logitud (m)		Diámetro (m)		Rugosidad (m)	
Tubería	A	B	C		
1	0.3048	0.3048	0.3048		
2	0.3048	0.3048	0.3048		
3	0	0.3048	0.3048		
4	0	0.4064	0.4064		
5	0	0.4064	0.4064		
6	0	0.4064	0.4064		

Dentro de esta ventana vamos a tener los datos del diámetro de cada una de las tuberías horizontales que conforman sistema hidráulico de bombeo de petróleo, esta ventana comprende cuatro columnas la primera contiene la numeración de la tubería la segunda los datos del tramo A, la tercera los tramos del lado B y la cuarta los datos del tramo C, en el caso del tramo A solo tenemos dos tuberías por lo cual solo constan dos datos de longitud los demás son 0 ya que no existen más tuberías en el tramo A.

- Rugosidad

Logitud (m)		Diámetro (m)		Rugosidad (m)	
Tubería	A	B	C		
1	4.5000e-04	4.5000e-04	4.5000e-04		
2	4.5000e-04	4.5000e-04	4.5000e-04		
3	0	4.5000e-04	4.5000e-04		
4	0	4.5000e-04	4.5000e-04		
5	0	4.5000e-04	4.5000e-04		
6	0	4.5000e-04	4.5000e-04		

Dentro de esta ventana vamos a tener los datos de la rugosidad de cada una de las tuberías horizontales que conforman sistema hidráulico de bombeo de petróleo, esta ventana comprende cuatro columnas la primera contiene la numeración de la tubería la segunda los datos del tramo A, la tercera los tramos del lado B y la cuarta los datos del tramo C, en el caso del tramo A solo tenemos dos tuberías por lo cual solo constan dos datos de longitud los demás son 0 ya que no existen más tuberías en el tramo A.

### 3.1.2. Accesorios

Dentro de los accesorios se tiene los datos del diámetro de los codos, válvulas check y de la unión en T como se puede observar a continuación:

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control
Codos y Válvulas Check				Unión en T			
<b>Parametro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>		<b>Parametro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	
Diámetro CodoB01	0.3048	[m]		Diámetro A	0.3048	[m]	
Diámetro CheckB01	0.4064	[m]		Diámetro B	0.3048	[m]	
Diámetro CodoC01	0.3048	[m]		Diámetro C	0.3048	[m]	
Diámetro CheckC01	0.4064	[m]					

En la ventana izquierda se tiene los datos de los diámetros del codoB01 y la calcula checkB01 para la línea B y los diámetros del codoC01 y la calcula checkC01 para la línea C, en la ventana derecha se tiene los datos del diámetro de la unión en T para el tramo A, B y C.

### 3.1.3. Válvulas

Dentro de la ventana de válvulas se va a tener cada uno de los parámetros de funcionamiento de las válvulas como se muestra a continuación:

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control
<b>Parámetro</b>	<b>VA01</b>	<b>VB01</b>	<b>VB02</b>	<b>VC01</b>	<b>VC02</b>	<b>Unidad</b>	
Diámetro	0.3048	0.3048	0.4064	0.3048	0.4064	[m]	
Factor escala	10.3467	10.3467	17.8608	10.3467	17.8608	[adm]	
Perdida Presión mínima	10000	10000	10000	10000	10000	[Pa]	
Fracción apertura	0	0	0.9900	0	0	[adm]	

En esta ventana se muestran los parámetros de cada una de las válvulas que conforma el sistema, como primer parámetro se tiene al diámetro de cada una de las válvulas, como segundo parámetro se tiene al factor de escala que nos permite escalar al diámetro de válvula que se necesite en el sistema en este caso va a ser 10.3467 para las válvulas de 12'' y 17.8608 para las válvulas de 16'', como tercer parámetro tenemos a la perdida de presión mínima para las válvulas que se obtuvo de catalogo y como parámetro final está la fracción de apertura solo para la válvula VB02 ya que el ya que esta permanecerá a ese porcentaje de apertura, mientras que para la válvula VC02 es 0 ya que a esta válvula se le va a realizar el control y para las válvulas VA01, VB01 y VC01 es 0

ya que este porcentaje de apertura funcionara como una perturbación para el sistema esto se explicara en la ventana de Entradas - válvulas.

### 3.1.4. Bombas

Dentro de los parámetros de las bombas se tiene dos ventanas que muestran los parámetros tanto de la bomba PB01 y PC01, estos se muestran a continuación:

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control																																	
<table border="1"> <caption>Bomba PB01</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diámetro entrada</td> <td>0.4064</td> <td>[m]</td> </tr> <tr> <td>Flujo nominal</td> <td>300</td> <td>[m<sup>3</sup>/h]</td> </tr> <tr> <td>Velocidad ref</td> <td>1450</td> <td>[rpm]</td> </tr> <tr> <td>Factor escala</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>				Parámetro	Valor	Unidad	Diámetro entrada	0.4064	[m]	Flujo nominal	300	[m <sup>3</sup> /h]	Velocidad ref	1450	[rpm]	Factor escala	1	[adm]	<table border="1"> <caption>Bomba PC01</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diámetro entrada</td> <td>0.4064</td> <td>[m]</td> </tr> <tr> <td>Flujo nominal</td> <td>300</td> <td>[m<sup>3</sup>/h]</td> </tr> <tr> <td>Velocidad ref</td> <td>1450</td> <td>[rpm]</td> </tr> <tr> <td>Velocidad</td> <td>1450</td> <td>[rpm]</td> </tr> <tr> <td>Factor escala</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>				Parámetro	Valor	Unidad	Diámetro entrada	0.4064	[m]	Flujo nominal	300	[m <sup>3</sup> /h]	Velocidad ref	1450	[rpm]	Velocidad	1450	[rpm]	Factor escala	1	[adm]
Parámetro	Valor	Unidad																																						
Diámetro entrada	0.4064	[m]																																						
Flujo nominal	300	[m <sup>3</sup> /h]																																						
Velocidad ref	1450	[rpm]																																						
Factor escala	1	[adm]																																						
Parámetro	Valor	Unidad																																						
Diámetro entrada	0.4064	[m]																																						
Flujo nominal	300	[m <sup>3</sup> /h]																																						
Velocidad ref	1450	[rpm]																																						
Velocidad	1450	[rpm]																																						
Factor escala	1	[adm]																																						

En la ventana izquierda se muestran los parámetros de la bomba PB01, el diámetro de la bomba su flujo nominal, la velocidad de referencia del impeller tomado del catálogo y el factor de escala de la bomba este permite escalar el diámetro del impeller, en este caso va a ser 1 ya que se utilizará el mismo diámetro del impeller de la bomba del catálogo, en la ventana derecha se tiene los parámetros de la bomba PC01, el diámetro de la bomba su flujo nominal, la velocidad de referencia del impeller tomado del catálogo la velocidad de funcionamiento y el factor de escala que de igual forma será 1.

### 3.1.5. Inicio

Dentro de esta ventana de inicio se tiene los valores iniciales del nivel del crudo en el tanque TK01 para la línea B y en el tanque TK02 para la línea C como se muestra a continuación:

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control									
<table border="1"> <caption>Condiciones Iniciales</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Un</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nivel liquido TK01</td> <td>0.0100</td> <td>[m]</td> </tr> <tr> <td>Nivel liquido TK02</td> <td>0.0100</td> <td>[m]</td> </tr> </tbody> </table>								Parámetro	Valor	Un	Nivel liquido TK01	0.0100	[m]	Nivel liquido TK02	0.0100	[m]
Parámetro	Valor	Un														
Nivel liquido TK01	0.0100	[m]														
Nivel liquido TK02	0.0100	[m]														

Cabe recalcar que este nivel de líquido del crudo en el tanque de almacenamiento no debe pasar la altura del tanque de almacenamiento que es de 4 m ya que empezaría a tener fallos la app.

### 3.1.6. Entradas

Dentro de estos parámetros se encuentran las principales perturbaciones para el sistema hidráulico de petróleo y está a su vez se dividen en entrada y válvulas como se muestran a continuación:

- **Entrada**

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Entrada</th> <th>Valvulas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <table border="1"> <caption>Caudal de Crudo (qci)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>0.0711</td> <td>[m<sup>3</sup>/s]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>0.0711</td> <td>[m<sup>3</sup>/s]</td> </tr> </tbody> </table> </td> <td> <table border="1"> <caption>Presion de Flujo (pci)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>202650</td> <td>[Pa]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>202650</td> <td>[Pa]</td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table>								Entrada	Valvulas	<table border="1"> <caption>Caudal de Crudo (qci)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>0.0711</td> <td>[m<sup>3</sup>/s]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>0.0711</td> <td>[m<sup>3</sup>/s]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	0.0711	[m <sup>3</sup> /s]	Valor final	0.0711	[m <sup>3</sup> /s]	<table border="1"> <caption>Presion de Flujo (pci)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>202650</td> <td>[Pa]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>202650</td> <td>[Pa]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	202650	[Pa]	Valor final	202650	[Pa]
Entrada	Valvulas																																		
<table border="1"> <caption>Caudal de Crudo (qci)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>0.0711</td> <td>[m<sup>3</sup>/s]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>0.0711</td> <td>[m<sup>3</sup>/s]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	0.0711	[m <sup>3</sup> /s]	Valor final	0.0711	[m <sup>3</sup> /s]	<table border="1"> <caption>Presion de Flujo (pci)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>202650</td> <td>[Pa]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>202650</td> <td>[Pa]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	202650	[Pa]	Valor final	202650	[Pa]										
Parámetro	Valor	Unidad																																	
Tiempo salto	0	[s]																																	
Valor inicial	0.0711	[m <sup>3</sup> /s]																																	
Valor final	0.0711	[m <sup>3</sup> /s]																																	
Parámetro	Valor	Unidad																																	
Tiempo salto	0	[s]																																	
Valor inicial	202650	[Pa]																																	
Valor final	202650	[Pa]																																	

Dentro de la ventana izquierda en el caudal de crudo de ingreso se tienen tres parámetros, el primero el tiempo de salto, este es el tiempo al cual ocurrirá el cambio que haremos y se verá reflejado en las gráficas de resultados, el segundo parámetro es el valor inicial del caudal y como ultimo parámetro al valor final del caudal, en la ventana de la derecha que es la presión del flujo ingreso se tienen tres parámetros, el primero el tiempo de salto, este es el tiempo al cual ocurrirá el cambio que haremos y se verá reflejado en las gráficas de resultados, el segundo parámetro es el valor inicial de la presión y como ultimo parámetro al valor final de la presión.

- **Válvulas**

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Entrada</th> <th>Valvulas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <table border="1"> <caption>Valvula VA01 (vpa01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table> </td> <td> <table border="1"> <caption>Valvula VB01 (vpb01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table> </td> <td> <table border="1"> <caption>Valvula VC01 (vpc01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table>								Entrada	Valvulas	<table border="1"> <caption>Valvula VA01 (vpa01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	1	[adm]	Valor final	1	[adm]	<table border="1"> <caption>Valvula VB01 (vpb01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	1	[adm]	Valor final	1	[adm]	<table border="1"> <caption>Valvula VC01 (vpc01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	1	[adm]	Valor final	1	[adm]
Entrada	Valvulas																																															
<table border="1"> <caption>Valvula VA01 (vpa01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	1	[adm]	Valor final	1	[adm]	<table border="1"> <caption>Valvula VB01 (vpb01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	1	[adm]	Valor final	1	[adm]	<table border="1"> <caption>Valvula VC01 (vpc01)</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tiempo salto</td> <td>0</td> <td>[s]</td> </tr> <tr> <td>Valor inicial</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> <tr> <td>Valor final</td> <td>1</td> <td>[adm]</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Valor	Unidad	Tiempo salto	0	[s]	Valor inicial	1	[adm]	Valor final	1	[adm]										
Parámetro	Valor	Unidad																																														
Tiempo salto	0	[s]																																														
Valor inicial	1	[adm]																																														
Valor final	1	[adm]																																														
Parámetro	Valor	Unidad																																														
Tiempo salto	0	[s]																																														
Valor inicial	1	[adm]																																														
Valor final	1	[adm]																																														
Parámetro	Valor	Unidad																																														
Tiempo salto	0	[s]																																														
Valor inicial	1	[adm]																																														
Valor final	1	[adm]																																														

Dentro de este parámetro podremos cambiar el porcentaje de apertura de las válvulas, se tienen tres ventanas independientes de las válvulas VA01, VB01 y VC01, dentro de cada una de estas ventanas como primer parámetro se encuentra el tiempo de salto donde ocurrirá el cambio que se haga, como segundo parámetro el valor inicial de la apertura de la válvula y como ultimo parámetro el valor final de la apertura de la válvula.

### 3.1.7. *Parámetros*

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control	
Fluido			Tanques			Simulación		
Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	891.7500	[kg/m <sup>3</sup> ]	Diámetro TK01	3	[m]	Tiempo inicial	0	[s]
Viscosidad	0.0208	[Pa*s]	Diámetro TK02	3	[m]	Tiempo final	3600	[s]
Gravedad esp.	0.8922	[adm]				Tamaño de ...	0.0100	[s]

Dentro de parámetros se tienen tres ventanas la primera ventana corresponde a los parámetros del fluido como son la densidad, viscosidad y gravedad específica del crudo de 27,1 °API tomado de bibliografía, en la segunda ventana se obtiene el diámetro estructural de los tanques de almacenamiento TK01 y TK02, y en la ventana final se tiene los parámetros de simulación que son el tiempo inicial, tiempo final y tamaño de paso.

### 3.1.8. *Control*

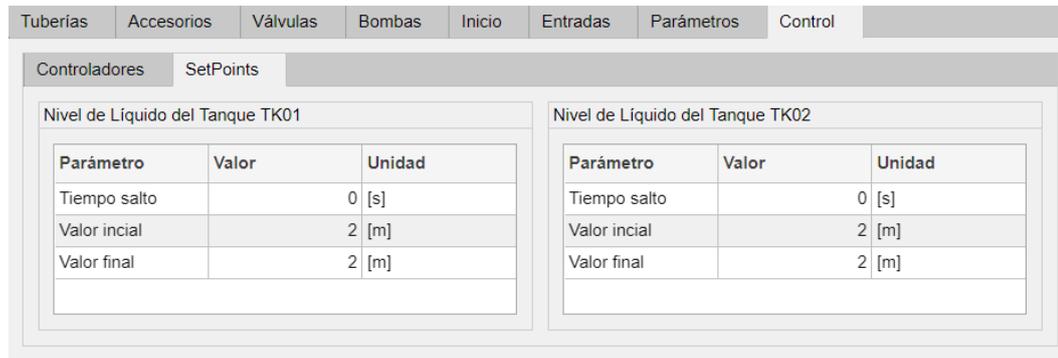
Dentro de control se encuentran los parámetros que afectan al control del nivel de los tanques que son solo controladores y los SetPoints estos se enuncian a continuación:

- Controladores

Tuberías	Accesorios	Válvulas	Bombas	Inicio	Entradas	Parámetros	Control
Controladores		SetPoints					
<b>CONTROL</b>							Caso 1 ▼
PID 1				PID 2			
Parámetro	Valor		Parámetro	Valor			
Kp	-130000	▲	Kp	-10	▲		
Ki	0	▼	Ki	0	▼		

En la parte superior tenemos una pestaña denominada Control en el cual tenemos dos casos diferentes de control denominados Caso 1 y Caso 2 los cuales modifican las ventanas de abajo en donde la primera pertenece al controlador PID1 y la segunda al controlador PID2, dentro de ambos controles se tiene como parámetros al  $k_p$  constante proporcional,  $k_i$  constante integral,  $k_d$  constante diferencial y N el filtro.

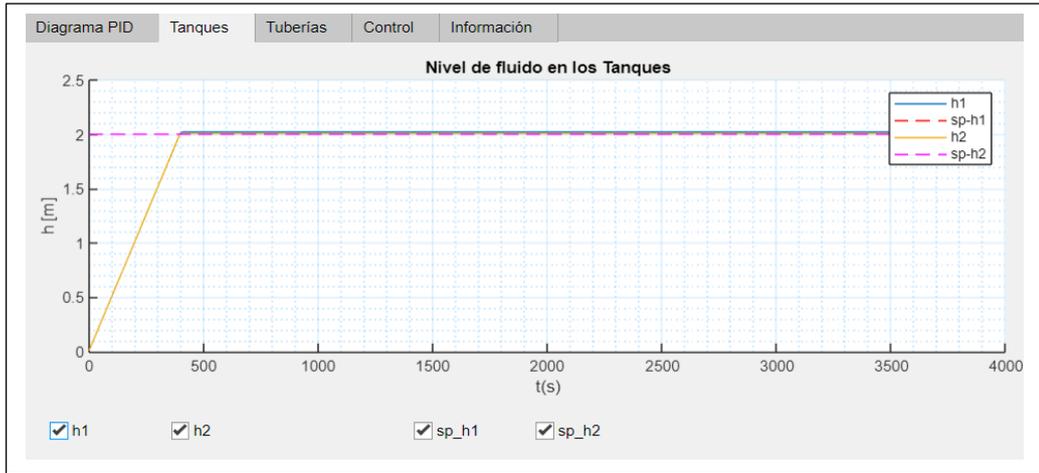
- SetPoints



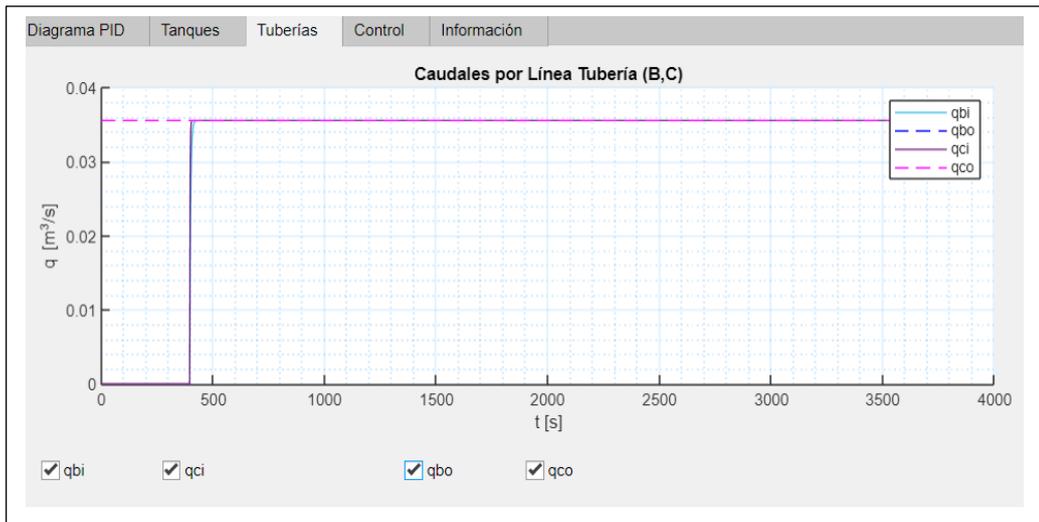
En este apartado dentro de control cuneta con dos ventanas, la ventana izquierda que pertenece al setpoint del tanque TK01 de la línea B, dentro de este se encuentra como parámetros el tiempo de salto donde ocurrirá el cambio el valor inicial del nivel del tanque y el valor final del nivel del tanque TK01 y lo mismo para el tanque TK02 de la línea C, dentro de este se encuentra como parámetros el tiempo de salto donde ocurrirá el cambio el valor inicial del nivel del tanque y el valor final del nivel del tanque TK02.

### 3.2. Sección de Resultados

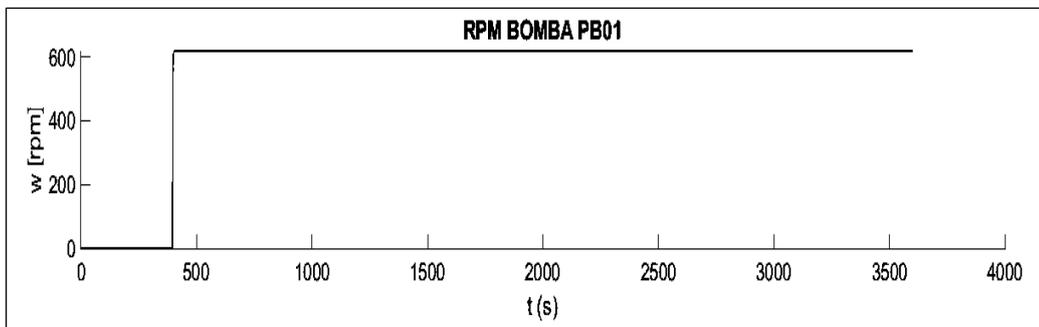
Dentro de este apartado se obtienen las gráficas de resultados del sistema hidráulico de bombeo de petróleo, a continuación, se presentan cada una de estas gráficas, cabe recalcar que cada una de las gráficas a excepción las del control cuentan con Check boxes los que me permiten visualizar o desaparecer las curvas que nosotros vayamos a utilizar.



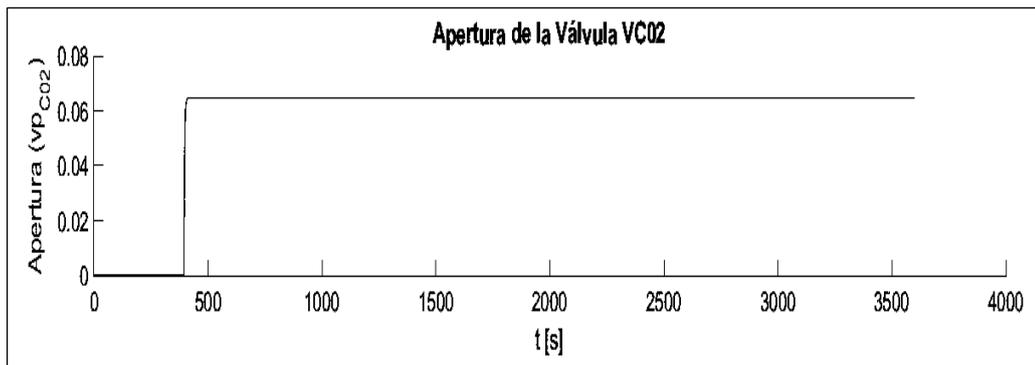
**Figura 3-2.** Gráfica del Nivel de Crudo TK01 y TK02 Caso1



**Figura 3-3.** Gráfica del Caudal de salida de la Línea B y Línea C Caso1



**Figura 3-4.** Gráfica de los RPM de las Bomba PB01 Caso1



**Figura 3-5.** Gráfica del Caudal de salida de la Línea B y Línea C Caso1

**NOTA:** Es muy importante mencionar que la app cuenta con un Drop Down que nos permitirá cambiar las unidades de las gráficas al igual que los resultados, del sistema internacional (SI) al sistema imperial o de campo (IMP) o viceversa.



### 3.3. Panel de Botones

Dentro del panel de botones tenemos cuatro botones que nos permiten ejecutar acciones dentro de la app como lo son el botón de simular, reiniciar la simulación, manual de usuario que nos dirige a un pdf donde está en manual de usuario explicando el funcionamiento o acciones del sistema hidráulico de bombeo de petróleo.



**NOTA:** Es muy importante al momento de iniciar la simulación solo dar un click sobre el botón simular, de manera inmediata el botón pasara de decir simular a simulando.



**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

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

**Fecha de entrega:** 12 / 04 / 2022

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> <i>Gabriel Fernando Garcia Buenano</i>
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> <i>Ciencias</i>
<b>Carrera:</b> <i>Ingeniería Química</i>
<b>Título a optar:</b> <i>Ingeniero Químico</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  
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC,  
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,  
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE  
INFORMACION ECIBCE, l=QUITO,  
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE  
Fecha: 2022.04.12 10:55:56 -05'03'



0659-DBRA-UTP-2022