



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**INGENIERÍA CIVIL EN AUTOMATIZACIÓN**

**Simulación Dinámica del Proceso de Transporte y Almacenaje de Petróleo en el Oleoducto Trasandino Estensoro Pedrals.**

**Autores:**

SERGIO A. ARAVENA SANHUEZA, MARIO I. TORRES GUTIÉRREZ

Seminario para optar al título de Ingeniero Civil en Automatización

Concepción-Chile

Año 2017



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**INGENIERÍA CIVIL EN AUTOMATIZACIÓN**

**“Simulación Dinámica del Proceso de Transporte y Almacenaje de Petróleo en el Oleoducto Trasandino Estenssoro Pedrals”**

**Autores:**

**SERGIO A. ARAVENA SANHUEZA, MARIO I. TORRES GUTIÉRREZ**

Docente Patrocinante

Sr. FRANCO HERNANDEZ CAMPOS

Docente Adjunto o Corrector

Sr. JAIME ROTHEN CARRASCO

Concepción-Chile

Año 2017

## **RESUMEN.**

El desarrollo del presente trabajo de título nace a partir de la modificación que sufrió el Oleoducto Trasandino Estenssoro Pedrals en su proceso de abastecimiento de petróleo crudo desde la provincia de Neuquén, Argentina, hacia las instalaciones dispuestas en la comuna de Hualpén, Chile. Estas modificaciones no fueron registradas con la información y detalles necesarios, dando paso a que el modelo de los elementos que conforman la planta y el comportamiento ante diferentes cambios esté desactualizado, dificultando la posibilidad de realizar un control óptimo sobre el nuevo proceso de operación.

Se propone desarrollar un modelo dinámico del nuevo proceso, en conjunto con los elementos que lo componen, con el objetivo de poder simular situaciones críticas que permitan detectar fallas, realizar modificaciones dentro del proceso y poder analizar la respuesta del sistema.

Para lograr desarrollar un modelo lo más representativo de la planta, se realizará un estudio detallado de la planta para conocer la dinámica de operación, además de hacer un levantamiento de los componentes con el fin de tener la información técnica específica. De este modo se podrá seleccionar un programa adecuado que cumpla con los requisitos y proporcione las herramientas de modelación de sistemas necesarias para desarrollar el modelo dinámico del oleoducto.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	11
1.1 Funcionamiento Original OTEP.....	11
1.2 Descripción del Funcionamiento en la Actualidad.....	12
1.2.1 Descarga de Crudo y Abastecimiento de la Planta.....	12
1.2.2 Ducto Dentro de la Planta.....	13
1.2.3 Almacenamiento.....	14
1.2.4 Alimentación y Descarga.....	15
CAPÍTULO 2: CONOCIMIENTOS PREVIOS A LA APLICACIÓN.....	16
2.1 Definición de Fluido.....	16
2.1.1 Viscosidad.....	17
2.1.2 Viscosidad Dinámica (Absoluta).....	18
2.1.3 Viscosidad Cinemática.....	20
2.1.4 Densidad.....	20
2.1.5 Densidad Relativa.....	20
2.2 Clasificación de un Fluido.....	21
2.2.1 Fluido Newtoniano.....	21
2.2.2 Fluidos No Newtonianos.....	21
2.3 Definición de Flujo.....	22
2.3.1 Flujo Laminar.....	23
2.3.2 Flujo Turbulento.....	24
2.3.3 Número de Reynolds.....	24
2.4 Fenómenos Asociados a la Dinámica.....	25
2.4.1 Presión en un Fluido.....	25
2.4.2 Energía en el Flujo de Fluidos.....	26
2.4.3 Pérdidas de Energía.....	27
2.4.4 Cálculo de las Pérdidas Totales.....	30
2.4.5 Pérdidas en Válvula.....	31

2.4.6 Coeficiente de Descarga. ....	32
2.4.7 Golpe de Ariete. ....	33
2.5 Elementos que Componen el Sistema. ....	35
2.5.1 Ductos. ....	35
2.5.2 Electroválvula. ....	35
2.5.3 Válvulas Manuales. ....	36
2.5.4 Bombas. ....	36
2.5.5 Estanques. ....	37
2.5.6 Petróleo Descargado. ....	38
CAPITULO 3: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN ALLIEVI. ....	39
3.1 Introducción. ....	39
3.2 Fundamento de Cálculo de ALLIEVI. ....	39
3.2.1 Conductos a Presión. ....	39
3.2.2 Cálculo de Régimen Permanente. ....	43
3.3 Elementos de Simulación de ALLIEVI. ....	43
3.3.1 Dibujar Elementos. ....	44
3.3.2 Nudos. ....	45
3.3.3 Depósitos. ....	45
3.3.4 Tubería. ....	47
3.3.5 Estaciones de Bombeo. ....	48
3.3.6 Válvulas de Control de Caudal. ....	51
CAPITULO 4: PROCESO DE VALIDACIÓN. ....	54
4.1 Puntos de Medición. ....	58
4.2 Mediciones Obtenidas. ....	58
4.3 Simulación del Proceso de Recirculación. ....	60
4.4 Resultados Obtenidos de la Simulación. ....	62
4.4.1 Descripción de Perfiles de Operación Válvulas de Regulación y Bomba. ....	62
4.4.2 Análisis de Resultados de la Simulación. ....	64
4.5 Comparación de Resultados. ....	68
CAPITULO 5: SIMULACIÓN DE CASOS PARTICULARES. ....	71
5.1 Cambio de Ubicación de Bombas para la Descarga. ....	71

5.1.1 Resultados de la Migración de la Estación de Bombeo en la Simulación. ....	72
5.2 Cierre Abrupto de Válvula Durante la Descarga. ....	77
CAPITULO 6: CONCLUSIONES. ....	81
6.1 Levantamiento Técnico de la Planta, Estudio de la Dinámica y Teoría Involucrada en el Proceso.....	81
6.2 Selección de Software. ....	81
6.3 Validación y Simulación de Casos Particulares.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura N° 1:"Diagrama de Funcionamiento de la Planta" .....	11
Figura N° 2:" Vista Aérea Ducto 30" Desde Bahía San Vicente al OTEP" .....	12
Figura N° 3:" Área de Extracción del Scrapper" .....	13
Figura N° 4:" Paso Ducto de 30" por Bombas de Carga".....	13
Figura N° 5:"Colector 30 y 12 Pulgadas" .....	14
Figura N° 6:"Descarga de los Estanques" .....	15
Figura N° 7:"Clasificación del Petróleo Según sus Grados API y Gravedad Específica" ..	17
Figura N° 8:" a) sólido, b) sólido dividido en capas, c) sólido sometido a una fuerza" .....	18
Figura N° 9: "Representación del cambio de velocidad de un fluido" .....	19
Figura N° 10:"Relación Lineal para un Fluido Newtoniano" .....	21
Figura N° 11: "Comparación Entre Fluidos" .....	22
Figura N° 12:" Flujo Laminar".....	23
Figura N° 13:" Flujo Turbulento" .....	24
Figura N° 14:"Rugosidad para Tuberías Según su Diámetro" .....	29
Figura N° 15:"Factor de Fricción en Función de la Rugosidad y el Número de Reynolds" 30	
Figura N° 16:"Cierre Abrupto de Válvula en Tubería Recta" .....	33
Figura N° 17:"Vista Estanque T-6020" .....	37
Figura N° 18:"Organización de la Interfaz de ALLIEVI" .....	44
Figura N° 19:"Cuadro de Datos del Depósito" .....	46
Figura N° 20:"Cuadro de Datos Básicos del Depósito" .....	46
Figura N° 21:"Cuadro de Datos Básicos de la Tubería" .....	47
Figura N° 22:"Sección de Pérdidas del Cuadro de Configuración de la Tubería" .....	48
Figura N° 23:"Cálculo de la Inercia y Potencia de la bomba" .....	49
Figura N° 24:"Rendimiento en el Punto Óptimo de Operación de la bomba".....	50
Figura N° 25:"Asistente de Curva por Puntos de la Bomba".....	51
Figura N° 26:"Cuadro de Configuración de Datos Básicos de la Válvula" .....	52
Figura N° 27:"Tabla de Datos de la Maniobra Tabulada" .....	53
Figura N° 28:"Cuadro de Selección de la Maniobra Sinusoidal" .....	54
Figura N° 29: "Válvulas de Regulación y Tomas de Mediciones" .....	55
Figura N° 30:"Interconexión de Líneas".....	56
Figura N° 31:"Bombas de la Red" .....	56
Figura N° 32:"Esquema del Proceso de Recirculación" .....	57
Figura N° 33:"Sección Estanque T-6030" .....	60
Figura N° 34:"Sección de la Bomba y Retorno al Estanque" .....	61
Figura N° 35:"Perfil de Trabajo Válvula MOV-7120".....	62
Figura N° 36:"Perfil de Trabajo Válvula MOV-7110" .....	63
Figura N° 37:"Caudal en la Bomba" .....	63
Figura N° 38:" Apertura MOV-7120 v/s Presión en Salida del Estanque" .....	64
Figura N° 39:"Caída de Presión en Ducto de 30" .....	65

Figura N° 40:"Apertura MOV-7110 v/s Presión de Retorno al Estanque" .....	65
Figura N° 41:"Aumento de Presión Ducto 12" con MOV-7110 al 80%" .....	66
Figura N° 42:" Aumento de Presión Ducto 12" con MOV-7110 al 60% y 40%" .....	66
Figura N° 43:"Gráfica de Presión de Succión y Descarga de la Bomba" .....	67
Figura N° 44:"Gráfica de Presión Registradas desde Sala de Control" .....	68
Figura N° 45:"Nivel de Crudo en el Estanque durante la Descarga" .....	72
Figura N° 46:"Caudal a través de una Bomba" .....	73
Figura N° 47:"Caudal a través de la Estación de Bombeo" .....	73
Figura N° 48:"Variación de Presión en el Ducto de 30" durante la Descarga" .....	74
Figura N° 49: " Variación de Presión en el Ducto de 30" durante la Descarga" .....	74
Figura N° 50:" Potencia en el Eje del Motor de la Estación de Bombeo" .....	75
Figura N° 51: "Perfil de Trabajo MOV-7220" .....	78
Figura N° 52:"Perfil de Trabajo de la Bomba" .....	78
Figura N° 53:"Altura en Estanque T-6030 y Estanque de Descarga" .....	79
Figura N° 54:"Variaciones de Presión en MOV-7220" .....	80
Figura N° 55:"Acercamiento Variaciones de Presión en MOV-7220" .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla N° 1: "Datos Técnicos de los Ductos" .....	35
Tabla N° 2: "Especificaciones de las Válvulas" .....	35
Tabla N° 3: "Características de las Válvulas Manuales" .....	36
Tabla N° 4: "Especificaciones Técnicas de las Bombas" .....	36
Tabla N° 5: "Características Obtenidas por el Fabricante" .....	36
Tabla N° 6: "Datos de los Estanques" .....	37
Tabla N° 7: " API de Crudos Descargados" .....	38
Tabla N° 8: "Elementos de Software para Simulación" .....	44
Tabla N° 9: "Tipos de Depósitos en ALLIEVI" .....	45
Tabla N° 10: "Tipos de Válvulas disponibles en ALIIEVI" .....	51
Tabla N° 11: "Toma de Mediciones en la Bomba" .....	59
Tabla N° 12: "Presiones Obtenidas en los Puntos de Descarga, Retorno y Sala de Control" .....	59
Tabla N° 13: "Comparación de Registros en el Ducto de 30" " .....	68
Tabla N° 14: "Comparación de Registros Ducto 12" " .....	69
Tabla N° 15: "Comparación de Registros en la Succión de la Bomba" .....	69
Tabla N° 16: "Comparación de Registros en la Descarga de la Bomba" .....	69
Tabla N° 17: "Comparación de Registros en la Sala de Control" .....	70
Tabla N° 18: "Parámetros Medidos en Descarga de Crudo LULA" .....	71
Tabla N° 19: "Parámetros de Descarga Medidos en Simulación" .....	75
Tabla N° 20: "Comparación de Parámetros" .....	76

## INTRODUCCIÓN.

Desde sus inicios la simulación asume un rol importante al permitir representar sistemáticamente un sistema, haciendo modificaciones o una serie de pruebas sin la necesidad de experimentar realmente en él.

Ya lo dijo R.E.Shannon en 1976 en su definición de simulación en su libro “System Simulation: The Art and Science” en donde para él “La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema.”

La simulación es ampliamente aplicable a prácticamente todos los ámbitos industriales y científicos donde la ventaja de poder contar con una herramienta que sustituya lo real por lo digital entrega beneficios que se traducen en un potente impulso de competitividad, esto por el motivo de que se profundiza en conocimientos, tales como, sistemas, cálculos de estructuras, mecánica, térmica y fluidos. Además contribuye a la fiabilidad y predictibilidad del comportamiento de un sistema con el correr del tiempo, por intermedio de la evaluación en situaciones críticas. Reduce los tiempos y costos de pruebas que en la realidad son costosas, además del número de ensayos reales para llevar a cabo un proceso o creación de un producto. Optimiza el análisis de riesgos, permite automatizar los procesos industriales y garantiza el cumplimiento de los reglamentos y normas de calidad.

Estos y otros beneficios han posicionado a la simulación como una herramienta indispensable, y que hasta hoy ha evolucionado del tal forma que pasó de ser una simple lógica de eliminación de costos, a un valor agregado de competitividad y calidad.

En el desarrollo del trabajo de título que se presenta a continuación, la base teórica se presenta en los libros de mecánica de fluidos *Frank M. White “Mecánica de fluidos”, sexta edición. Editorial Mc Graw Hill 2008. Giles, Evett, Liu, “Mecánica de los Fluidos e Hidráulica”, McGraw-Hill, 2003. Mott Robert L, “Mecánica de Fluidos”, Pearson, 2006.* Además de los apuntes de mecánica de fluidos del profesor Reinaldo Sánchez.

Para el desarrollo de la simulación, el manual de ALLIEVI nos proporcionó las herramientas, propiedades, características e información necesaria para conocer, configurar y utilizar el programa de forma íntegra y con los mejores resultados.

## CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.

### 1.1 Funcionamiento Original OTEP.

El Oleoducto Trasandino Estenssoro-Pedrals (OTEP) fue diseñado para transportar petróleo desde Argentina hacia Chile, siendo almacenado, llevado a las dependencias de la refinería (ENAP) y enviado los excedentes a la bahía San Vicente para ser exportados.

La producción se realizaba en las instalaciones situadas en la Provincia de Neuquén, en Argentina, donde se extraía la materia prima. El traslado del crudo debía pasar por la Cordillera de los Andes, por lo tanto era necesario impulsar el flujo de crudo para alcanzar la altura de la cordillera mediante la acción de tres estaciones de bombeo. El paso siguiente era reducir la presión con la cual descendía el fluido, proceso que se realizaba en la estación de reducción de presión ubicada antes de la entrada al OTEP. Una vez regulada la presión del crudo, se procedía a su almacenamiento en los estanques en las dependencias del Oleoducto para ser enviados posteriormente a la refinería y a los barcos en la bahía San Vicente para su exportación.

Operando a su máximo caudal se llegó a movilizar 17.000 metros cúbicos diarios, lo que se traduce a 110.000 barriles. Esta condición de operación se mantuvo durante 10 años, sin embargo a partir de los últimos meses del año 2005 el caudal bajó drásticamente a 30.000 barriles, casi un cuarto de la capacidad máxima. Las petroleras argentinas bajaron su producción a un 11%, ya no podían abastecer la demanda chilena debido a que ya no contaban con los excedentes necesarios para exportación, por lo tanto centraron su producción a su abastecimiento interno cancelando el envío de crudo a nuestro país. ENAP ante el cese del suministro tomó los resguardos necesarios, abasteciéndose ahora desde África occidental, Ecuador, Perú y Brasil, dando paso a la actual forma de operación del OTEP.

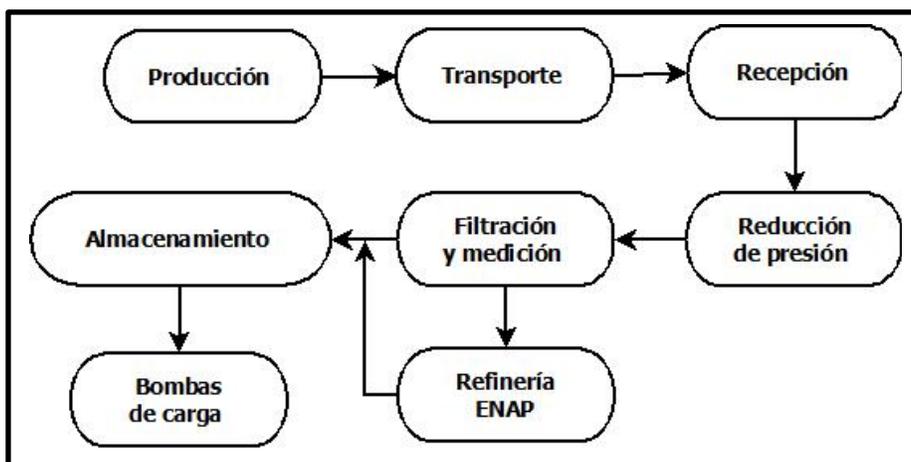


Figura N° 1: "Diagrama de Funcionamiento de la Planta"

## 1.2 Descripción del Funcionamiento en la Actualidad.

A partir del año 2005 y hasta la actualidad, la operación de la planta quedó modificada a la descarga de crudo desde los barcos de abastecimiento que llegan a la bahía San Vicente hacia los estanques de almacenamiento del OTEP ubicados a 7.6Km de la bahía para ser transportado a la refinería.

### 1.2.1 Descarga de Crudo y Abastecimiento de la Planta.

La descarga del crudo se realiza mediante el uso de bombas dispuestas en los barcos que llegan a la bahía con un flujo promedio de 2000 m<sup>3</sup>/h. Estas bombas se conectan a un ducto de 30" de diámetro que las enlaza con las instalaciones de OTEP para realizar la descarga. Al llegar a la planta se encuentra con una comúnmente llamada trampa de conejo, donde se desvía el petróleo para extraer el scrapper (Figura N°3), que cumple con la función exclusiva de realizar mantenimiento, extracción de residuos acumulados y análisis del estado general del ducto. Una vez pasada esta etapa, el ducto de 30" continúa la descarga hacia los estanques de almacenamiento. En el trayecto desde las instalaciones en la bahía hasta la entrada de la planta no existen elementos como válvulas o disminución de diámetro que puedan afectar el flujo con el que llega el crudo.



Figura N° 2:” Vista Aérea Ducto 30” Desde Bahía San Vicente al OTEP”



Figura N° 3: "Área de Extracción del Scrapper"

### 1.2.2 Ducto Dentro de la Planta.

Dentro de la planta, el ducto de 30" como antes se menciona pasa por la trampa de conejo. A continuación existe una bifurcación que tiene tres tomas paralelas de 16", además de la válvula 6300 que permite la descarga directa hacia la refinería. Esta válvula habitualmente se encuentra cerrada por lo que el flujo normal continúa por las tres tomas de 16" que van dirigidas hacia las bombas J-6012, J-6011 y J-6010 las cuales alimentan un "colector" de 30" común para los tres estanques de almacenamiento. La función original de estas bombas era realizar la descarga de los estanques hacia la bahía San Vicente, proceso que ya no se realiza, por consecuencia actualmente estas bombas están operativas pero no son utilizadas debido a que el flujo es generado desde los buques que descargan en la bahía.

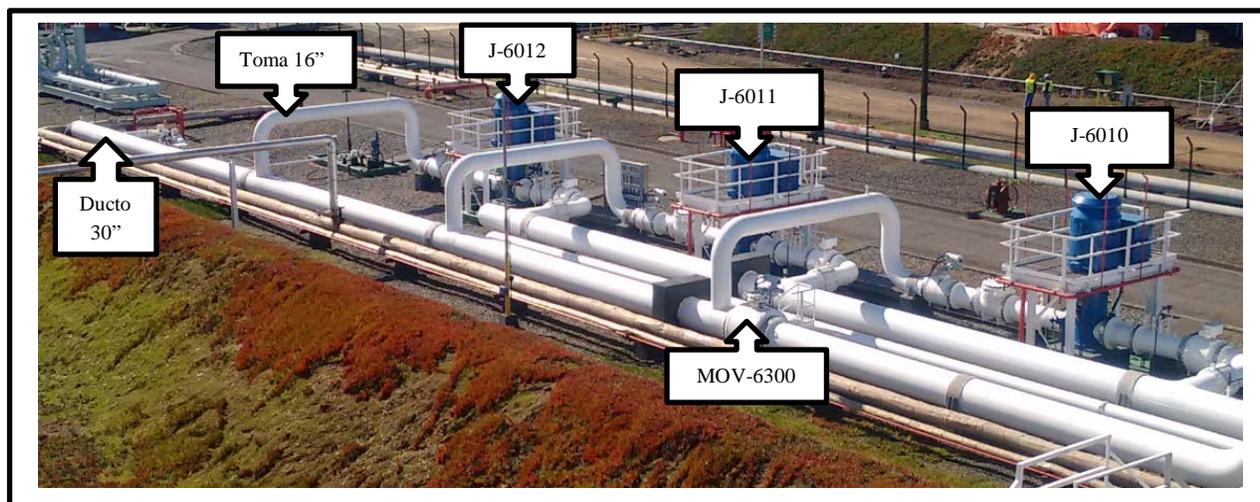
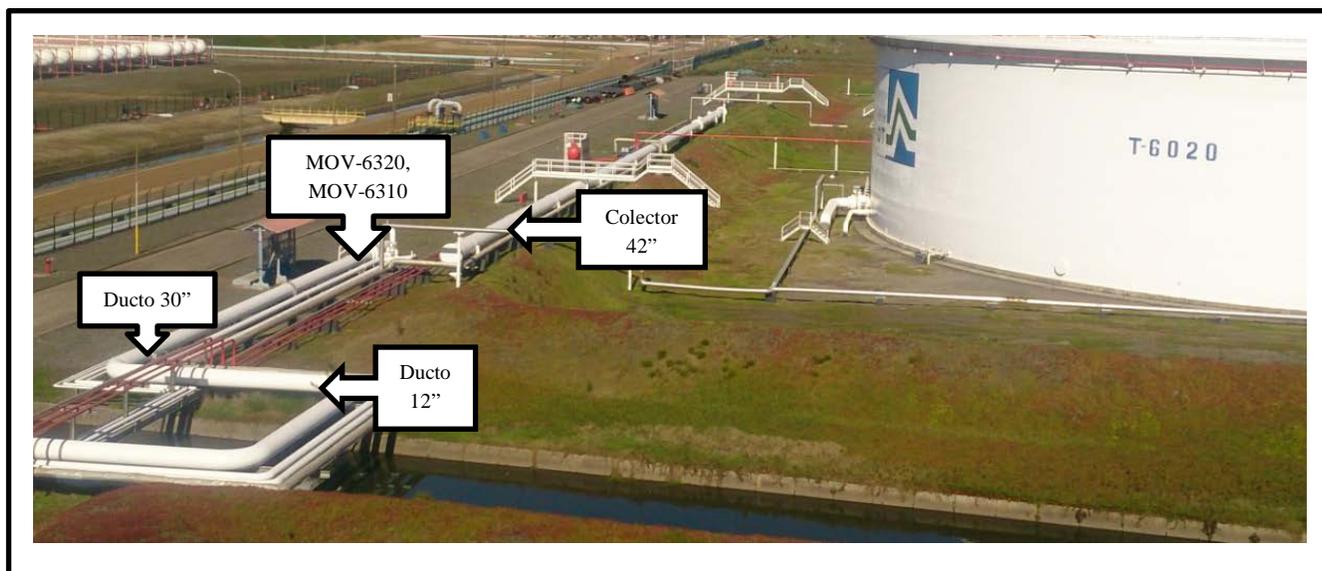


Figura N° 4: "Paso Ducto de 30" por Bombas de Carga"

Del colector de 30" se obtiene la alimentación del estanque T-6010, también alimenta una línea de 42" que abastece a los estanques T-6020 y T-6030, y termina con una salida hacia la refinería que es controlada por la válvula 6320. El colector de 30" puede ser usado tanto para alimentación como descarga de los estanques.

En paralelo al colector de 30" hay una línea de 12" que es controlada por la válvula 6310 encargada de regular el flujo que circula por la línea con la refinería.



*Figura N° 5: " Colector 30 y 12 Pulgadas "*

### 1.2.3 Almacenamiento.

El oleoducto posee tres estanques para el almacenamiento, cada uno con una capacidad de 43.000 m<sup>3</sup> aproximadamente, haciendo un volumen aproximado total de 129.000 m<sup>3</sup> de almacenaje.

Los estanques del oleoducto poseen un techo flotante que se mueve de forma vertical dependiendo del nivel de crudo que posea cada estanque. Los pisos tienen formas cónicas ascendentes y descendentes. Para el caso de tener forma cónica descendente, en el fondo del estanque existe un drenaje de agua, mientras que para la forma cónica ascendente son tres los drenajes de agua que hay en el fondo. El drenaje del agua acumulada en los pisos por la acción de la lluvia se lleva hasta un sumidero, GS-6010, que almacena estas aguas residuales para su posterior tratamiento.

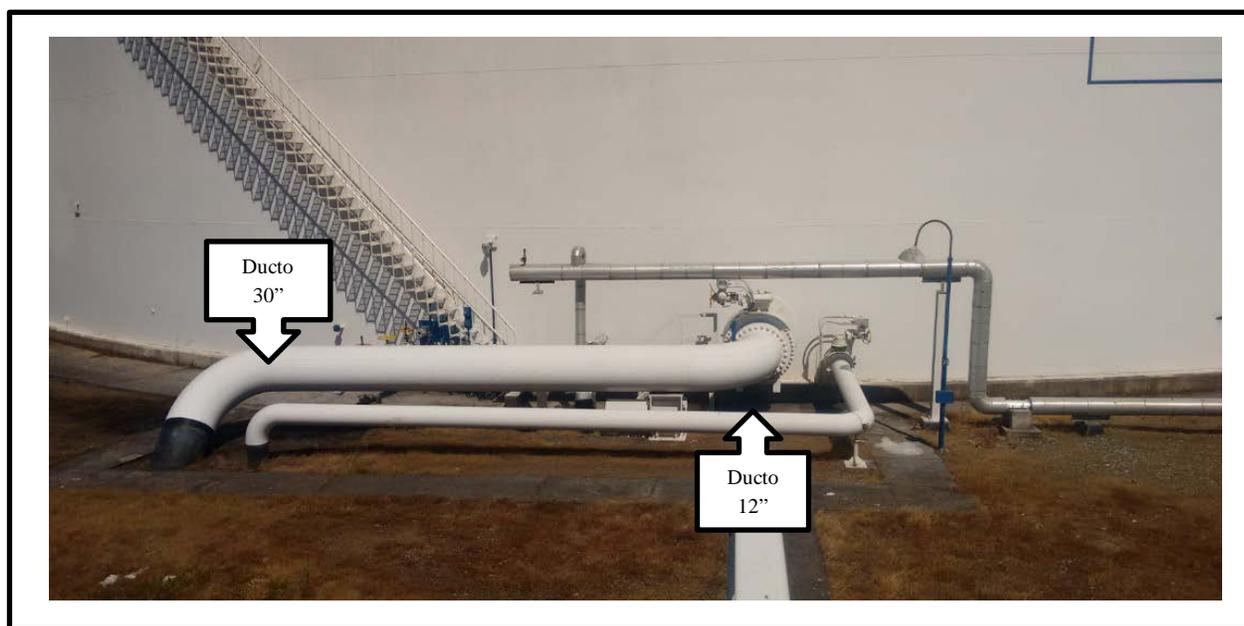
Para mantener bajo condiciones deseadas el crudo, los estanques tienen un sistema de control de temperatura por líneas de flujo de vapor manteniendo la temperatura entre 60°F y 70°F. Los tres estanques tienen cuatro líneas de vapor con sus respectivos sistemas de

condensado. Estos sistemas permiten que la viscosidad del fluido contenido se mantenga regulada, además de estas líneas, los estanques poseen agitadores, los cuales mediante su accionar ayudan a mantener uniforme la temperatura y la homogeneidad del fluido almacenado dentro de los estanques.

#### 1.2.4 Alimentación y Descarga.

Para la alimentación y descarga de cada estanque existen dos líneas bidireccionales dispuestas en paralelo con diámetros de 12" y 30". En un proceso normal es usado el ducto de mayor diámetro, quedando así la línea de 12" reservada como una alternativa de carga y descarga para casos puntuales.

El flujo de cada línea está controlado por válvulas dispuestas a la entrada de cada estanque, cuya acción es controlada por el operador desde la sala de control dependiendo del proceso que se desea realizar.



*Figura N° 6: "Descarga de los Estanques"*

## CAPÍTULO 2: CONOCIMIENTOS PREVIOS A LA APLICACIÓN.

La teoría que será descrita en los siguientes puntos forma parte del conocimiento que se requiere para comprender las diferentes etapas y fenómenos asociados a la operación de la planta, las propiedades que posee el crudo, y cómo se comporta el fluido ante diferentes cambios. Todos estos conocimientos y propiedades permitirán tener ciertas consideraciones al momento de simular la dinámica de la planta.

### 2.1 Definición de Fluido.

El fluido corresponde a la capacidad que tiene una sustancia para fluir, y tienen la propiedad de carecer de rigidez, en consecuencia de esto cede inmediatamente a cualquier fuerza que altere su forma, adoptando así la del recipiente en el cual reside.

Los fluidos se pueden dividir en líquidos y gases. Entre ellos lo que los hace diferentes es que los líquidos pueden ser muy poco comprimidos, además de ocupar un espacio de volumen definido dentro de un recipiente, en cambio los gases son compresibles y se expanden con tal de ocupar todo el recipiente que lo contenga.

En el desarrollo de este seminario de título se trabaja con petróleo crudo que es la materia prima de la industria de Refinación del Petróleo. La calidad de un crudo se especifica a través de una serie de propiedades como su densidad, contenido en azufre y curva de destilación. Al conocer estas propiedades se pueden diferenciar en “tipos de crudos”, en términos de ligero o pesado según el valor de grado API. Índices superiores a 10 implican que son más livianos que el agua y por lo tanto flotarían en esta, así mientras mayor sea su valor significa que es más liviano. La gravedad API se mide con un instrumento llamado hidrómetro.

La fórmula inferida y usada para determinar el grado API es la siguiente:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{GE} - 131,5 \text{ a } 60^{\circ}F$$

Donde

*GE: gravedad específica*

La representación gráfica de la fórmula anterior se muestra a continuación, identificando los tipos de crudos que existen de acuerdo a los rangos de valores comúnmente utilizados.

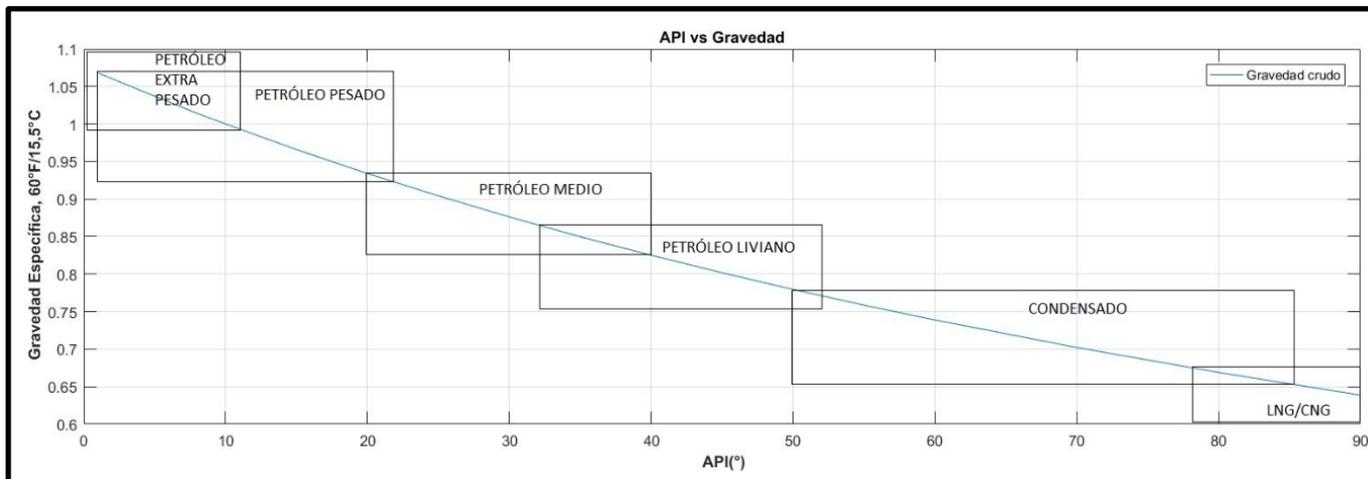


Figura N° 7: "Clasificación del Petróleo Según sus Grados API y Gravedad Específica"

El comportamiento y características del fluido están definidos por sus propiedades, donde las más importantes son descritas a continuación.

### 2.1.1 Viscosidad.

La viscosidad es una propiedad física de los fluidos y es una medida de su resistencia a las deformaciones y a su movimiento debido a las colisiones entre sus partículas, que se mueven a velocidades diferentes. Cuando el fluido está en reposo adopta una forma en la que no actúan las fuerzas tangenciales, por lo tanto la viscosidad solo se presenta en fluidos en movimiento y depende en gran medida de la temperatura que presente el fluido.

Para entender de mejor forma esta propiedad nos damos el siguiente ejemplo.

Imaginemos un bloque sólido (a), este es dividido en delgadas capas una sobre la otra (b) y es sometido a una fuerza tangencial (ver Figura N° 8). El material sólido tiende a deformarse en mayor medida mientras menor sea su rigidez (Resistencia que tiene un cuerpo a deformarse), esto se ve traducido en el desplazamiento de las capas con respecto a sus capas adyacentes:

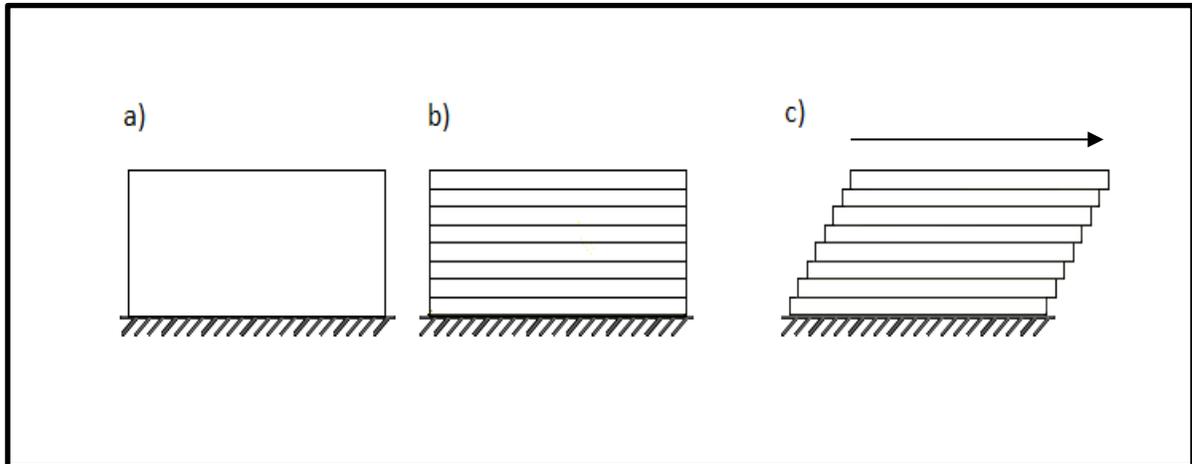


Figura N° 8: " a) sólido, b) sólido dividido en capas, c) sólido sometido a una fuerza"

En los líquidos, el rozamiento presente entre las capas adyacentes se denomina viscosidad, en el caso del petróleo esta es una característica muy importante que controla el fluido del mismo a través de las tuberías, y se entiende como la resistencia interna que ofrece el petróleo para moverse. Esta propiedad depende fuertemente de las condiciones de temperatura y presión a la cual está sometido el crudo.

La viscosidad se puede determinar en laboratorio con un elemento llamado viscosímetro, midiendo el tiempo que el crudo tarda en descender en condiciones de gravedad a través de una restricción calibrada a dos temperaturas diferentes, este ensayo se llama Test of Determination of Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids. Existen correlaciones gráficas viscosidad-temperatura que permiten conocer la viscosidad de un líquido a una temperatura cualquiera a partir de los datos de dos temperaturas diferentes.

### 2.1.2 Viscosidad Dinámica (Absoluta).

Se define al esfuerzo cortante (o tensión cortante) como la fuerza que se requiere para que una unidad de área se deslice sobre otra. A medida que un fluido entra en movimiento, este desarrolla un esfuerzo cortante cuya magnitud depende de la viscosidad del fluido, esta fuerza dividida por unidad de área es directamente proporcional al cambio de velocidad entre las diferentes posiciones del fluido.

Lo descrito anteriormente es conocido como la ley de Newton de la viscosidad, la cual establece que para ciertos fluidos el esfuerzo cortante sobre una interfaz tangente a la dirección del flujo es proporcional a la tasa de cambio de la velocidad con respecto a la distancia, donde la diferenciación se toma en una dirección normal a la interfaz.

Con el objetivo de explicar mejor esta ley, en la siguiente figura se muestra el concepto de cambio de velocidad en un fluido en la que se tiene una delgada capa de fluido entre dos superficies donde una está en movimiento con una velocidad  $v$  y la otra estacionaria. La parte del fluido que está en contacto con la superficie en movimiento tiene la misma velocidad que esta, y la parte del fluido que está en contacto con la superficie estacionaria se encuentra en la misma condición. Si la distancia entre las dos superficies es pequeña entonces la tasa de cambio de la velocidad con posición es lineal.

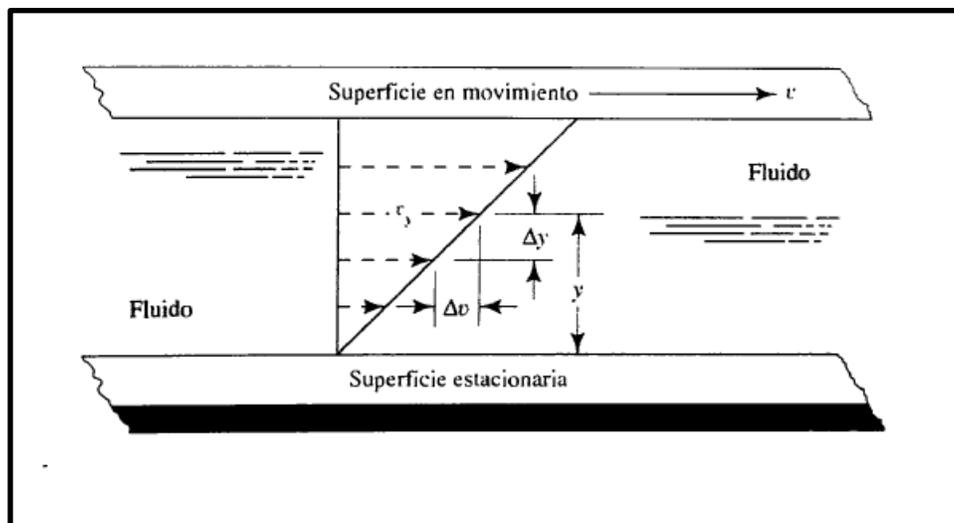


Figura N° 9: “Representación del cambio de velocidad de un fluido”

Esta ley queda enunciada matemáticamente de la siguiente forma:

$$\tau = \mu(\Delta r/\Delta y)$$

Donde  $\mu$  es la constante de proporcionalidad y  $\Delta r/\Delta y$  es el gradiente de velocidad que representa una medida de cambio de velocidad en función de la distancia.

La forma transpuesta de la ecuación anterior sirve para definir la constante de proporcionalidad:

$$\mu = \tau/(\Delta r/\Delta y)$$

Esta constante se conoce como la viscosidad dinámica del fluido y es medida por el tiempo que tarda en fluir un fluido a través de un tubo capilar a una determinada temperatura. Sus unidades son el Poise o Centipoise cuyas dimensiones en el SI son fuerza sobre unidad de área partido por el gradiente de velocidad ( $Kg/(m * seg)$ ).

### 2.1.3 Viscosidad Cinemática

La Viscosidad cinemática se denomina así porque la fuerza no está involucrada en las dimensiones, quedando únicamente la longitud y el tiempo, como en cinemática. Representa la característica propia del fluido obteniéndose a través del cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del fluido en cuestión, y se define como:

$$v = \mu / \rho$$

Debido a que  $\mu$  y  $\rho$  son propiedades del fluido, la viscosidad cinemática también es una propiedad. Se mide habitualmente en  $m^2/seg$  en el SI. También se utilizaban las unidades  $cm^2/seg$  conocido como Stoke.

### 2.1.4 Densidad.

La densidad de un fluido es la cantidad de masa por unidad de volumen por lo que entre más masa tenga un cuerpo en un mismo volumen mayor será su densidad. La diferencia de densidad entre los líquidos puede impedir que se mezclen homogéneamente. Se identifica con la letra griega  $\rho$  (Rho) y se define mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

La unidad de densidad en el sistema internacional es  $kg/m^3$ .

### 2.1.5 Densidad Relativa.

También llamada gravedad específica y se refiere a la relación adimensional entre el peso específico (cantidad de peso por unidad de volumen) del volumen de un fluido y el peso específico del mismo volumen de otro fluido que se toma como referencia. En los líquidos el fluido que se toma como referencia es el agua a 20°C. En la industria petrolera se utiliza como referencia el agua a 15.6°C (60°F), aunque hace poca diferencia en el análisis.

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$$

Con:

$\rho_r =$  Densidad relativa

$\rho =$  Densidad absoluta

$\rho_0 =$  Densidad de referencia

## 2.2 Clasificación de un Fluido.

De acuerdo a su comportamiento, los fluidos se pueden clasificar de la siguiente forma.

### 2.2.1 Fluido Newtoniano

A cualquier fluido que se comporte de acuerdo a la ley de Newton de la viscosidad se le denomina fluido newtoniano, donde la tensión cortante es directamente proporcional a la deformación del fluido dando una curva de relación lineal (Figura N°10). Es decir, su viscosidad solamente varía si se perciben cambios de temperatura o presión.

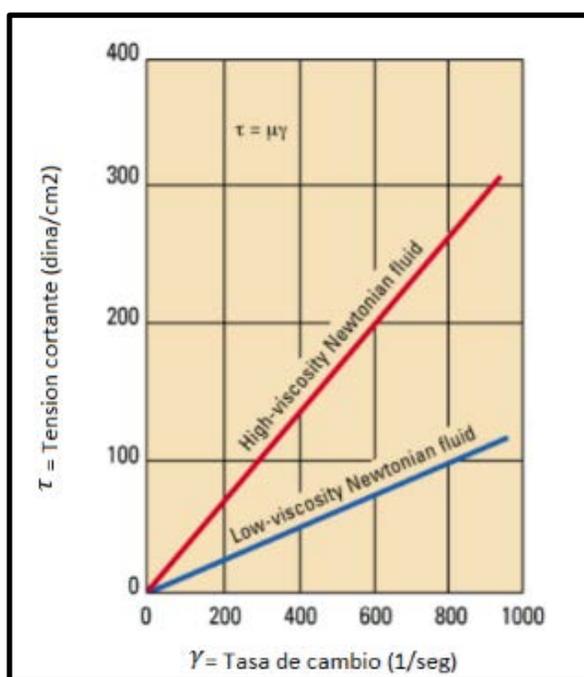


Figura N° 10: "Relación Lineal para un Fluido Newtoniano"

### 2.2.2 Fluidos No Newtonianos.

Este es un tipo de fluido muy práctico y cuya viscosidad varía de acuerdo al gradiente de tensión que se le aplique, esto quiere decir que este tipo de fluido se deforma en la dirección de la fuerza aplicada. El resultado de esto es que su valor de viscosidad no es definido.

La siguiente figura muestra la comparación de tres tipos de fluidos con uno newtoniano.

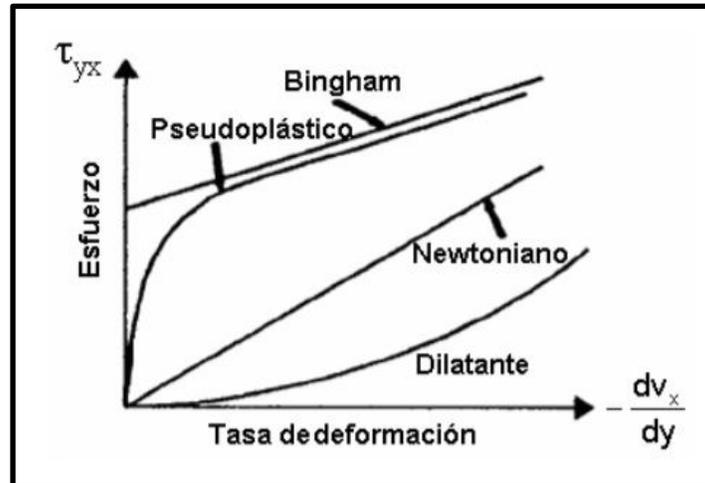


Figura N° 11: “Comparación Entre Fluidos”

De la figura se observa que los fluidos no Newtonianos no describen un comportamiento lineal, debido a que su viscosidad de una forma u otra varía. Por ejemplo, los fluidos Dilatantes son aquellos en los que la viscosidad aumenta cuando el gradiente de deformación ( $dv_x/dy$ ) aumenta, por lo tanto se produce un aumento en la tensión o esfuerzo cortante ( $\tau_{yx}$ ). Por el contrario los fluidos Pseudoplásticos son aquellos en los que la viscosidad disminuye cuando el gradiente de deformación aumenta.

Finalmente los fluidos Bingham son aquellos en que la relación tensión cortante y gradiente de deformación es lineal, pero para esfuerzos de corte pequeños se comportan como sólidos, presentando características elásticas y únicamente por el incremento de la tensión de corte hasta un cierto valor el sistema fluye, denominándose fluidos con esfuerzo de corte inicial.

### 2.3 Definición de Flujo.

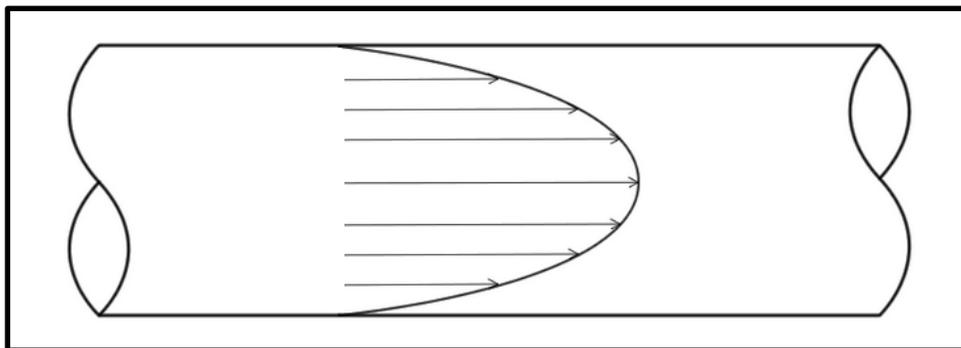
El flujo se define como el movimiento de un fluido con velocidad constante respecto a un sistema de referencia inercial. Es un fenómeno complejo, ya que puede ser unidimensional, bidireccional, o tridimensional y depende del tiempo. Las partículas en el fluido pueden tener diferentes velocidades y estar sujetas a diferentes aceleraciones, donde siguen trayectorias definidas que se denominan líneas de corriente, las que corresponden a líneas continuas trazadas a través de un fluido que siguen la dirección del vector de velocidad en cada punto. Existen diferentes métodos para medir el flujo, y la selección de alguno de ellos va a depender de diversos factores, como la exactitud de la medición, el tipo de fluido, las condiciones y espacio físico disponible, costos, entre otras más. Uno de los métodos utilizados es la medición por diferencia de presión. Consiste en utilizar dispositivos que originen una presión diferencial debido al paso del fluido por una restricción. El motivo de

realizar esta diferencia de presión, es que el caudal es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presiones entre dos puntos, antes y después de la restricción. Otro método es mediante el uso de medidores magnéticos. Se inserta un tubo aislado eléctricamente con un par de electrodos en ambos lados del tubo y rasante al fluido. Unas bobinas eléctricas generarán un campo magnético en un plano perpendicular. El voltaje obtenido en el eje será proporcional al flujo. Los medidores de flujo total forman parte de otro método de medición, denominados medidores de desplazamiento positivo, en donde separan la corriente de flujo en incrementos volumétricos individuales y cuentan dichos incrementos, los que representan de una forma muy aproximada el volumen total que pasa a través del medidor.

Por lo general el flujo medido se representa en metro cúbico por segundos ( $m^3/s$ ), o bien en pie cubico por segundo ( $cu ft/s$ ). Para el caso específico del oleoducto trasandino Estenssoro Pedrals, la unidad de medida utilizada es metro cúbico por hora ( $m^3/h$ ).

### 2.3.1 Flujo Laminar.

Corresponde a una de las dos formas principales en las cuales un fluido puede fluir. En el flujo laminar el movimiento del fluido es en forma de láminas paralelas (de acá su nombre), efecto producido por el movimiento suave y ordenado de cada una de las partículas que conforman al fluido, sin que se produzca una mezcla entre ellas.



*Figura N° 12: "Flujo Laminar"*

El flujo laminar se da para los tipos de fluidos que se mueven a bajas velocidades o que sean de viscosidades altas.

### 2.3.2 Flujo Turbulento.

Describe la segunda forma en la que se puede presentar un fluido durante una trayectoria y tiene la característica de que el fluido presenta movimientos caóticos, esto quiere decir que las partículas que conforman al fluido se mueven de forma desordenada y en todas las direcciones formando pequeños remolinos periódicos y por ende es imposible conocer la trayectoria de alguna de ellas.

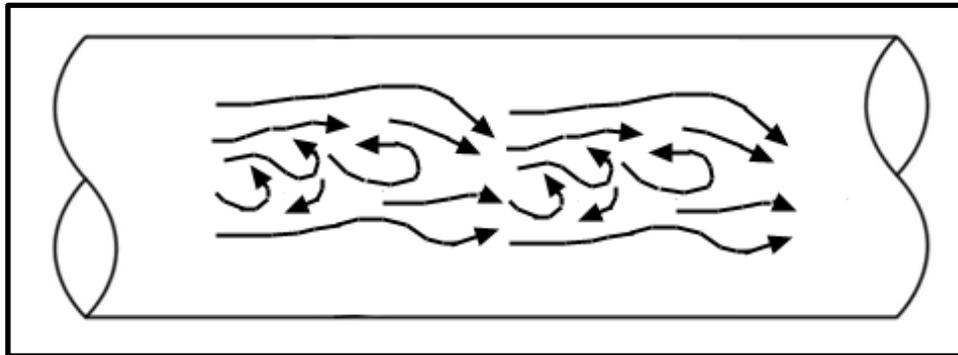


Figura N° 13: "Flujo Turbulento"

### 2.3.3 Número de Reynolds.

Para poder predecir el comportamiento que tiene un fluido, ya sea laminar o turbulento sin tener que observarlo, más aún, cuando este fluye por tubos opacos los que imposibilitan la visualización del mismo, se utiliza el número de Reynolds. En una tubería circular recta, las variables densidad del fluido  $\rho$ , viscosidad  $\mu$ , diámetro del tubo  $D$ , y la velocidad promedio del flujo  $V$  son las que caracterizan a un tipo de fluido. El número de Reynolds relaciona todas estas variables mediante la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

Donde:

$V$  = Velocidad media  $m/s$ .

$D$  = Diámetro de la tubería en  $m$ .

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido en  $m^2/s$ .

$\rho$  = Densidad del fluido en  $Kg/m^3$ .

$\mu$  = Viscosidad absoluta en  $Ns/m^2$ .

Para la identificación del flujo, si este tiene un número de Reynolds menor o igual a 2100, este se comportará como un flujo laminar. Si posee un valor de Reynolds mayor o igual a

10000 el flujo será turbulento. Existe también un rango de valores entre los flujos laminar y turbulento ( $2100 \leq Re \leq 10000$ ) en el que el flujo pierde estabilidad produciéndose pequeñas ondulaciones que varían en el tiempo. Para estos valores el flujo pasa a estar en un estado de transición.

En una descarga normal en el oleoducto se tiene un promedio de flujo de  $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ , es decir una velocidad media de  $1,217 \text{ m/s}$ , con este dato más los valores de viscosidad cinemática del crudo tipo LULA que es  $4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , y el diámetro del ducto de 30 pulgadas, que en metros sería  $0,762 \text{ m}$ , calculamos el número de Reynolds para identificar el tipo de flujo que se presentaría en esta descarga.

$$Re = \frac{1,217 \times 0,762}{4 \times 10^{-6}} = 231.838,5$$

Se obtiene un valor de número de Reynolds elevado, esto nos dice que el comportamiento del flujo es turbulento.

## 2.4 Fenómenos Asociados a la Dinámica.

Dentro del proceso del Oleoducto surgen una serie de fenómenos de acuerdo a la dinámica que presenta, además de los que se perciben al momento en que el crudo interactúa con los componentes que conforman el proceso, como tuberías, válvulas, entre otros. Estos fenómenos son necesarios analizar y tener en consideración al momento de realizar la simulación, con el fin de favorecer el correcto funcionamiento y modificaciones que se quieran incorporar.

### 2.4.1 Presión en un Fluido.

Se define presión como la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área, cuando la fuerza está uniformemente distribuida sobre la superficie, se define mediante la siguiente ecuación:

$$p = \frac{F}{A}$$

Se mide comúnmente en Pascal ( $Pa$ ), que equivale a 1 newton por cada metro cuadrado ( $N/m^2$ ). El pascal es una unidad muy pequeña en comparación con los valores habituales de presión y es por esto que se utilizan otras unidades como el bar o la atmósfera, donde:

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ bar} = 0,986823 \text{ atm}$$

La presión de un fluido contenido en un recipiente se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y actúa en dirección perpendicular a las paredes del recipiente en cada uno de sus puntos. La magnitud de la presión aumenta con la profundidad, por lo que la máxima presión se produce en el fondo del recipiente y es un factor que se debe considerar al momento de diseñar un sistema con fluidos. La medición de la presión es realizada con el instrumento llamado manómetro y esta medición puede ser manométrica (por sobre la presión atmosférica) o absoluta (presión atmosférica más la presión manométrica).

#### 2.4.2 Energía en el Flujo de Fluidos.

La energía se define como la capacidad para realizar trabajo. Los fluidos en movimiento poseen energía y en el flujo de fluidos, la energía se presenta en tres formas distintas: potencial, cinética y energía de presión y cada una se considera por separado.

La energía potencial ( $PE$ ) se refiere a la energía que posee el elemento de fluido debido a su elevación respecto a una cota de referencia. Viene determinada cuantitativamente por el producto del peso ( $W$ ) del elemento por la distancia vertical de éste a la cota de referencia ( $z$ ).

$$PE = Wz$$

La energía cinética  $KE$  se refiere a la energía que posee el elemento de fluido debido a su velocidad. Viene determinada cuantitativamente por el producto de la masa ( $m$ ) del elemento por el cuadrado de su velocidad ( $V$ ) dividido por dos. La masa ( $m$ ) puede ser sustituida por el peso ( $W$ ) dividido por la aceleración de gravedad ( $g$ ).

$$KE = \left(\frac{1}{2}\right)mV^2 = \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{WV^2}{g}\right)$$

La energía de presión, llamada algunas veces energía del flujo, es la cantidad de trabajo que se requiere para forzar al fluido a moverse a través de cierta distancia contra la presión. La energía de presión ( $FE$ ) se puede calcular determinando el trabajo necesario para mover el elemento de fluido una distancia igual a la longitud del segmento recorrido ( $d$ ). La fuerza que realiza el trabajo es igual al producto de la presión ( $p$ ) por el área de la sección recta ( $A$ ) del elemento.

$$FE = pAd$$

El término  $Ad$  es el volumen del elemento de fluido y puede reemplazarse por  $W/\gamma$ , con  $\gamma$  el peso específico del fluido, quedando así:

$$FE = p \frac{W}{\gamma}$$

La energía total ( $E$ ) es la suma de todas las energías, es decir:

$$E = Wz + \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{WV^2}{g}\right) + p \frac{W}{\gamma}$$

Esta expresión se puede modificar para representar la energía total como “altura de carga” ( $H$ ), dividiendo todos los términos de la ecuación por el peso del fluido, quedando expresado en unidades de longitud ( $m$ ), como se muestra a continuación:

$$H = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma}$$

El término  $z$  se llama cota topográfica,  $V^2/2g$  Se conoce como la altura de velocidad y  $p/\gamma$  como altura de presión.

### 2.4.3 Pérdidas de Energía.

El flujo de un fluido en una tubería viene acompañado de una pérdida de energía dinámica o también llamada perdida de carga. Se puede dar por razones de fricción o por la obstrucción en la trayectoria del flujo, al presentarse diferentes componentes como válvulas, codos, reductores de diámetro, entre otros.

La ecuación de Darcy permite calcular las pérdidas de energías que se dan debido a la fricción y es efectiva para flujos laminares y turbulentos como los que ya se han mencionado.

La forma matemática de la ecuación de Darcy es la siguiente:

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{\rho v^2}{2}$$

Donde

$h_L$ : Pérdida de energía debido a la fricción.

$L$ : Longitud de la corriente de flujo.

$D$ : Diámetro de la tubería.

$v$ : Velocidad promedio del flujo.

$f$ : Factor de fricción.

$\rho$  : Densidad del fluido.

Para los fluidos laminares ( $Re < 2100$ ), el factor de fricción solo queda determinado en función del número de Reynolds.

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{Dv\rho}$$

En el caso de los fluidos turbulentos, el factor de fricción es una función de la rugosidad relativa de la tubería y el número de Reynolds, cuyo valor se encuentra tabulado.

$$f = f(Re, \varepsilon/D)$$

Donde:

-  $\varepsilon/D$  : Corresponde al coeficiente de rugosidad de la tubería. Está normalizado según el tipo de tubería.

Dependiendo del diámetro que tenga una tubería, es posible determinar su rugosidad relativa a partir del siguiente diagrama.

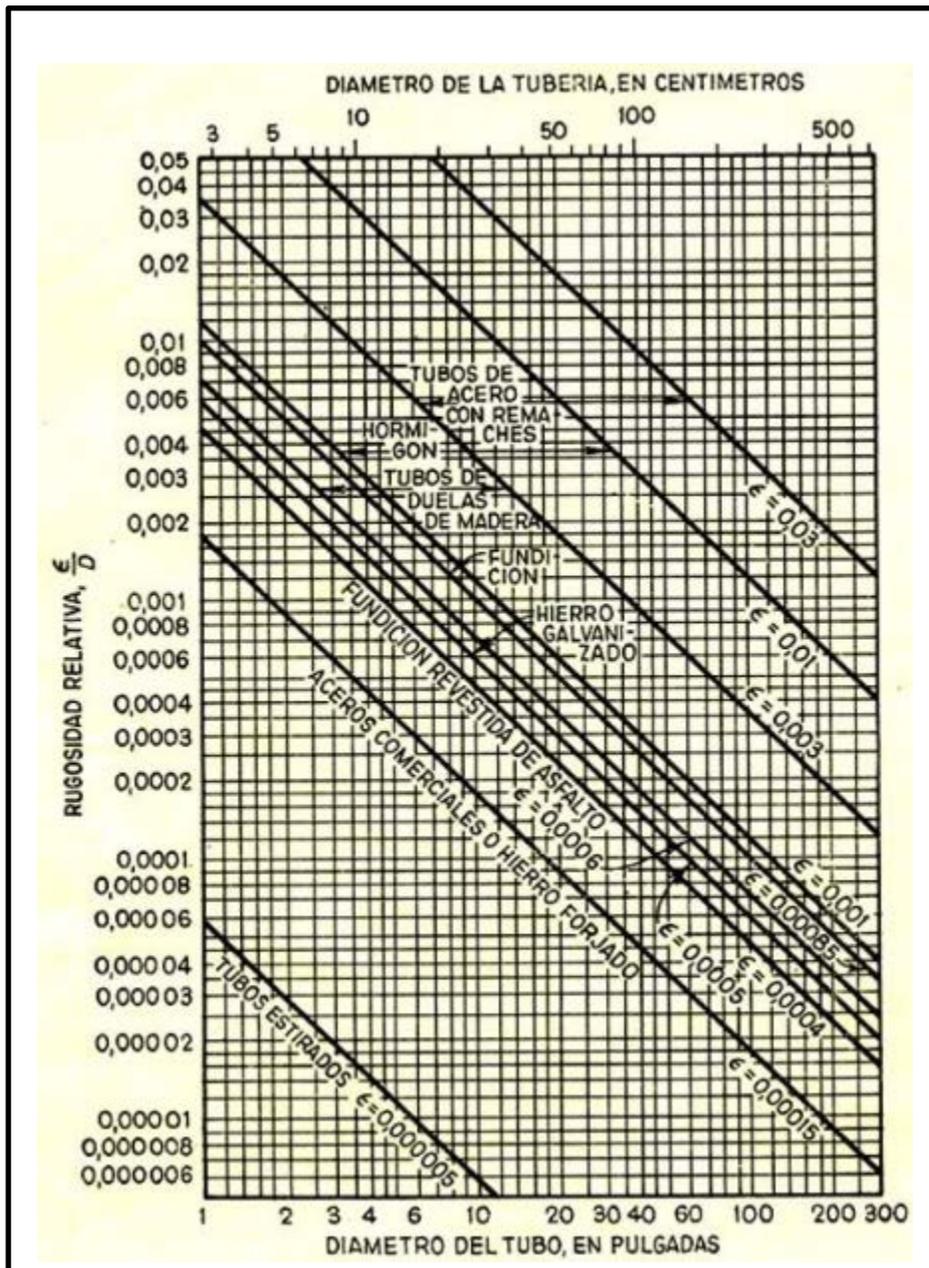


Figura N° 14: "Rugosidad para Tuberías Según su Diámetro"

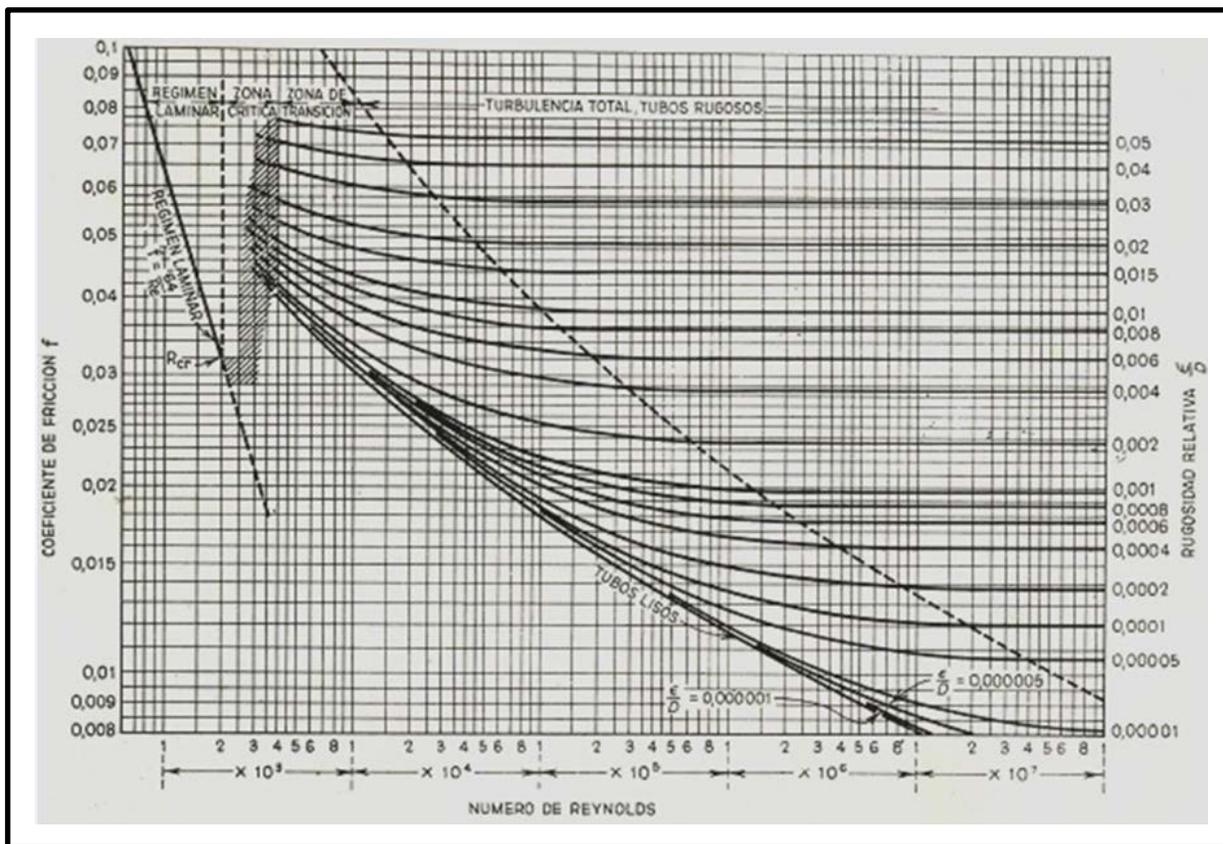


Figura N° 15: "Factor de Fricción en Función de la Rugosidad y el Número de Reynolds"

Para nuestro sistema en la descarga desde la bahía San Vicente hasta el oleoducto por el ducto de 30" se tiene un factor de fricción  $f = 0,017$  obtenido de la tabla anterior a base de los valores de  $\epsilon/D = 0,000196$  y con un número de Reynolds  $Re = 2,318 \times 10^5$ .

#### 2.4.4 Cálculo de las Pérdidas Totales.

Dentro de todo proceso compuesto por tuberías, hay asociados diversos accesorios como uniones, codos, reductores, válvulas, entre otros, que producen pérdidas a medida que el fluido pasa por ellos. Todas estas pérdidas sumadas a las pérdidas por fricción en las tuberías, corresponden a la pérdida total de carga del proceso.

Las pérdidas por fricción en tramos de tubería recta queda determinada por:

$$H_{pf} = \frac{\Delta p f}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\Delta p f = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2})$$

Las pérdidas calculadas para el ducto de 30 pulgadas que llega al oleoducto desde la bahía San Vicente son las siguientes.

$$H_{pf} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,017 \times 9973,75 \times 0,075 = 12,71$$

Este valor corresponde a una pérdida expresada en metros, considerando que la longitud total del ducto de 30 pulgadas mencionado es de 7600 metros, esta pérdida no hace mayor diferencia al momento de realizar un análisis.

Por su parte, las pérdidas de carga asociadas a los accesorios son originadas por los cambios de velocidad y el aumento de la turbulencia en ellos.

Esta pérdida de carga es proporcional a la altura de la velocidad:

$$h_{pai} = K_i \frac{v^2}{2g} \quad \text{Para el } i\text{ésimo accesorio.}$$

$$h_{pa} = \sum_{i=1}^n K_i \frac{v^2}{2g} \quad \text{Para } n \text{ accesorios.}$$

La forma de obtener los valores de los  $K_i$  puede ser experimentalmente en tablas disponibles bibliográficamente, o bien, mediante los datos entregados por el fabricante.

Un procedimiento alternativo para la evaluación de las pérdidas singulares, es el método de longitud equivalente de cañería, que se define como el largo de cañería que genera una pérdida de carga similar al accesorio evaluado.

$$L_{eq} = \frac{K_{singular} \times D}{f}$$

Donde  $D$  es el diámetro del ducto y  $f$  el factor de fricción. El valor de  $L_{eq}$  se encuentra disponibles en tablas regularizadas.

#### 2.4.5 Pérdidas en Válvula.

Para este caso, las pérdidas de energía se van a producir en instantes en donde se realicen aberturas y cierres para el paso del fluido. Se conserva la forma de la ecuación para pérdidas de energía, pero para este caso se modifican la obtención del coeficiente de resistencia  $K$ .

$$K = f_t \frac{L_e}{D}$$

Donde

- $L_e$ : Longitud equivalente.
- $D$ : Diámetro de la tubería.
- $f_t$ : Factor de fricción de la tubería.

En cuanto a la longitud equivalente, esta se refiere a una tubería recta que en conjunto con la válvula tienen el mismo diámetro. Se debe considerar que para poder calcular el coeficiente de fricción se debe estar en un régimen turbulento, ya que así el factor de fricción no dependerá del número de Reynolds.

#### 2.4.6 Coeficiente de Descarga.

Es un factor característico de las válvulas, por el cual se puede calcular el caudal de fluido que descargan las válvulas en función del nivel de fluido que haya almacenado.

El valor del caudal se obtiene por intermedio de la siguiente fórmula.

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{\Delta_p}{\rho}}$$

Donde

- $Q$ : Caudal que pasa por la válvula.
- $C_d$ : Coeficiente de descarga.
- $A$ : Área de apertura de la válvula.
- $\Delta_p$ : Caída de presión en la válvula.
- $\rho$ : Densidad del líquido.

El coeficiente de descarga que se utiliza en esta ecuación es una relación entre el caudal real y el caudal que se calcula teóricamente.

### 2.4.7 Golpe de Ariete.

Se denomina golpe de ariete o choque hidráulico al incremento momentáneo de presión, en instancias en las que hay un cambio repentino de dirección en el recorrido del fluido, o se detiene bruscamente el avance del mismo por las tuberías. Esto último ocurre cuando se cierra rápida o repentinamente una válvula, deteniendo el paso del fluido transfiriendo la presión a la válvula y a la pared de la tubería.

Las variaciones de presión producidas por el golpe de ariete son especialmente peligrosas en las tuberías largas por las que circulan grandes cantidades de líquido a altas velocidades. En estos casos, el golpe de ariete puede producir graves daños en las juntas de unión, en la propia tubería o en las máquinas.

Para entender mejor este fenómeno nos damos el siguiente ejemplo, donde se considera una tubería horizontal de sección circular cortante  $s$  y radio  $R$ , por la que circula un líquido a velocidad  $v$  constante y en la cual se produce un cierre de válvula de forma instantánea.

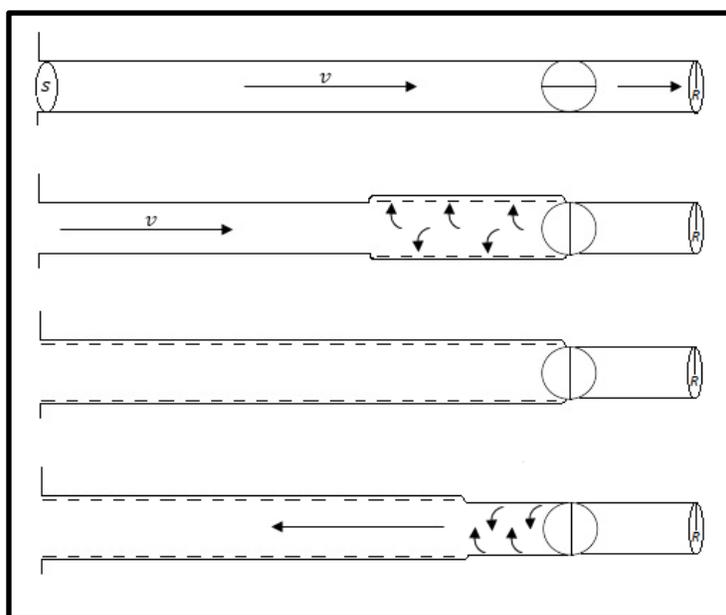


Figura N° 16: "Cierre Abrupto de Válvula en Tubería Recta"

Inicialmente la válvula se encuentra abierta en su totalidad, por lo que el fluido circula con normalidad a velocidad constante. En un determinado instante de tiempo la válvula repentinamente se cierra, provocando una brusca detención del fluido, el cual será empujado por el flujo que viene inmediatamente detrás y que continúa en movimiento. El efecto de este empuje es una sobrepresión en la válvula, provocando una ligera compresión y una leve expansión de la tubería. El líquido que está en contacto con la válvula se detendrá instantáneamente pero el resto no lo hará de la misma forma, sino que se irá deteniendo por capas, produciendo un aumento de la presión en las proximidades de la

válvula y generando una onda de presión que se propaga poco a poco por el resto de la tubería en contra del flujo original.

Si la presión aguas arriba no cambia, una vez que la onda de presión alcanza la sección inicial de la tubería, se devolverá hacia la válvula con la misma velocidad pero ahora como onda de disminución de presión. Cuando esta onda alcanza la válvula, la presión cae y se hace menor que antes del cierre y de nuevo una onda de presión sale en sentido contrario. Así se alternan ciclos de aumento y disminución de presión en un intervalo de tiempo que es el mismo que le toma a la onda recorrer el tramo comprendido entre el inicio de la tubería y la ubicación de la válvula. Debido a la acción de la onda de presión, el resto del fluido se comprimirá una vez que se anule su velocidad.

Si se considera que el cierre de la válvula ha sido muy rápido, esto quiere decir, que el tiempo que tomó cerrar por completo la válvula es menor al tiempo que le toma a la onda de presión recorrer completamente la tubería de ida y vuelta, la sobrepresión máxima se puede obtener de la siguiente manera

$$\Delta H = C \times \frac{V_0}{g}$$

Donde:

$\Delta H$ : Incremento de presión.

$C$ : Velocidad de la onda de sobrepresión o depresión.

$V_0$ : Velocidad media del fluido.

$g$ : Aceleración de gravedad.

Suponiendo una tubería elástica (caso real), al aumentar la presión en una sección de ducto, se produce una expansión radial cuyo valor viene determinado por la elasticidad del fluido, la elasticidad del material de la tubería y por el diámetro de esta en función de su espesor.

De la deducción anterior se obtiene la fórmula de Joukowski para obtener el valor de la celeridad o velocidad de onda  $C$ :

$$C = \sqrt{\frac{k/\rho}{1 + \frac{k}{E} * \frac{D}{e}}}$$

Donde:

$k$ = Módulo elástico del fluido o módulo de Bulk ( $N/m^2$ ).

$\rho$ = Densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$E$ = Módulo de elasticidad de la tubería o módulo de Young (Pa).

$e$ = Espesor de las paredes de la tubería ( $m$ ).

$D$ = Diámetro de la tubería ( $m$ ).

Para nuestro sistema el valor de celeridad variará dependiendo del diámetro del ducto.

## 2.5 Elementos que Componen el Sistema.

Para realizar una correcta representación de la planta, al momento de simular se realizó una recopilación de datos técnicos de los elementos presentes en el proceso. Algunos datos se aproximaron para llevar a cabo la simulación. Cabe destacar que al ser modificado el funcionamiento original de la planta hay secciones y elementos que ya no se utilizan y es por esto que nos enfocamos solo en las secciones activas de la planta.

### 2.5.1 Ductos.

El Oleoducto consta con variados tipos de ductos, sus dimensiones van desde 30 a 1 pulgada dependiendo de la sección y el uso que se requiere. A continuación se presenta una tabla con los datos recolectados de los ductos que más nos interesan.

Ducto	42"	30"	20"	16"	12"	10"
Material	API 5L-B					
Diámetro interior (mm)	1042	743	489	387	305	254
Diámetro exterior (mm)	1067	762	508	406	324	273
Rugosidad (mm)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabla N° 1: "Datos Técnicos de los Ductos"

### 2.5.2 Electroválvula.

Otro de los componentes presentes en el proceso de almacenamiento de crudo de la planta, son las electroválvulas. Utilizadas para controlar el flujo del fluido a través de las tuberías, las electroválvulas disponibles poseen diferentes características y especificaciones, las que se dan a conocer en la siguiente tabla.

Válvula	6110	6120	6210	6220	6300	6310	6320	6530	6630	6730	7110	7120	7220
Tamaño (mm)	305	762	305	762	762	305	762	508	508	508	305	762	610
Presión máxima (bar)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tipo	Esféricas												

Tabla N° 2: "Especificaciones de las Válvulas"

### 2.5.3 Válvulas Manuales.

También hay disponibles válvulas manuales para que el operador directamente pueda hacer un control del flujo del fluido.

Válvula manual	3 Válvulas	2 Válvulas
Tipo	Bola	Bola
Tamaño (mm)	489	254

Tabla N° 3: "Características de las Válvulas Manuales"

### 2.5.4 Bombas.

Para poder enviar el crudo desde las instalaciones hacia la bahía de San Vicente se utilizaban 3 bombas de carga, capaces de generar el caudal apropiado para el envío. Según los datos proporcionados por el operador de la planta, más los manuales de las bombas, las condiciones que garantizan un buen funcionamiento de la estación de bombeo son las que se muestran en la siguiente tabla.

Condiciones de Bombeo Garantizadas			
R.P.M	Capacidad (l/s)	Altura Dinámica Total (m)	Eficiencia (%)
1475	333.835	103.632	84

Tabla N° 4: "Especificaciones Técnicas de las Bombas"

Las curvas características fueron generadas por las siguientes pruebas realizadas por Williams Brothers Engineering Company.

Velocidad (R.P.M)	Altura Dinámica Total (m)	Capacidad (l/s)	Potencia (Kw)	Eficiencia (%)
1475	173.8	0	312.4	0
1475	160.44	84.102	311.9	37.7
1473	138.56	179.57	323.8	66.9
1474	121.127	253.82	338.5	79.0
1472	105.64	333.759	365.7	83.9
1474	84.7	404.98	373.1	80.1
1474	54.92	472.79	362.3	62.4

Tabla N° 5: "Características Obtenidas por el Fabricante"

Las mediciones de flujo fueron obtenidas con un flujometro magnético de 16 pulgadas ubicado en la descarga de la bomba.

### 2.5.5 Estanques.

El oleoducto consta con tres estanques para el almacenamiento, estos son, T-6010, T-6020 y T-6030, poseen una altura de 14,63m y un diámetro de 67,06m que hacen posible una capacidad de trabajo de 48.000m<sup>3</sup>de crudo. Normalmente el estanque T-6010 es llenado hasta los 13,30m y los estanques T-6020 y T-6030 se llenan hasta una altura de 13,20m.

La entrada o salida de crudo hacia los estanques está controlada por válvulas automáticas tanto en la línea de 30” como para la línea de 12”.



Figura N° 17: "Vista Estanque T-6020"

	T-6010	T-6020	T-6030
Altura (m)	14,63		
Diámetro (m)	67,06		
Capacidad (m3)	48.000		
Llenado (m)	13,30	13,20	13,20
Peso techo (Kg)	240.404		
Conexión ducto 30"	Redondeada		
Conexión ducto 12"	Redondeada		

Tabla N° 6: "Datos de los Estanques"

### 2.5.6 Petróleo Descargado.

El petróleo que se almacena en el Oleoducto llega en barcos desde diferentes países, por lo que se tiene una diversidad de tipos de crudo, y en consecuencia con diferentes características. La característica de cada crudo la entregan sus grados API (American Petroleum Institute), que corresponde a una medida de densidad, la que permite conocer cuan liviano o pesado es el tipo de petróleo.

El historial de crudo almacenado en el Oleoducto se muestra en la siguiente tabla.

N°	Nombre	°API	Observación	Gravedad específica	Densidad (kg/m3)
1	Escalante	24,4		0.91	909,2629
2	Saphinoa	29,8		0.8772	876,489
3	Napo	18,5		0.9433	942,535
4	Hibernia	34,9		0.8504	849,711
5	Ekofisk	38,2		0.8332	832,525
6	Albacora	19		0.9402	939,438
7	Lula	30,8		0.8718	871,093
8	Terranova	33		0.8602	859,503
9	White Rose	32,3		0.8639	863,2
10	South Blend	28,6		0.8838	883,084
11	Saphinoa	29	T° 71,2°F		
12	Oriente	25	T° 77,7°F		
13	Nemba	36,9		0.8403	839,619
14	Roncador	28,7		0.8833	882,584
15	Plutonio	33,3		0.8586	857,904
16	Bijupira	29,2		0.8805	879,786
17	Iracema	31,3		0.8692	868,495
18	Pulvo	20,8		0.9291	928,347

Tabla N° 7: "API de Crudos Descargados"

## **CAPITULO 3: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN ALLIEVI.**

### **3.1 Introducción.**

Allievi es un paquete informático cuyo objetivo es la simulación y/o análisis de los eventos transitorios en un determinado sistema hidráulico a presión.

El régimen transitorio significa un cambio en el espacio y el tiempo de las condiciones de funcionamiento del sistema al momento de pasar de un régimen permanente inicial a uno final. Una de las formas por las cuales se pueden originar, es a través de la manipulación de los elementos activos de un sistema. De este modo, y dependiendo de los componentes que un sistema posea, los transitorios se dan mayormente por la puesta en marcha y parada de las bombas, además de las aperturas y cierres de las válvulas.

Existen también otras causales que producen transitorios. Una de ellas es la rotura de un conducto en un momento determinado. Este tipo de acción puede provocar un transitorio rápido, incluso máximo cuando la rotura producida es considerable y en un tiempo corto.

Durante el desarrollo de un transitorio se pueden dar una serie de efectos que pueden causar graves daños al sistema hidráulico. Efectos como el aumento de presión, capaces de romper algún conducto de la red, o si las presiones mínimas descienden a tal punto que pueden introducir aire o líquidos a través de grietas, son algunos de ellos.

La solución para estos efectos es proporcionar a las instalaciones la protección necesaria, y para llevarlo a cabo, se requiere de una herramienta capaz de simular y proporcionar los resultados que se producen tras una maniobra determinada.

### **3.2 Fundamento de Cálculo de ALLIEVI.**

Previo a realizar el diseño de un sistema hidráulico y posteriormente simularlo, es necesario conocer los métodos que el software utiliza para realizar los cálculos de las variables que están presentes en la dinámica del sistema.

#### **3.2.1 Conductos a Presión.**

Existen dos métodos diferentes para analizar el comportamiento de un fluido: el método diferencial y el método integral. El primero permite calcular valores de cualquier propiedad en un punto infinitesimal definido del sistema, por ejemplo la velocidad local del fluido;

mientras que el segundo permite calcular los valores medios de las propiedades deseadas, por ejemplo la velocidad media en una sección de conducto.

Para Allievi la forma de modelar el transitorio dentro de un conducto a presión, es aplicando las ecuaciones correspondientes a la conservación de la masa y la de la cantidad de movimiento a un volumen de control. A partir de esto se tendrán dos ecuaciones diferenciales no lineales en las que se presentan dos incógnitas, la altura piezométrica  $H = H(x, t)$  y la velocidad  $V = V(x, t)$ . Ambas en función de la posición y el tiempo a lo largo de la tubería.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (2)$$

La ecuación (1) se obtiene a partir del balance de energía presente en un tramo del conducto a presión, donde se pueden diferenciar dos términos, el correspondiente a la altura piezométrica (a) y el correspondiente a la pérdida de carga producida por el golpe de ariete (b), ambos términos vistos en capítulos anteriores.

$$H = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} \quad (a)$$

$$\Delta H = C \times \frac{V_0}{g} \quad (b)$$

Para expresar la ecuación en su forma diferencial, ambos términos son operados con la derivada sustancial, cuyo operador se define como:

$$\frac{d}{dt}(F) = \frac{\partial(F)}{\partial t} + V\nabla(F)$$

Donde  $V$  es la velocidad del fluido.

El objetivo de aplicar este operador es para representar la variación por unidad de tiempo de las pérdidas de carga siguiendo el movimiento del fluido. El primer término representa la variación en un punto fijo (derivada local) y el segundo representa la variación asociada al cambio de posición (derivada convectiva). Esto da como resultado la representación vista en la ecuación (1).

La ecuación (2) corresponde a la conservación de cantidad de movimiento de un fluido en un conducto cerrado, obtenida al igualar las fuerzas externas aplicadas al fluido, como la gravedad, fuerza de presión, fricción, etc. En esta ecuación se pueden observar términos de

inercia del fluido (c), altura piezométrica (a), y pérdidas de carga en el conducto a presión (d).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (c)$$

$$f \frac{V|V|}{2D} \quad (d)$$

Al observar la ecuación (c) se distinguen dos términos, donde leyendo esta ecuación de izquierda a derecha, el primer término corresponde a la aceleración local (aceleración temporal) y el segundo término es la aceleración convectiva (aceleración inercial).

Nuestras ecuaciones (1) y (2), pueden relacionarse mediante un multiplicador  $\lambda$  de la siguiente forma:

$$L = L_1 + \lambda L_2$$

Al aplicar la relación anterior nos queda:

$$\left[ \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \lambda \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} \right] = 0 \quad (3)$$

Reordenando los términos:

$$\left[ \frac{\partial H}{\partial t} + (v + \lambda g) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \lambda \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + \left( v + \frac{a^2}{\lambda g} \right) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \lambda \left[ f \frac{v|v|}{2D} \right] = 0 \quad (4)$$

Se puede hacer una relación entre las ecuaciones:

$$\frac{dl}{dt} = v + \lambda g$$

$$\frac{dl}{dt} = v + \frac{a^2}{\lambda g}$$

Igualando estas expresiones tenemos:

$$v + \lambda g = v + \frac{a^2}{\lambda g}$$

$$\lambda = \pm \frac{a}{g}$$

Se pueden apreciar dos curvas características, una curva  $c^+$  positiva y una curva  $c^-$  negativa, definidas por las siguientes trayectorias:

$$c^+ = \frac{dl}{dt} = v + a$$

$$c^- = \frac{dl}{dt} = v - a$$

Teniendo en consideración esto, en las ecuaciones de nuestro sistema y reemplazando, nos encontramos que las derivadas parciales pasan a ser derivadas totales:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + (v + a) \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{dl}{dt} \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{dH}{dt}; \quad \frac{\partial V}{\partial t} + (v + a) \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{dl}{dt} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + (v - a) \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{dl}{dt} \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{dH}{dt}; \quad \frac{\partial V}{\partial t} + (v - a) \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{dl}{dt} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{dV}{dt}$$

Así finalmente podemos escribir nuestras ecuaciones de la forma:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{a}{g} f \frac{v|v|}{2D} = 0$$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - \frac{a}{g} f \frac{v|v|}{2D} = 0$$

La resolución y simulación numérica del golpe de ariete, es abordada mediante el método de las características. Este método considera un flujo no estacionario teniendo en cuenta la compresibilidad del fluido.

Los resultados que se obtendrán en el sistema de ecuaciones, son a partir de instantes de tiempos determinados, separados entre sí como  $\Delta t$  y en puntos concretos de la conducción diferenciados por  $\Delta x$ . De esta forma se discretiza el sistema, en base a la siguiente condición.

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = a \tag{5}$$

De la expresión (5),  $a$  representa la celeridad o velocidad de la onda de presión en el interior de la tubería.

Con lo previamente expuesto, las ecuaciones diferenciales de la expresiones en (3) y (4), pasan a ser dos ecuaciones algebraicas lineales y con dos incógnitas representadas de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
 H_i^{n+1} - H_{i-1}^n + \frac{a}{g}(V_i^{n+1} - V_{i-1}^n) + \frac{f_{i-1}^n \Delta x}{D} V_{i-1}^n |V_{i-1}^n| &= 0 \\
 H_i^{n+1} - H_{i+1}^n + \frac{a}{g}(V_i^{n+1} - V_{i+1}^n) + \frac{f_{i+1}^n \Delta x}{D} V_{i+1}^n |V_{i+1}^n| &= 0
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

A partir de estas ecuaciones es posible calcular la altura H y la velocidad V en un punto i de la tubería y en el instante n+1, considerando los valores de H y V que se han obtenido en los puntos i-1 e i+1 en el instante n. La base de cálculo de ALLIEVI es la aplicación de las expresiones en (6), denominadas “Método de las Características”.

El sistema de ecuaciones que se obtuvo en el punto (6) permite obtener resultados en cualquier punto de la tubería, pero con la excepción de sus extremos, ya que es en este sector donde se conectan otros componentes, por lo que una de las dos ecuaciones en (6) se reemplazaría por la ecuación que rige al componente del sistema adherido en ese extremo de tubería, denominada “Condición de Contorno”. Este motivo es el que hace posible que el software pueda simular el régimen transitorio de un sistema hidráulico a presión, incorporando diferentes elementos, como son, depósitos, estaciones de bombeo, control de caudal por intermedio de válvulas, entre otras, todos ellos conectados a través de un sistema de tuberías.

### 3.2.2 Cálculo de Régimen Permanente.

Los resultados que se obtendrán en la forma transitoria nacen considerando primeramente el régimen permanente. En el software la manera de obtener el régimen permanente es utilizando los elementos del sistema en sus estados iniciales y sin que se ejecute algún tipo de maniobra con ellos. Bajo esta condición se van a obtener cálculos en condiciones en la cual el tiempo no varía, y los que se consideran valores de partida para iniciar el cálculo del régimen transitorio.

### 3.3 Elementos de Simulación de ALLIEVI.

Allievi dispone de una serie de elementos que permiten diseñar un sistema hidráulico interconectado. La característica que tienen los elementos de simulación, es que cada uno posee un nodo inicial y final. Esto con el propósito de asignar el sentido positivo del caudal cuando pasa del nodo inicial del componente hacia el nodo final del mismo.

Los principales elementos que se encuentran dentro del software, y que son requeridos para la simulación se muestran en la siguiente tabla.

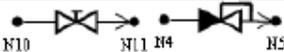
Tipo de elemento	Representación Gráfica en ALLIEVI
Nudo	
Depósito	 N16 N17
Tuberías	 N34 N35
Estaciones de Bombeo	 N30 N31
Estructuras de Control de Caudal	 N10 N11 N4 N5

Tabla N° 8: "Elementos de Software para Simulación"

### 3.3.1 Dibujar Elementos.

Allievi dispone de una interfaz organizada de tal forma que al usuario le sea fácil identificar y seleccionar el elemento que desea usar en el diseño de su sistema. El dibujo de los elementos es sencillo ya que basta con un solo click para ir creando un sistema que puede ser sencillo, hasta alcanzar niveles de complejidad como el de una red mallada.

La organización de los elementos en la interfaz es a través de cinco categorías. En un primer grupo se hallan los elementos básicos, bombas, tuberías, nodos. En el segundo grupo se localizan los diferentes tipos de depósitos. El tercer grupo reúne las distintas válvulas a las que se puede acceder, siguiendo con los grupos de protección, y finalizando con las diferentes leyes presentes en un sistema hidráulico.



Figura N° 18: "Organización de la Interfaz de ALLIEVI"

A continuación se describe cada uno de los elementos expuestos en la tabla N°8, presentando sus características más importantes, detallando sus parámetros hidráulicos y algunas consideraciones necesarias.

### 3.3.2 Nudos.

El nudo determina el punto de unión entre dos o más elementos, permitiendo la interconexión y propagación de la red diseñada.

Al seleccionar un nudo se requerirá que el usuario ingrese los valores correspondientes a la designación, que es lo que permite que no se repitan nudos y no se produzcan errores, y los valores de cota, correspondientes a la ubicación del nudo tomando como referencia algún nivel especificado por el usuario.

### 3.3.3 Depósitos.

Los depósitos son los elementos donde se almacenará el fluido a presión atmosférica. Los tipos de depósitos que vienen incluidos en el software son los siguientes.

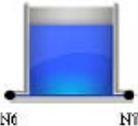
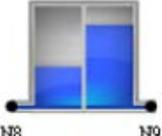
Tipo de Depósito	Representación en ALLIEVI
Depósitos de grandes dimensiones o de nivel constante (GD)	
Depósitos de pequeñas dimensiones o de nivel variable (PD)	
Depósitos de sección variable (SV)	
Depósitos con división y vertedero (DV)	

Tabla N° 9: "Tipos de Depósitos en ALLIEVI"

Como se observa en las figuras de la tabla N°9, los depósitos tienen nudos para unir con los otros elementos que conformarán el sistema. Para el caso de los depósitos con dos nudos, se debe tener en consideración que la cota correspondiente a la altura que hay del suelo a los nudos del depósito debe ser la misma para ambos.

De acuerdo al diseño del oleoducto los depósitos que tienen mayor posibilidad de utilizarse en el diseño de la simulación son los dos primeros de la tabla N°9, y los cuales se describen a continuación.

### 3.3.3.1 Depósitos de Grandes Dimensiones.

Al momento de seleccionar este depósito solo es necesario ingresar la cota inicial del fluido (Z0), utilizada para calcular el régimen permanente. Como es un depósito grande, esta cota no cambiará mucho a lo largo de toda la simulación, independiente del caudal de entrada y salida que haya.

La forma de poder seleccionar el tipo de depósito e introducir la cota del fluido es en el cuadro de datos básicos.

Depósitos - Datos básicos							
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Tipo	S (m <sup>2</sup> )	Z0 (m)	Zvar
D1	---	N1	10	GD		20	

Figura N° 19: "Cuadro de Datos del Depósito"

De la figura se observa que en el cuadro "Tipo" se selecciona el depósito de grandes dimensiones (GD) y la cota inicial de fluido se introduce en la celda Z0. Las medidas pueden ser modificadas a la unidad que el usuario considere más apropiadas.

### 3.3.3.2 Depósitos de Pequeñas Dimensiones.

En estos tipos de depósitos el nivel de fluido varía según el valor de la sección del depósito (S) y el caudal de entrada y salida que se establezca. El nivel del fluido, la sección y el tipo de depósito se configuran en el cuadro de datos básicos del depósito.

Depósitos - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m <sup>2</sup> )	Z0 (m)
D1	---	N1	150	PD	20	155

Figura N° 20: "Cuadro de Datos Básicos del Depósito"

El cuadro de datos muestra el depósito de pequeñas dimensiones seleccionado (PD), además de tener ingresado los valores de la sección del depósito (S), y las diferentes cotas correspondientes al nivel inicial de fluido (Z0) y la distancia desde el suelo (Zs).

### 3.3.4 Tubería.

El software proporciona tuberías de diferentes tipos de material. Al momento de ingresar una tubería se deben ingresar los siguientes parámetros:

- Diámetro (Dint): Es el diámetro interior de la tubería.
- Longitud (L): Longitud total que posee la tubería.
- Espesor de la tubería (e): Espesor de pared de la tubería, utilizada para calcular la celeridad.

Todos estos parámetros corresponden a los datos básicos de la tubería, y se ingresan en la sección del mismo nombre en el cuadro de configuración, como se muestra en la figura.

Tuberías - Datos básicos							
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)
T1	N1	44	N2	50	400	1200	10

Figura N° 21: "Cuadro de Datos Básicos de la Tubería"

El cuadro de configuración también posee la sección de pérdidas, y los parámetros que se deben ingresar para este tipo de suceso en una tubería son los siguientes:

- Rugosidad absoluta (Rug): En la tubería las pérdidas de fricción se obtienen mediante el cálculo de la ecuación de Darcy, con un factor de fricción para régimen turbulento. El usuario deberá ingresar el valor de la rugosidad absoluta de las paredes interiores de la tubería. Las consideraciones que se deben tener son que, para el caso de que se ingrese un valor negativo, por ejemplo (-1), los cálculos se realizarán considerando que no hay pérdidas por fricción. Si se ingresa un valor nulo, la tubería se considerará lisa.
- Coeficiente de pérdidas menores (k): Coeficiente que corresponde a las pérdidas menores globales de la tubería, no posee dimensiones y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$h_m = k \frac{V_t^2}{2g}$$

Donde  $V_t$  es la velocidad del fluido en la tubería y  $g$  la aceleración de gravedad.

Pérdidas	
Rug (mm)	k
0,1	3,5

Figura N° 22: "Sección de Pérdidas del Cuadro de Configuración de la Tubería"

Hay otros parámetros que también se ingresan en la sección de datos básicos. La celeridad, que representa la velocidad de la onda de presión en la tubería, visto y calculado anteriormente.

### 3.3.5 Estaciones de Bombeo.

El introducir una estación de bombeo dentro del sistema diseñado trae consigo incorporar una variedad de características para el óptimo funcionamiento.

- Número de bombas en paralelo: Número total de bombas que conformarán la estación. Estas bombas tendrán el mismo comportamiento, además de poseer las mismas válvulas que harán la regulación.
- Forma de las curvas: Se especifica cómo es la forma que tendrán las curvas características de las bombas, las que pueden ser universales o ajustadas.
- Tipo de válvula de grupo: Se indica si existe o no válvula de retención y regulación a la salida del grupo de bombas.
- Inercia de cada grupo: Momento de inercia de las masas rodantes de cada grupo de bombas. Para los casos en que no se disponga de este dato, el software entrega una estimación del valor de inercia utilizando la siguiente ecuación.

$$I = 0.0376 \left( \frac{P}{N^3} \right)^{0.9556} + 0.0043 \left( \frac{P}{N} \right)^{1.48}$$

De la ecuación, I representa la inercia en  $Kg * m^2$ , P la potencia nominal de la bomba en Kw, y N la velocidad de rotación en rpm.

El primer término de la ecuación representa el momento de inercia del rodete y eje, mientras que el segundo representa el momento de inercia del motor de accionamiento.

De otro modo, el software permite estimar el valor de inercia y potencia de la bomba introduciendo los valores de caudal, altura, rendimiento y velocidad de rotación, como se muestra a continuación.

Figura N° 23: "Cálculo de la Inercia y Potencia de la bomba"

Mediante el asistente de cálculo que se muestra en la figura, efectivamente se obtiene el valor de inercia y potencia del motor ingresando el valor de los parámetros anteriormente mencionados.

Previamente se mencionó sobre la forma de curva de las bombas, las que pueden ser de dos tipos, y que se especifican a continuación.

### 3.3.5.1 Bombas con Curvas Características Universales.

Este tipo de curva permite representar el comportamiento de la bomba en cualquier condición de funcionamiento, esto quiere decir para valores positivos, negativos e incluso nulos para el caudal, altura y velocidad de rotación.

Los datos que se requieren para este tipo de curva son, el caudal, altura y potencia de accionamiento, cada uno de ellos con el valor que poseen en el punto óptimo de operación. Una vez que se han ingresado estos valores, el programa entrega el valor del rendimiento en ese punto.

Rendimiento optimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend %
150	110	200	80,93

Figura N° 24: "Rendimiento en el Punto Óptimo de Operación de la bomba"

### 3.3.5.2 Bombas con Curvas Características por Puntos.

A diferencia del tipo de curva anterior, este tipo está limitado para los casos en que el funcionamiento de la bomba sea en el primer cuadrante y con velocidad de rotación positiva. Como es un tipo de curva por puntos, los datos de caudal, altura y potencia de funcionamiento se requieren para puntos específicos.

El rendimiento de la bomba se mostrará una vez se hayan ingresado los valores para cada punto de funcionamiento.

Es importante que al momento de definir los puntos de funcionamiento, estos sean los necesarios para cubrir todo el primer cuadrante y sin que existan potencias de accionamiento nulas o negativas. Esto debido a que durante la simulación la bomba podría actuar en cualquiera de estos puntos.

El programa dispone de un asistente para el ingreso de todos los puntos de funcionamiento, tal cual se muestra en la siguiente figura.

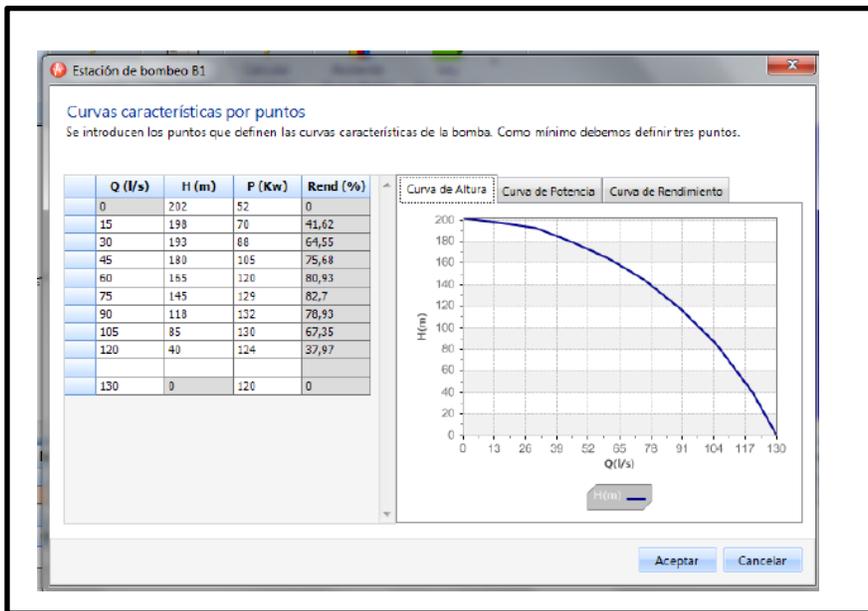


Figura N° 25: "Asistente de Curva por Puntos de la Bomba"

### 3.3.6 Válvulas de Control de Caudal.

Las válvulas componen las estructuras de control que intervienen en el caudal a medida que circula por las tuberías. Dentro del programa hay disponible diferentes tipos de válvulas, cada una de ellas para una diferente función.

Tipos de Válvulas	Representación Gráfica en ALLIEVI
Válvulas de regulación	
Válvulas de retención	
Válvulas de alivio	
Válvulas de sobrevelocidad	
Válvulas compuestas	
Válvulas automáticas	

Tabla N° 10: "Tipos de Válvulas disponibles en ALLIEVI"

De todos los tipos de válvulas que el software simula, solo se necesitarán las válvulas de regulación.

Las características de esta válvula se dan a continuación.

### 3.3.6.1 Válvulas de Regulación.

El accionamiento de estas válvulas permite modificar el caudal, ya sea para cambiar la dirección en la que circula o para aislar una parte del sistema. Los datos necesarios para su configuración son los siguientes:

- Cota (Z): Altura a la que se encuentra situada la válvula en conjunto con los nudos de sus extremos.
- Diámetro nominal (DN): Diámetro nominal que tiene la válvula.
- Coeficiente de pérdida (K) del ramal: Coeficiente de pérdidas adimensional del ramal donde está conectada la válvula.

Estos datos se incorporan en el cuadro de configuración de la válvula.

Válvula Regulación - Datos básicos					
Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo
N1	N2	10	250	5	Mariposa

Figura N° 26: "Cuadro de Configuración de Datos Básicos de la Válvula"

En la celda tipo se despliega los tipos de válvulas disponibles para las válvulas de regulación, de las que se puede seleccionar las siguientes:

- Mariposa
- Esférica
- Compuesta
- Globo
- Diafragma
- Comercial

Para estos tipos de válvulas, a excepción de la de tipo comercial, hay una curva característica que el software proporciona, entregando el valor del coeficiente de pérdidas en función del grado de apertura de la válvula.

Las válvulas podrán abrirse y/o cerrarse durante todo el tiempo que toma la simulación del transitorio, definiendo su comportamiento de forma tabulada o sinusoidal.

Para el caso de que la válvula se cierre o se abra, su intervalo de trabajo es de 0 – 100 %.

Si se selecciona la forma tabulada, se deben ingresar los siguientes datos:

- Instante  $t_i$ : Instante de tiempo correspondiente al punto i.
- Grado de apertura  $A_{r_i}$ : Apertura relativa de la válvula, en % respecto de la apertura máxima, en el instante  $t_i$ .

Al elegir la maniobra tabulada y proceder a ingresar los datos en la tabla, se despliega el siguiente cuadro.

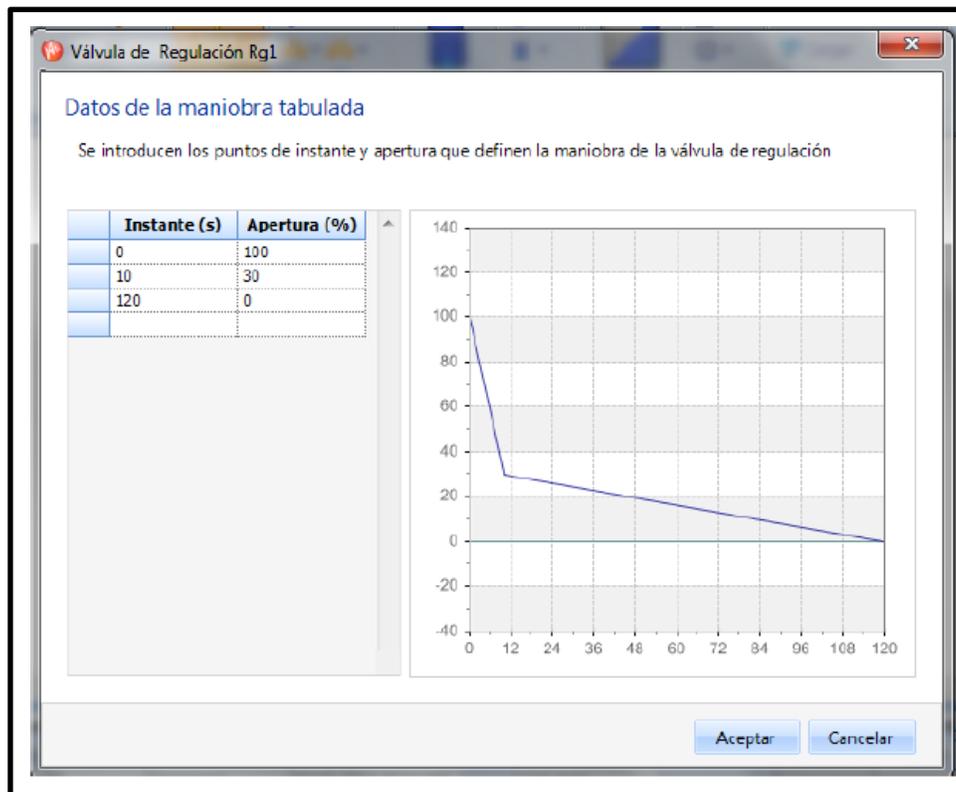


Figura N° 27: "Tabla de Datos de la Maniobra Tabulada"

Una vez ingresados los datos de tiempo y apertura de la válvula, se muestra el perfil de trabajo que realizará la válvula.

En cuanto a la maniobra sinusoidal, esta se va a regir mediante una función periódica de la siguiente forma:

$$Ap(t) = Ap_o + A \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T}t + B\right)$$

Donde:

$Ap_o$ : Apertura inicial de la válvula representada porcentualmente.

$A$ : Amplitud de la oscilación, también representada porcentualmente respecto a la apertura máxima.

$T$ : Periodo de oscilación del grado de apertura de la válvula, en segundos.

$B$ : Ángulo de fase de la oscilación del grado de apertura de la válvula, en grados.

Como el software trae incorporada esta ecuación en su base de datos, solo resta ingresar los parámetros previamente expuestos en el cuadro de selección de la maniobra sinusoidal.

Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $Ap(t)=Ap0+A*\text{sen}(2*Pi*t/T+B)$			
Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
Sinusoidal		50	25	10	45

Figura N° 28: "Cuadro de Selección de la Maniobra Sinusoidal"

#### CAPITULO 4: PROCESO DE VALIDACIÓN.

Con el fin de obtener variables que permitan validar el modelo de la planta, se propuso al Oleoducto Trasandino Estenssoro Pedrals realizar una recirculación del crudo para obtener mediciones de presiones en puntos específicos, y así compararlas con las que se obtienen mediante de la simulación.

Para llevar a cabo la recirculación se debe considerar que cada uno de los tres estanques posee un tipo diferente de crudo, por lo que no se pueden mezclar. Tomando en cuenta esto, la recirculación se realizó solo con un estanque, en este caso el T-6030. La descarga en este estanque es por el ducto de 30", controlada por la válvula MOV-7120, y el retorno del crudo por el ducto de 12" controlado por la válvula MOV-7110 (ver figura N°29). La forma en que se interconectan estos dos ductos es por intermedio de una toma de 10" que sale del ducto de 30". Esta toma posee dos válvulas manuales para la regulación (ver figura N°30),

pasadas estas válvulas el ducto cambia de 10” a 12”. Para el retorno del crudo hacia el estanque se utilizó la bomba J-6010 dispuesta en la red.

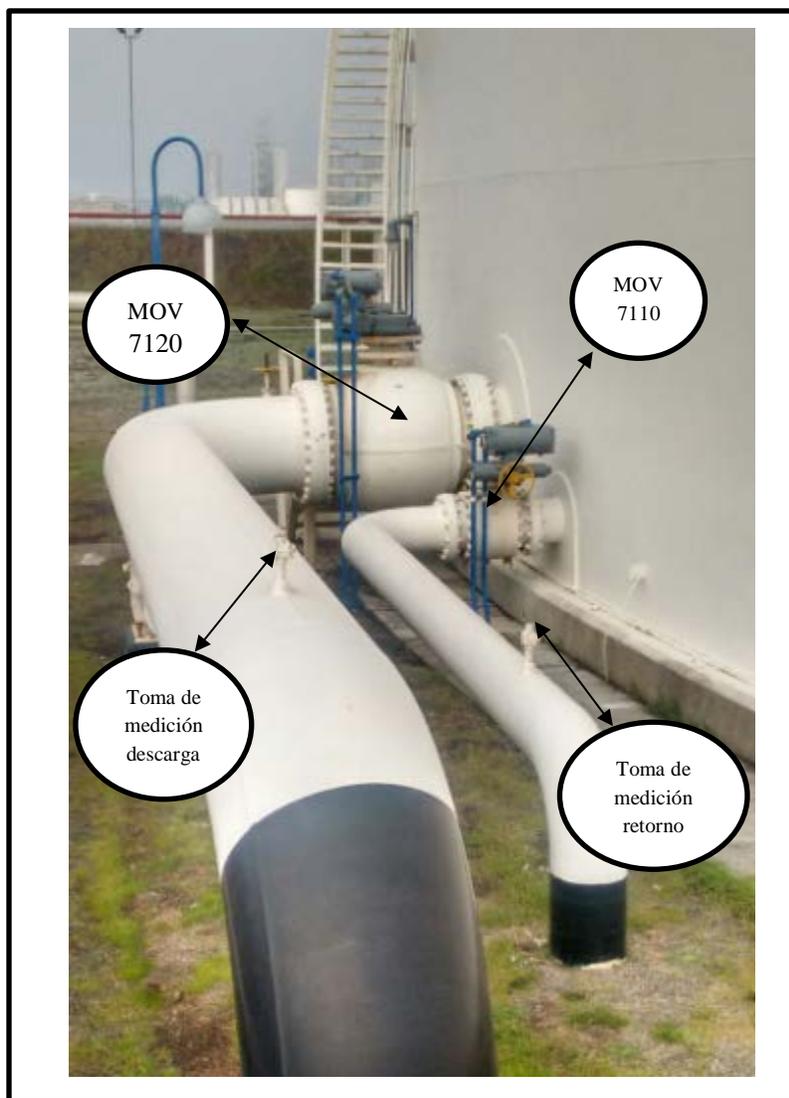
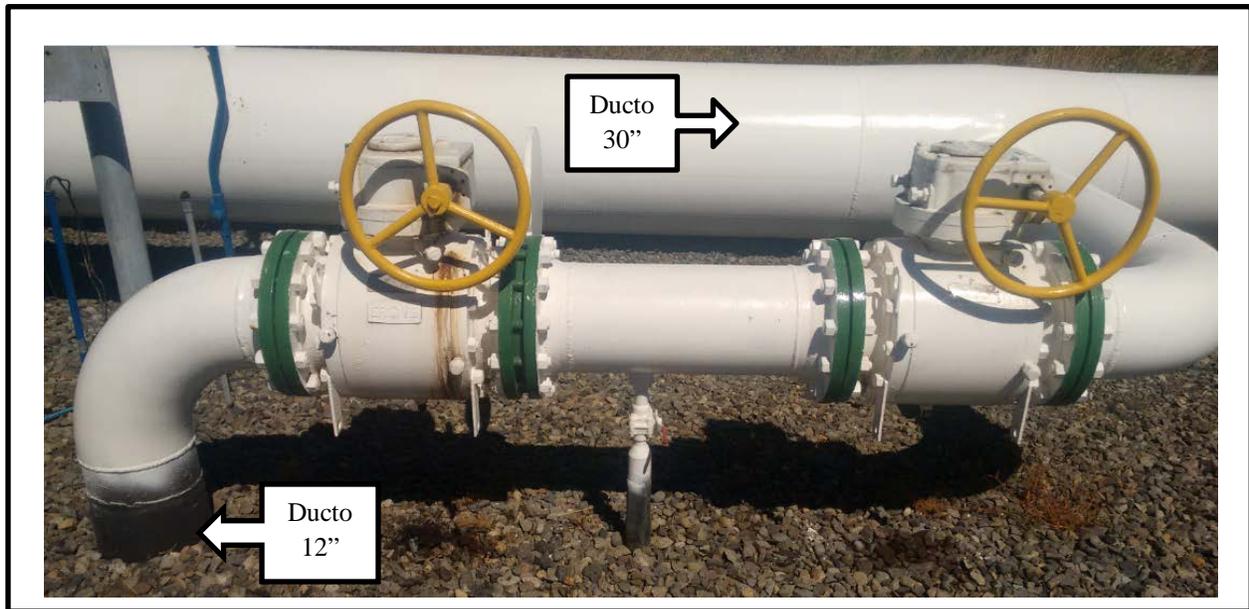


Figura N° 29: “Válvulas de Regulación y Tomas de Mediciones”

En la figura N°29 se muestra con mayor claridad el lugar específico disponible en el OTEP para colocar los manómetros que permitieron obtener los valores de presión de descarga y retorno del fluido. Los manómetros utilizados soportan una presión máxima de 10  $Kg/cm^2$ , valor más que suficiente, ya que en este sector del proceso las presiones no son muy elevadas.



*Figura N° 30: "Interconexión de Líneas"*

Como se observa de la figura 30, la toma de 10" sale desde el ducto de 30" para conectarlo con el ducto de 12" el cual en primera instancia se profundiza 1,5 metros. Se mantiene a esta profundidad hasta un tramo aproximado de 16 metros, luego sube a la superficie quedando a la misma altura que el ducto de 30" y circulando en paralelo a el.



*Figura N° 31: "Bombas de la Red"*

La figura 31 muestra la bomba seleccionada por el operador para impulsar el crudo de retorno al estanque.

El siguiente esquema representa todo el proceso de recirculación, mostrando el recorrido del flujo, los elementos que participan, los puntos de medición, y las distancias de las tuberías.

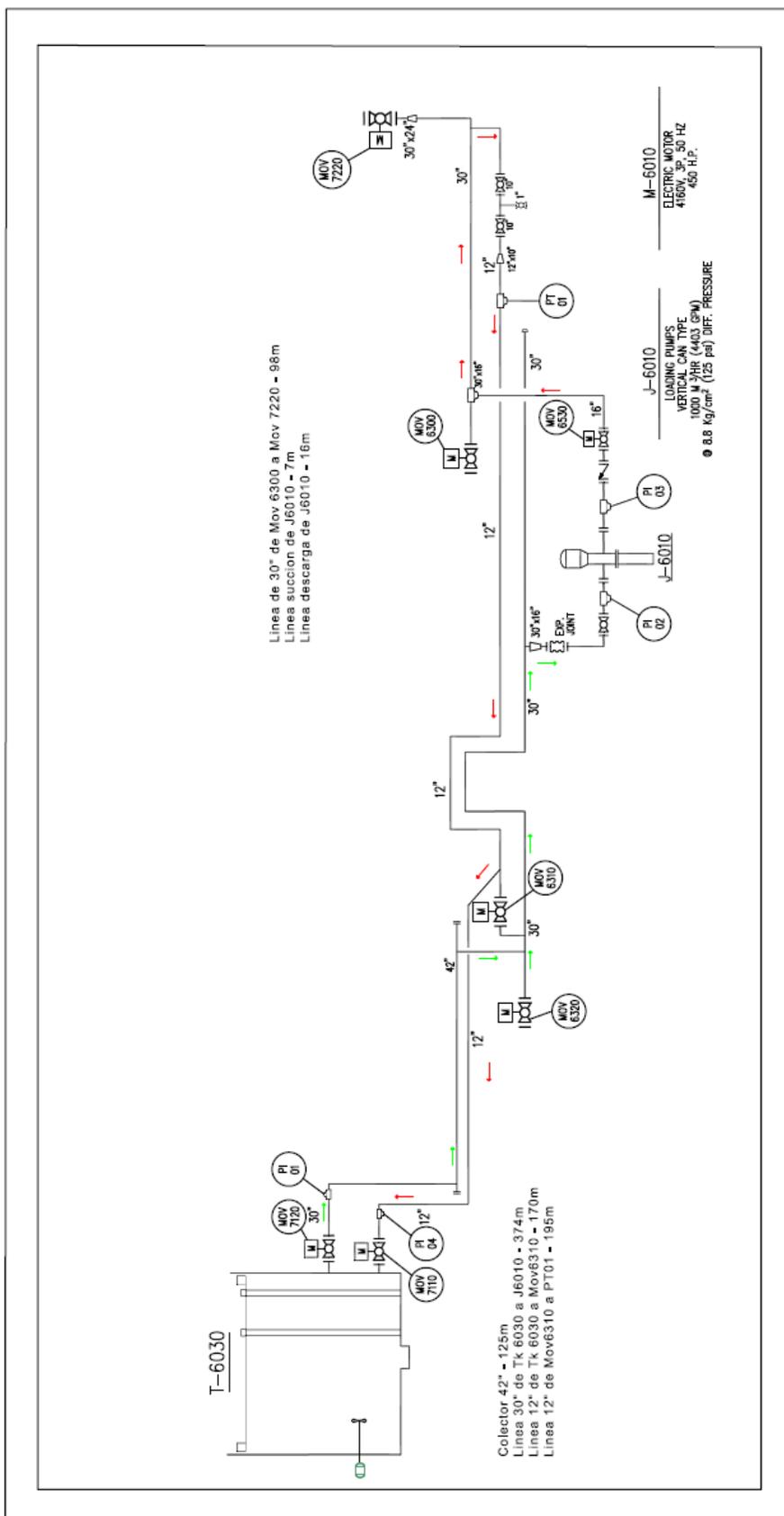


Figura N° 32: "Esquema del Proceso de Recirculación"

#### **4.1 Puntos de Medición.**

Las tomas de mediciones de presión se ubicaron en diferentes puntos específicos. Uno de ellos a 7 metros de la válvula MOV-7120, el siguiente a 6 metros antes de la válvula MOV-7110, representados por PI-01 y PI-04 respectivamente en el esquema de la figura N°32, y corresponden a manómetros de indicador local. Estas medidas se utilizaron para comparar la presión que ejerce la columna de fluido en la descarga, con la presión de retorno al estanque, y así determinar las pérdidas que se producen en la circulación del fluido.

Otro punto de medición es PT-01. En este punto se mide la presión previa a la toma que interconecta el ducto de 30” con el de 12”. A diferencia de los anteriores, la adquisición de los valores de presión en este punto fue posible obtenerlos de manera remota en la sala de control en cualquier instante de tiempo, y en el momento en que ocurría algún cambio en el proceso, por ejemplo, el cierre de una válvula.

Para ayudar en el retorno del crudo hacia el estanque se utilizó la bomba J-6010. Los registros de presión se obtuvieron en dos puntos de medición ubicados antes de la bomba, PT-02 para la succión, y después de la bomba, PT-03 para la descarga. Estas mediciones hicieron posible calcular la diferencia de presión mientras la bomba estaba en operación.

#### **4.2 Mediciones Obtenidas.**

Durante el proceso de recirculación se consideraron diferentes eventos para obtener valores de presión descritos a continuación.

- Antes del comienzo de la descarga del fluido desde el estanque, para registrar las presiones indicadas en todos los puntos de medición cuando el proceso está en reposo.
- Al realizar la apertura de MOV-7120 y MOV-7110. Mediante esta acción comienza la circulación del crudo sin la participación de la bomba J-6010.
- Al inicio de la acción de la bomba J-6010.
- Una vez que transcurre cierto tiempo de operación de la bomba, se realiza un registro para cuando el proceso se encuentre en régimen estable.
- Para generar variaciones de presión se manipula la apertura de MOV-7110, considerando porcentajes de apertura del 80%, 60% y 40% de su capacidad.

Los resultados obtenidos a partir de las condiciones explicadas, se representan en las siguientes tablas.

Instante	Presión de Succión (PI 02)	Presión de Descarga (PI 03)
En reposo	1.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0
Apertura MOV-7120	1 Kg/cm <sup>2</sup>	0
Apertura MOV-7110	1 Kg/cm <sup>2</sup>	0
Partida de la Bomba	1 Kg/cm <sup>2</sup>	-
Bomba en Régimen Permanente	1 Kg/cm <sup>2</sup>	5.6 Kg/cm <sup>2</sup>
Cierre de válvula de retorno al 80%	1 Kg/cm <sup>2</sup>	5.6 Kg/cm <sup>2</sup>
Cierre de válvula de retorno al 60%	1 Kg/cm <sup>2</sup>	6 Kg/cm <sup>2</sup>
Cierre de válvula de retorno al 40%	1 Kg/cm <sup>2</sup>	8 Kg/cm <sup>2</sup>

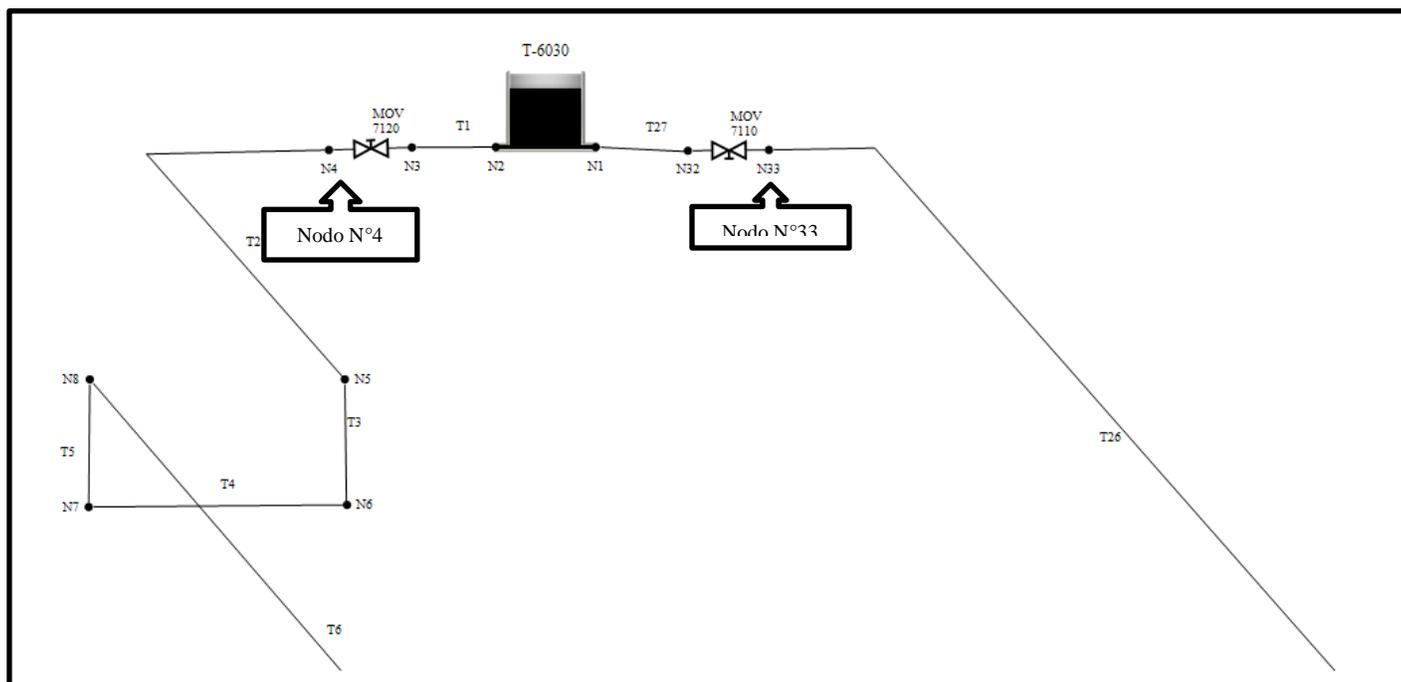
Tabla N° 11: "Toma de Mediciones en la Bomba"

Instante	Ducto 30"	Ducto 12"	Sala de Control
En reposo	1.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0	0
Apertura de válvulas	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1 Kg/cm <sup>2</sup>	0
Régimen permanente	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1 Kg/cm <sup>2</sup>	5.6 Kg/cm <sup>2</sup>
Cierre de válvula de retorno al 80%	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.5 Kg/cm <sup>2</sup>	5.6 Kg/cm <sup>2</sup>
Cierre de válvula de retorno al 60%	1 Kg/cm <sup>2</sup>	2 Kg/cm <sup>2</sup>	6 Kg/cm <sup>2</sup>
Cierre de válvula de retorno al 40%	1 Kg/cm <sup>2</sup>	6 Kg/cm <sup>2</sup>	8 Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla N° 12: "Presiones Obtenidas en los Puntos de Descarga, Retorno y Sala de Control"

### 4.3 Simulación del Proceso de Recirculación.

El diseño realizado en el software del proceso de recirculación se muestra en las siguientes imágenes, divididas con el propósito de apreciar mejor los puntos que se configuraron para obtener los resultados.



*Figura N° 33: "Sección Estanque T-6030"*

En esta sección se observa el estanque T-6030 con sus dos válvulas de regulación para el control del fluido. Para obtener los registros de presiones, el nodo N°4 se configuró de tal forma que se puedan observar las presiones correspondientes a la descarga del fluido, mientras que en el nodo N°33 se observarán las presiones al momento en que el fluido retorna al estanque.

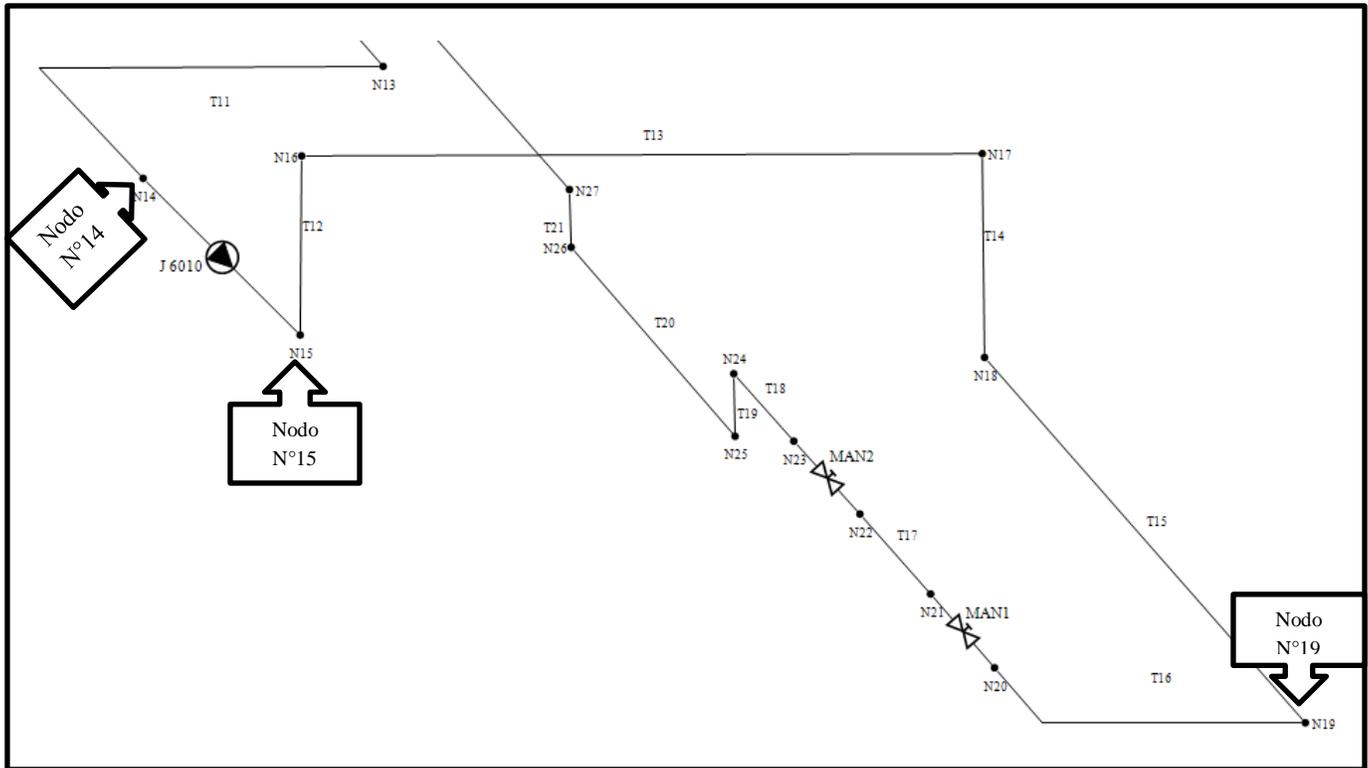


Figura N° 34: "Sección de la Bomba y Retorno al Estanque"

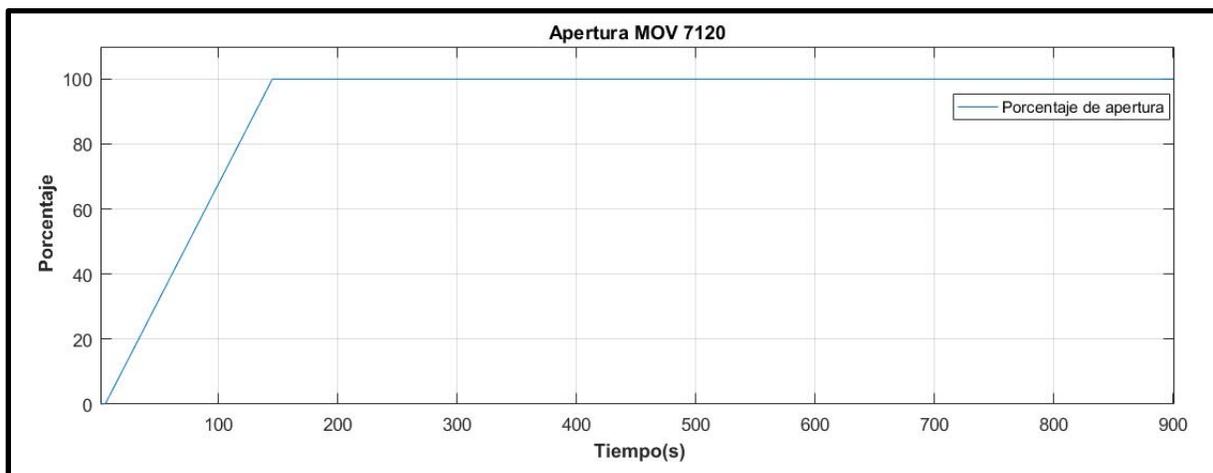
En esta sección la bomba succiona el fluido que circula por el ducto de 30" y lo devuelve hacia el estanque. Para poder obtener y visualizar las presiones que se registran en la operación de la bomba, se configuraron los nodos N°14 para la succión y N°15 para la descarga. Además el nodo N°19 representa el lugar donde se obtuvieron los valores leídos desde la sala de control.

#### 4.4 Resultados Obtenidos de la Simulación.

A continuación se muestran los resultados representados de forma gráfica de todos los nodos mencionados anteriormente.

##### 4.4.1 Descripción de Perfiles de Operación Válvulas de Regulación y Bomba.

En el transcurso de la simulación las válvulas cumplieron un rol diferente, describiendo un perfil de trabajo como los que se muestran en las siguientes figuras.



*Figura N° 35: "Perfil de Trabajo Válvula MOV-7120"*

Inicialmente la válvula MOV-7120 se encontraba cerrada, en  $t = 5(s)$  comienza su apertura la cual tiene un tiempo de duración de 140 segundos quedando así completamente abierta en  $t = 145 (s)$  manteniéndose así hasta el término de la simulación generando una descarga constante.

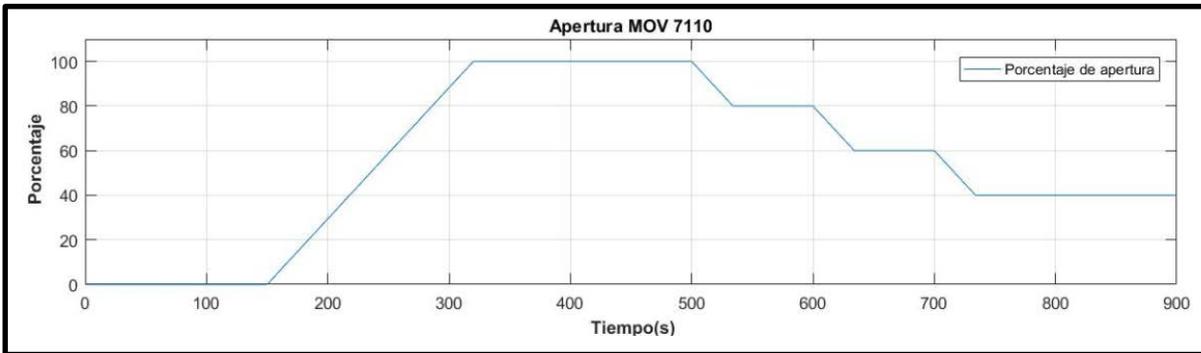


Figura N° 36: "Perfil de Trabajo Válvula MOV-7110"

Mediante la manipulación de la apertura de la válvula MOV-7110 se controló el retorno del fluido hacia el estanque con el fin de generar fenómenos medibles con los que se obtuvieron los valores a comparar. La apertura de la válvula MOV-7110 comienza en  $t = 150$  (s) cuyo tiempo de duración es de 170 segundos quedando completamente abierta en  $t = 320$  (s). Durante 180 segundos se mantuvo esta condición y a partir de  $t = 500$  (s) comenzó el cierre al 80% de su capacidad hasta  $t = 534$  (s). Este porcentaje de apertura se sostuvo durante 66 segundos. En  $t = 600$  (s) comenzó un nuevo cierre de la válvula de duración hasta  $t = 634$  (s) que permitió alcanzar un porcentaje de cierre del 60%, condición que igual se mantuvo durante 66 segundos. Finalmente en  $t = 700$  (s) se dio inicio al último cierre de la válvula logrando el 40% en  $t = 734$  (s). A diferencia de los otros casos, este porcentaje de cierre se sostuvo hasta el término de la simulación. Para facilidad de trabajo se consideró el comportamiento del cierre de la válvula del tipo rampa con un tiempo de apertura desde el 0% al 100% de 170 segundos.

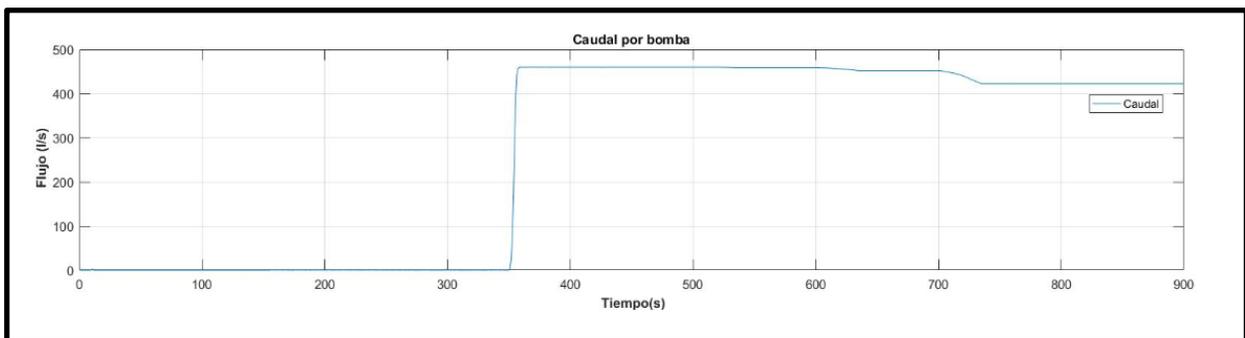


Figura N° 37: "Caudal en la Bomba"

Al inicio de la simulación la bomba se encontraba detenida hasta  $t = 350$  (s) instante donde comienza su operación manteniéndose así hasta el final de la simulación.

#### 4.4.2 Análisis de Resultados de la Simulación.

Teniendo los perfiles de trabajo de las válvulas de regulación y la bomba se obtuvieron las gráficas de presión mostradas a continuación.

##### 4.4.2.1 Ducto de 30”.

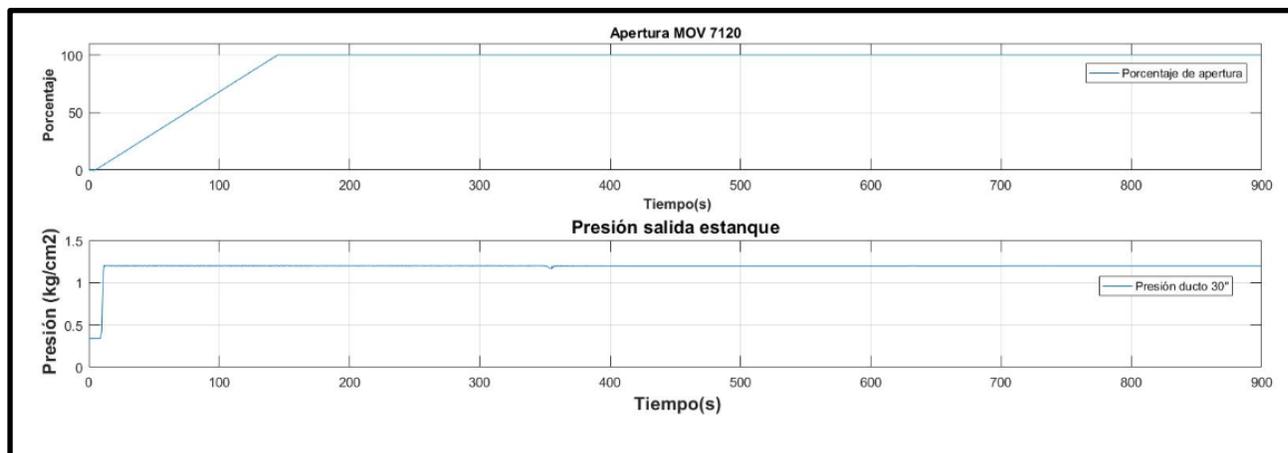


Figura N° 38: "Apertura MOV-7120 v/s Presión en Salida del Estanque"

En esta gráfica se puede observar la presión medida en el ducto de 30" donde se puede apreciar el efecto producido por la apertura de MOV-7120 y la partida de la bomba J-6010. Al instante de la apertura en  $t = 5(s)$  comienza un aumento de presión producido por la descarga del estanque producto de la gravedad sin succión de la bomba, este aumento de presión incrementa hasta llegar a 1,2 ( $kg/cm^2$ ) que es la presión ejercida por el crudo contenido en el estanque. Mantiene esta condición hasta el instante  $t = 350 (s)$ , momento en el que se produce la partida de la bomba generando una succión que a su vez produce una caída de presión (ver figura N°39), durante un breve instante de tiempo retomando su valor de presión anterior.

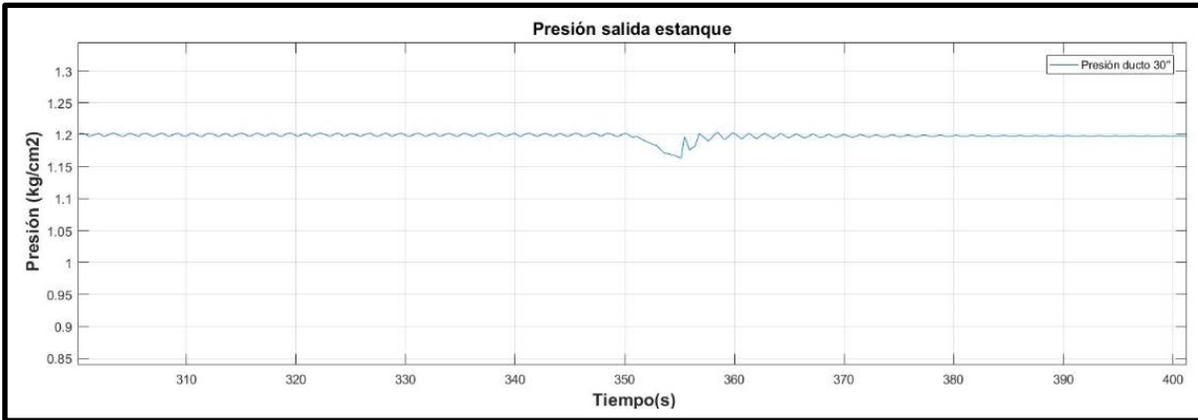


Figura N° 39: "Caída de Presión en Ducto de 30"

#### 4.4.2.2 Ducto 12".

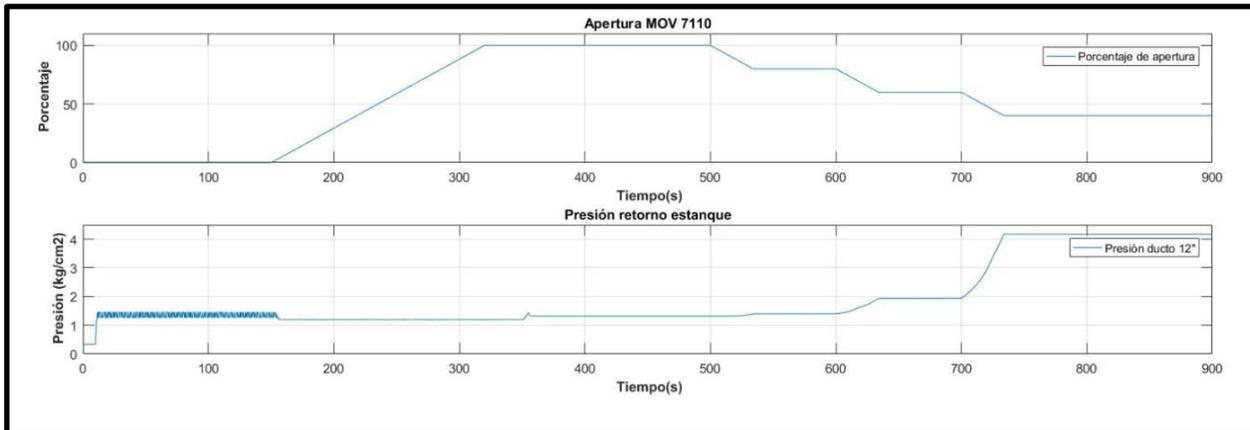


Figura N° 40: "Apertura MOV-7110 v/s Presión de Retorno al Estanque"

En la gráfica de la figura N°40 se observa una variación de presión desde  $t = 5(s)$  a  $t = 150(s)$  producto de la apertura de MOV-7120, esta presión tiene un comportamiento oscilatorio debido a que el fluido se encuentra con una válvula cerrada, produciendo un efecto similar al golpe de ariete. Al dar comienzo a la apertura de la válvula, pasado el instante  $t = 150(s)$ , la presión disminuye debido al paso del fluido, bajando a un valor de  $1,2 (kg/cm^2)$ , que corresponde a la presión del sistema sin acción de la bomba.

En el instante  $t = 350(s)$  se produjo la partida de la bomba, generando un alza en la presión que alcanza un peak de  $1,45 (kg/cm^2)$ , para luego estabilizarse en  $1,3 (kg/cm^2)$ . Se mantiene esta condición hasta  $t = 500(s)$ , momento en el que comienza el cierre de la válvula al 80% de su capacidad, lo que se traduce en un aumento de la presión hasta  $1,4 (kg/cm^2)$  (ver Figura N°41). Del mismo modo en los instantes  $t = 600(s)$  y  $t = 700(s)$  se producen aumentos de presiones por los cierres al 60% y 40 % respectivamente, alcanzando valores de  $1,95 (kg/cm^2)$  y  $4,18 (kg/cm^2)$  para cada caso (ver Figura N°42).

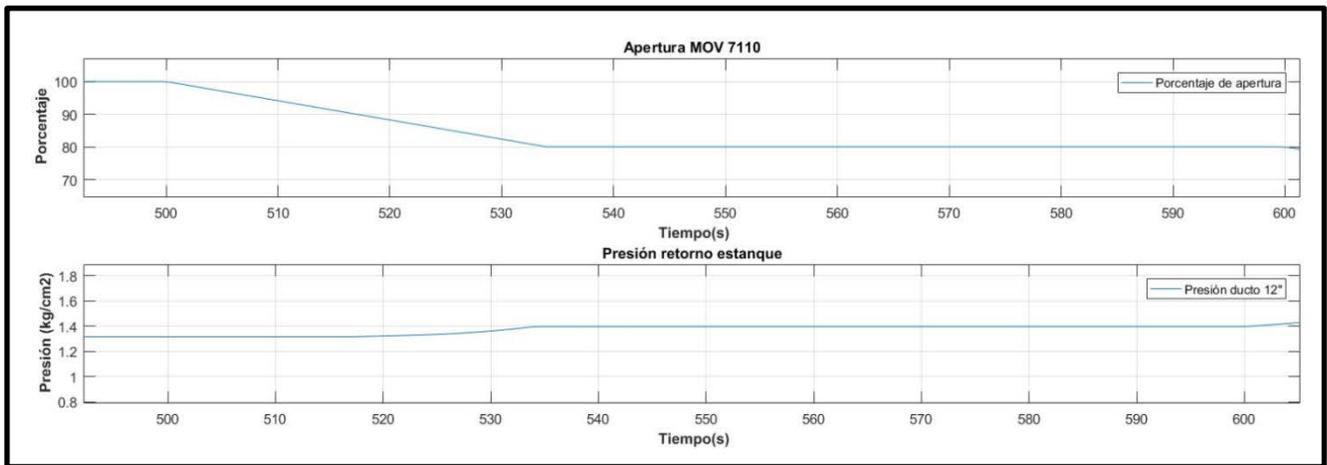


Figura N° 41: "Aumento de Presión Ducto 12" con MOV-7110 al 80%"

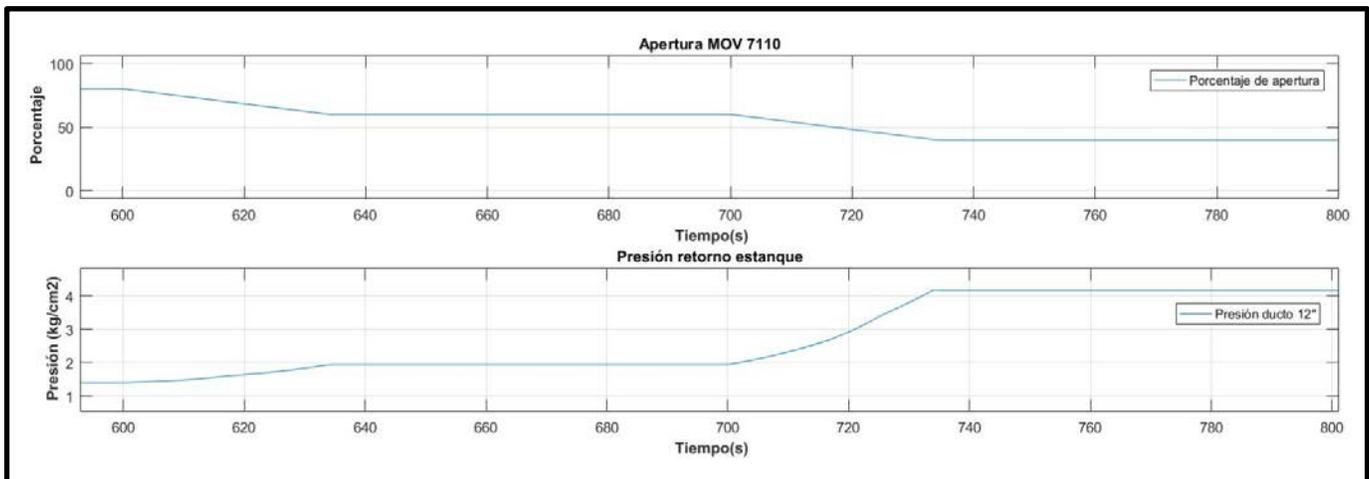


Figura N° 42: "Aumento de Presión Ducto 12" con MOV-7110 al 60% y 40%"

#### 4.4.2.3 Succión y Descarga de la Bomba.

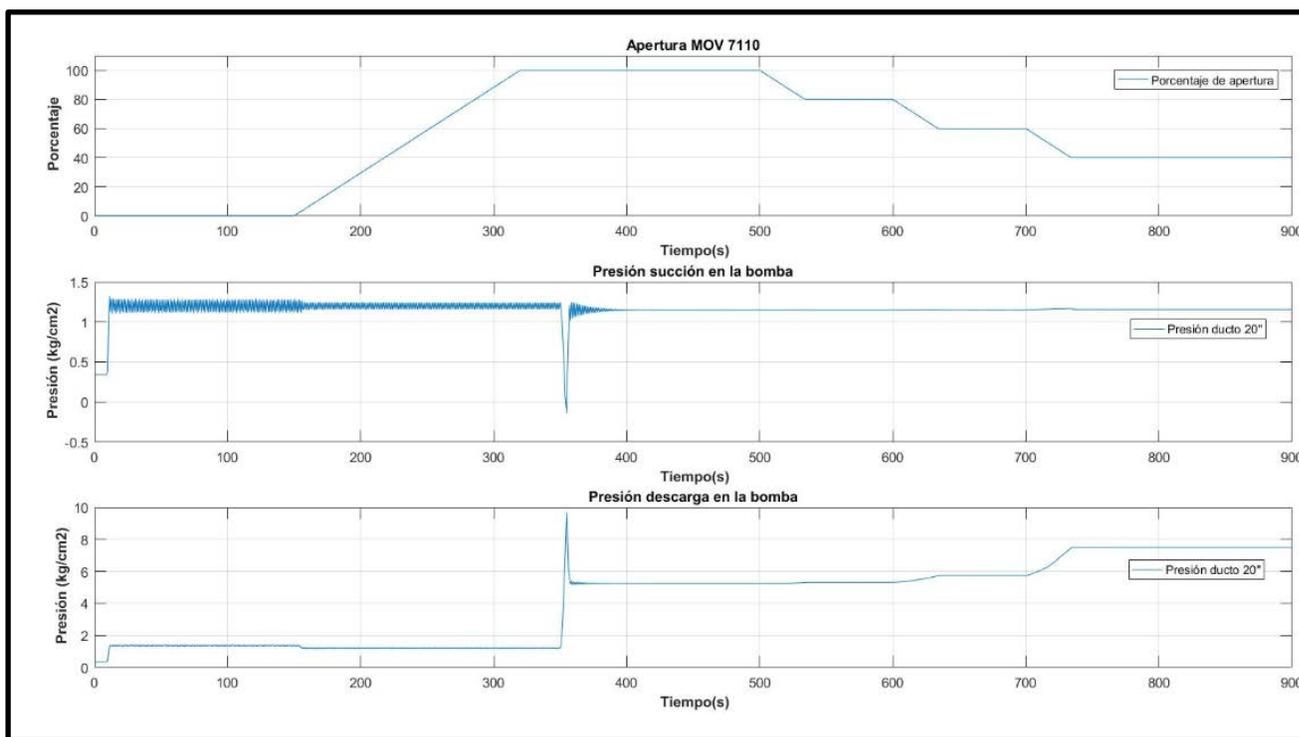


Figura N° 43: "Gráfica de Presión de Succión y Descarga de la Bomba"

Para los instantes  $t = 5(s)$  y  $t = 150(s)$  se observa el mismo fenómeno descrito anteriormente producido por la apertura de MOV-7120 y MOV 7110 respectivamente. Al momento de la partida de la bomba en  $t = 350(s)$  en la succión se produce una disminución de presión con un peak de  $-0,14 (kg/cm^2)$  estabilizándose en un valor de presión de  $1,15 (kg/cm^2)$ , y en la descarga un aumento de presión con un peak de  $9,7 (kg/cm^2)$  para luego estabilizarse en  $5,25 (kg/cm^2)$ . Para los cierres de MOV-7110 a su 80%, 60% y 40% se registran los valores de  $5,3 (kg/cm^2)$ ,  $5,75 (kg/cm^2)$  y  $7,5 (kg/cm^2)$  manteniendo este valor al final de la simulación.

#### 4.4.2.4 Transmisor de Presión (PT 01).

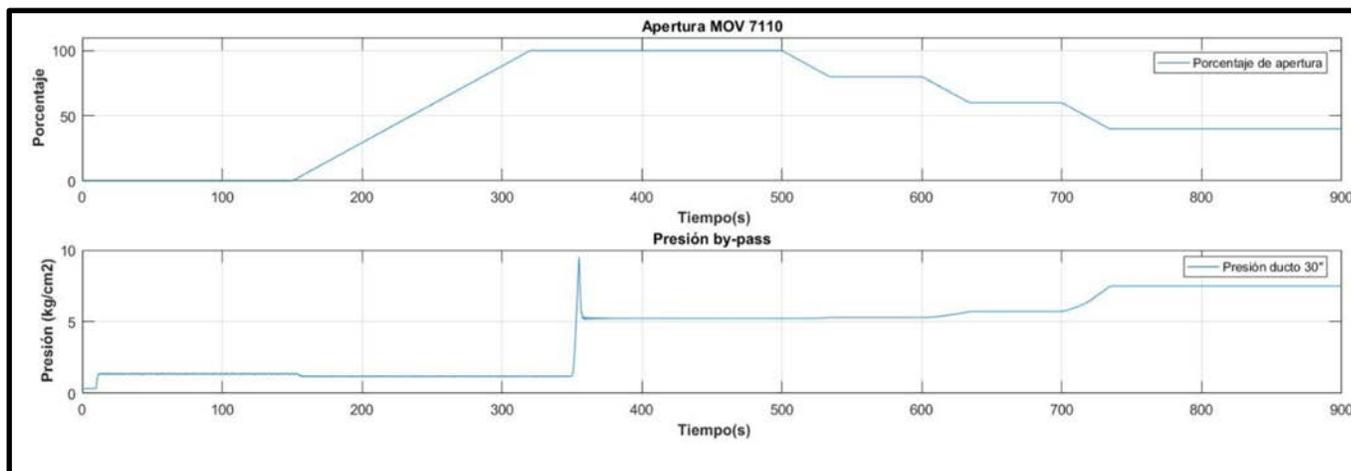


Figura N° 44: "Gráfica de Presión Registradas desde Sala de Control"

El registro de las presiones en este punto es el mismo que se registró en la descarga de la bomba debido a la proximidad de los puntos de medición, alcanzando el mismo peak de presión en la partida de la bomba y un mismo comportamiento ante el cierre de la válvula MOV-7110.

#### 4.5 Comparación de Resultados.

Realizada la simulación y con la obtención de los registros de presión en los diferentes casos, el siguiente paso es comparar estos registros con los obtenidos experimentalmente mostrados en las siguientes tablas.

Ducto de 30"	Experimental	Simulación	Tasa de error
En reposo	1.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0 Kg/cm <sup>2</sup>	1.3
Apertura MOV-7120	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.2 Kg/cm <sup>2</sup>	0.2
Partida Bomba	-	1.16 Kg/cm <sup>2</sup>	1.16
Bomba en Régimen Permanente	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.2 Kg/cm <sup>2</sup>	0.2

Tabla N° 13: "Comparación de Registros en el Ducto de 30" "

Ducto 12''	Experimental	Simulación	Tasa de error
En Reposo	0	0.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0.3
Apertura MOV-7120	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.4 Kg/cm <sup>2</sup>	0.4
Apertura MOV-7110	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.2 Kg/cm <sup>2</sup>	0.2
Partida Bomba	-	1.45 Kg/cm <sup>2</sup>	-
Bomba en Régimen Permanente	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0.3
Cierre MOV-7110 al 80%	1.5 Kg/cm <sup>2</sup>	1.4 Kg/cm <sup>2</sup>	0.1
Cierre MOV-7110 al 60%	2 Kg/cm <sup>2</sup>	1.95 Kg/cm <sup>2</sup>	0.05
Cierre MOV-7110 al 40%	6 Kg/cm <sup>2</sup>	4.18 Kg/cm <sup>2</sup>	1.82

Tabla N° 14: "Comparación de Registros Ducto 12'' "

Succión Bomba	Experimental	Simulación	Tasas de error
En reposo	1.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0 Kg/cm <sup>2</sup>	1.3
Apertura MOV-7120	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0.3
Apertura MOV-7110	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.2 Kg/cm <sup>2</sup>	0.2
Partida Bomba	-	-0.14 Kg/cm <sup>2</sup>	-0.14
Bomba en Régimen Permanente	1 Kg/cm <sup>2</sup>	1.15 Kg/cm <sup>2</sup>	0.15

Tabla N° 15: "Comparación de Registros en la Succión de la Bomba"

Descarga Bomba	Experimental	Simulación	Tasa de error
En reposo	0	0.4 Kg/cm <sup>2</sup>	0.4
Apertura MOV-7120	0	1.4 Kg/cm <sup>2</sup>	1.4
Apertura MOV-7110	0	1.2 Kg/cm <sup>2</sup>	1.2
Partida Bomba	-	9.7 Kg/cm <sup>2</sup>	-
Bomba en Régimen Permanente	5.6 Kg/cm <sup>2</sup>	5.25 Kg/cm <sup>2</sup>	0.35
Cierre MOV-7110 al 80%	5.6 Kg/cm <sup>2</sup>	5.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0.3
Cierre MOV-7110 al 60%	6 Kg/cm <sup>2</sup>	5.75 Kg/cm <sup>2</sup>	0.25
Cierre MOV-7110 al 40%	8 Kg/cm <sup>2</sup>	7.5 Kg/cm <sup>2</sup>	0.5

Tabla N° 16: "Comparación de Registros en la Descarga de la Bomba"

Sala de Control	Experimental	Simulación	Tasa de error
En reposo	0	0.4 Kg/cm <sup>2</sup>	0.4
Apertura MOV-7120	-	1.4 Kg/cm <sup>2</sup>	-
Apertura MOV-7110	-	1.2 Kg/cm <sup>2</sup>	-
Partida Bomba	-	9.7 Kg/cm <sup>2</sup>	-
Bomba en Régimen Permanente	6 Kg/cm <sup>2</sup>	5.25 Kg/cm <sup>2</sup>	0.75
Cierre MOV-7110 al 80%	6.1 Kg/cm <sup>2</sup>	5.3 Kg/cm <sup>2</sup>	0.8
Cierre MOV-7110 al 60%	6.7 Kg/cm <sup>2</sup>	5.75 Kg/cm <sup>2</sup>	0.95
Cierre MOV-7110 al 40%	9 Kg/cm <sup>2</sup>	7.5 Kg/cm <sup>2</sup>	1.5

Tabla N° 17: "Comparación de Registros en la Sala de Control"

La simulación considera los ductos inicialmente sin crudo, registrándose una presión con un valor negativo debido a la succión que genera el vacío en los ductos presentes en el trayecto del flujo, a diferencia del proceso original en el que no se registró esta presión negativa, ya que los ductos contenían crudo antes de la apertura de la válvula.

Al comparar las tablas de las mediciones experimentales con las obtenidas mediante la simulación y analizando las gráficas, se puede observar que son valores similares y con un comportamiento esperado, identificando alzas y caídas de presión correspondientes a la dinámica de un proceso de este tipo.

## CAPITULO 5: SIMULACIÓN DE CASOS PARTICULARES.

En consideración de los resultados obtenidos en el capítulo anterior que respaldan el comportamiento de la planta en la simulación, en el desarrollo de este capítulo se procederá a simular dos casos particulares, el cierre abrupto de válvulas, y el cambio de ubicación de la estación de bombeo, con el objetivo de entregar de forma gráfica y detallada las consecuencias de cada una de ellas, proporcionando así una herramienta que permita al oleoducto estudiar y analizar eventos puntuales previo a que requieran intervenir el proceso.

### 5.1 Cambio de Ubicación de Bombas para la Descarga.

El proceso de descarga de crudo hacia las dependencias del oleoducto se realiza mediante el uso de las bombas disponibles en los buques que llegan al puerto de San Vicente. En cada descarga, el oleoducto resume detalladamente en un informe los parámetros medibles que se obtienen durante todo el tiempo que toma el proceso.

Los siguientes parámetros corresponden a la descarga de crudo de tipo LULA realizada en abril del presente año.

Hora	Datos Estanque			Descarga		
	Altura (m)	Volumen (m3)	Caudal (M3/Hr)	Volumen Descargado (m3)	Presión (Kg/cm2)	Potencia estimada bomba (KW)
8:05	2,638	9.655,927	-	-	-	-
9:00	3,321	12.067,344	2.411,417	2.411,417	0,70	158,97
10:00	4,052	14.648,298	2.580,954	4.992,371	0,77	194,92
11:00	4,811	17.328,111	2.679,813	7.672,184	0,84	218,19
12:00	5,542	19.909,065	2.580,954	10.253,138	0,89	194,92
13:00	6,271	22.484,296	2.575,231	12.828,369	0,95	193,63
14:00	7,006	25.081,385	2.597,089	15.425,458	1,02	198,60
15:00	7,742	27.678,853	2.597,468	18.022,926	1,06	198,69
16:00	8,445	30.166,748	2.487,895	20.510,821	1,03	174,59
17:00	9,128	32.580,318	2.413,570	22.924,391	1,10	159,40
18:00	9,844	35.110,487	2.530,169	25.454,560	1,15	183,64
19:00	10,553	37.615,920	2.505,433	27.959,993	1,20	178,30
20:00	11,258	40.107,960	2.492,040	30.452,033	1,26	175,46
21:00	11,961	42.593,833	2.485,873	32.937,906	1,31	174,16
22:00	12,696	45.196,669	2.602,836	35.540,742	1,38	199,92
22:28	12,956	46.112,703	916,034	36.456,776	-	-

Tabla N° 18: "Parámetros Medidos en Descarga de Crudo LULA"

Con los valores de los parámetros proporcionados en el informe del oleoducto, se puede apreciar la dinámica de la descarga mediante las variaciones de presión que se obtienen en un punto específico, y la variación del volumen de crudo descargado en relación al volumen que va siendo depositado en el estanque.

Debido a que el OTEP ya no opera como lo hiciera en su inicio, algunos componentes y partes del proceso de la planta ya no se utilizan. Una de estas es la estación de bombeo. De acá nace la idea de poder migrar esta estación desde el interior de la planta hacia la bahía San Vicente, con el propósito de utilizarla para el bombeo del crudo que llega desde los buques, sin tener que recurrir a las bombas que los propios buques traen incorporadas.

Mediante la simulación de la migración de la estación de bombeo y teniendo los antecedentes de descarga utilizando las bombas de los buques presentados en la tabla N°17 como referencia, podremos observar como interviene esta modificación en la dinámica del sistema, realizar un análisis técnico comparando los valores de presión, flujo, potencia y tiempos de operación, para determinar si es factible realizar esta modificación.

### 5.1.1 Resultados de la Migración de la Estación de Bombeo en la Simulación.

Una vez que hemos realizado las modificaciones y configuración del nuevo modelo en el software, ubicando la estación de bombeo al principio de la descarga para conectarla a los buques que llegan a la bahía, y contemplando una descarga de crudo del mismo tipo y volumen con el cual se obtuvieron los parámetros de la tabla N°17, es decir, crudo del tipo LULA y un volumen total a descargar de 37.320, los resultados obtenidos se muestran en los gráficos de las siguientes figuras.

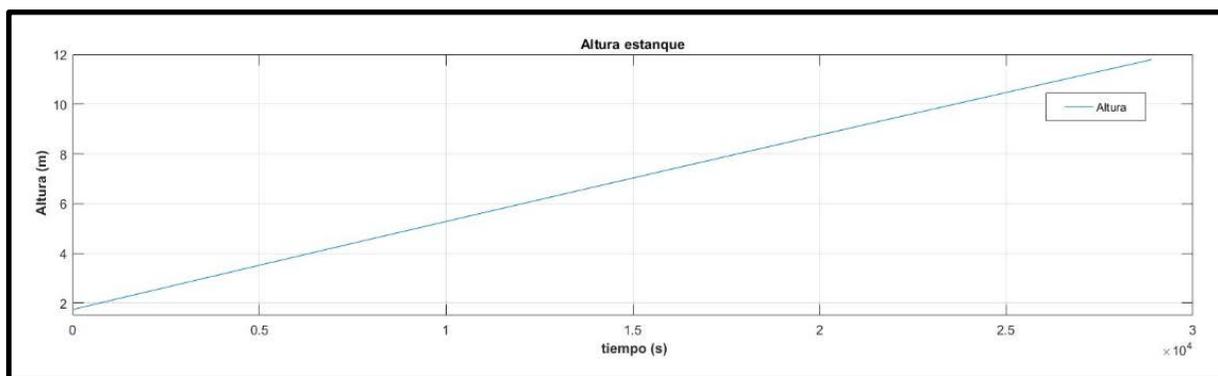


Figura N° 45: "Nivel de Crudo en el Estanque durante la Descarga"

Previo al comienzo de la descarga, el estanque presenta un nivel inicial inferior a los 2 metros. Al iniciar la descarga y en conjunto con la acción de las bombas, el nivel comienza

a subir linealmente alcanzando una altura final de 12 metros luego de que transcurriesen 28.900 segundos.

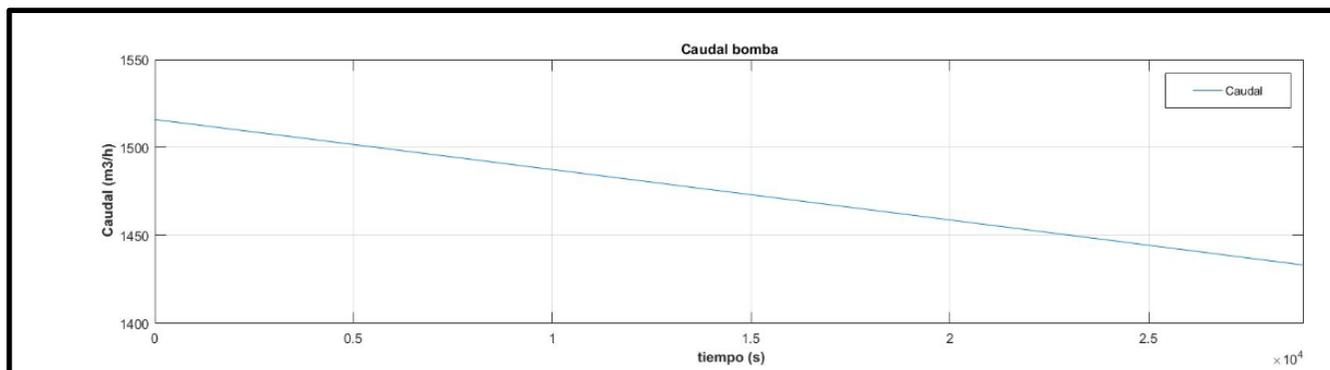


Figura N° 46: "Caudal a través de una Bomba"

El gráfico de la figura N°46 muestra el caudal que circula por una de las bombas en la estación de bombeo a medida que transcurre la descarga. Se puede apreciar una variación en el caudal a medida que aumenta la carga en la bomba, con un promedio de 1474,60027  $m^3/h$  por cada bomba.

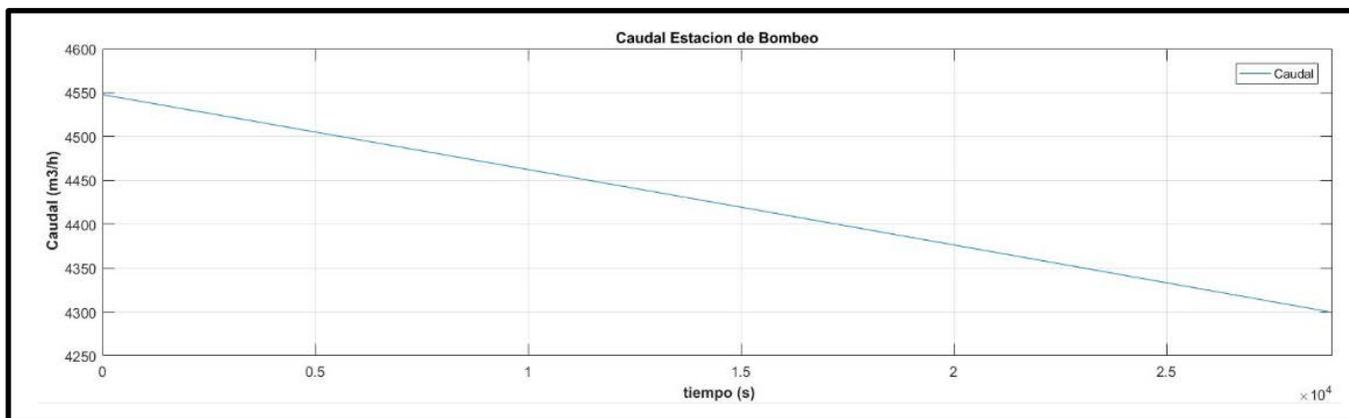


Figura N° 47: "Caudal a través de la Estación de Bombeo"

Análogamente se presenta el caudal que circula en la estación de bombeo compuesto por tres bombas de iguales características en paralelo, que presenta la misma dinámica vista en la gráfica de la figura N°47 con un caudal promedio de 4423,8608  $m^3/h$ .

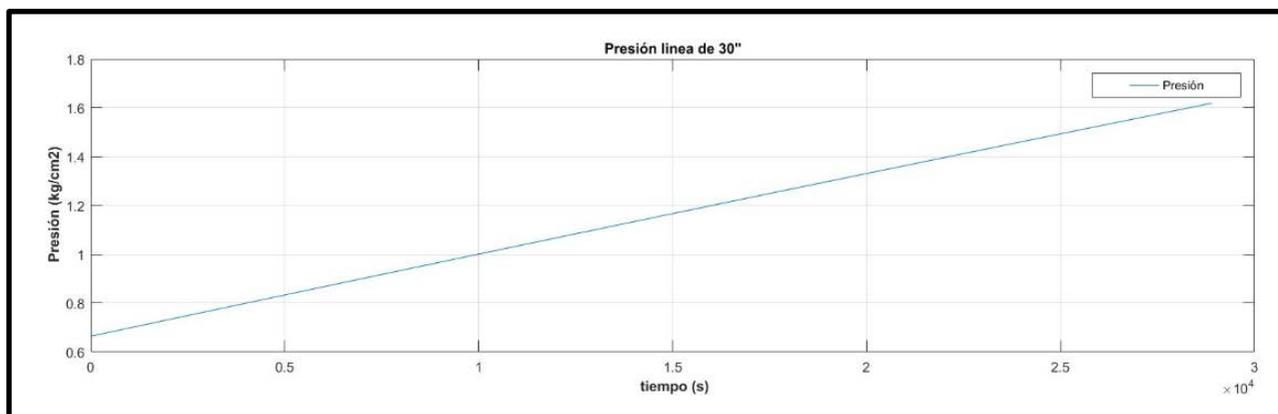


Figura N° 48: "Variación de Presión en el Ducto de 30" durante la Descarga"

De la gráfica se observan variaciones de presión que van desde los 0,664 kg/cm<sup>2</sup> a los 1,619 kg/cm<sup>2</sup> a medida que transcurre la descarga.

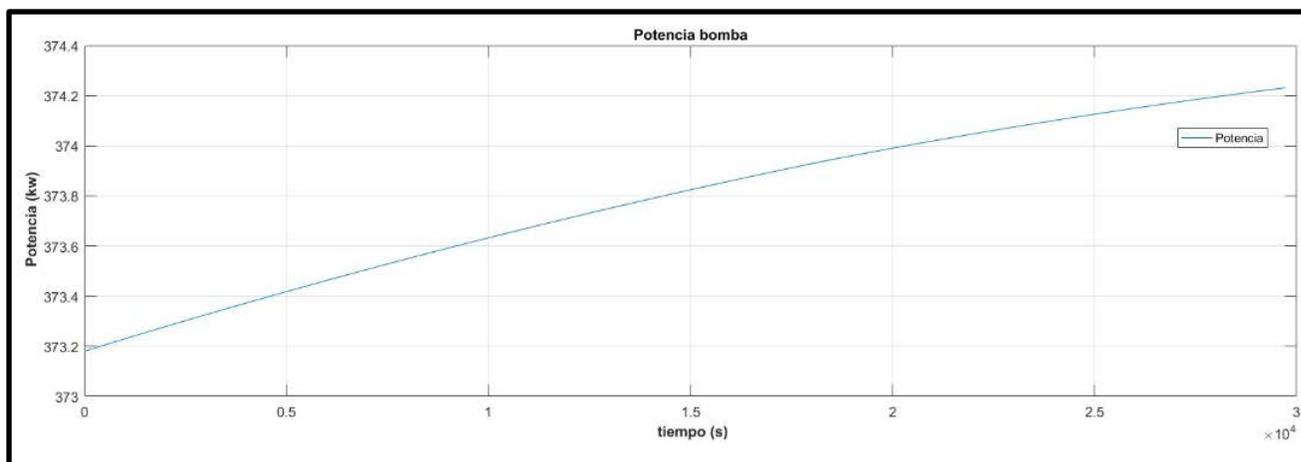


Figura N° 49: "Potencia del Eje del Motor de Una Bomba de la Estación de Bombeo"

La gráfica de la figura N°49 corresponde a la potencia en el eje del motor de una de las bombas de la estación de bombeo. Se puede apreciar una variación en la potencia a medida que aumenta la carga sobre la bomba.

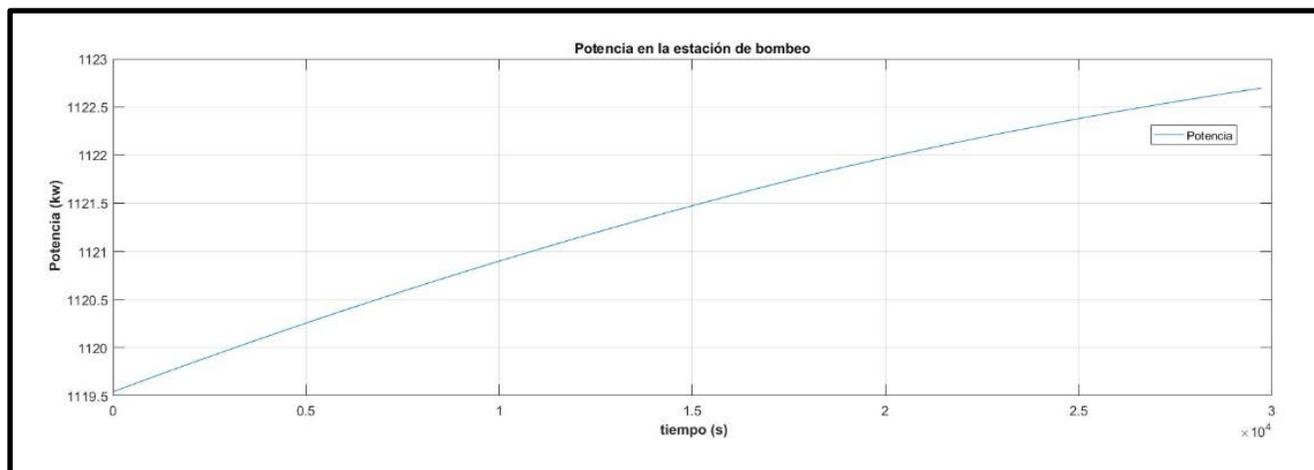


Figura N°50: "Potencia en el Eje del Motor de la Estación de Bombeo"

La figura N°50 muestra el gráfico de la potencia del eje del motor de la estación de bombeo, compuesta por las tres bombas J-6010, J-6011, J-6012.

A continuación, con el propósito de hacer una comparación de los resultados obtenidos, se creó un informe de descarga similar al que se utiliza en el oleoducto.

Hora	Datos Estanque			Descarga		
	Altura (m)	Volumen (m3)	Caudal (M3/Hr)	Volumen Descargado (m3)	Presión (Kg/cm2)	Potencia bombas (KW)
0	1,738	6.149,553	-	-	-	1.119
1:00	3,021	10.684,6555	4.517,13231	4.517,13231	0,78	1.120
2:00	4,295	15.192,1121	4.486,37466	9.003,50697	0,9	1.120
3:00	5,561	19.668,7392	4.455,55041	13.459,05738	1,027	1.120
4:00	6,818	24.114,4692	4.424,65929	17.883,71	1,147	1.121
5:00	8,067	28.529,2364	4.393,70058	22.277,41725	1,265	1.121
6:00	9,306	32.912,9701	4.362,6753	26.640,09255	1,383	1.122
7:00	10,537	37.265,6077	4.331,58213	30.971,67468	1,5	1.122
8:00	11,759	41.587,0785	4.300,42104	35.272,0957	1,616	1.122

Tabla N° 19: "Parámetros de Descarga Medidos en Simulación"

	Datos Estanque			Descarga			
	Promedio $\Delta$ Altura (m/h)	Promedio $\Delta$ Volumen (m3/h)	Promedio Caudal (m3/h)	Promedio $\Delta$ Volumen Descargado (m3/h)	Promedio Presión (Kg/cm2)	Promedio de potencia (KW)	Tiempo total de descarga (h)
Real	0,688	2.538,624	2.430,452	2.431,811	1,05	185,96	15
Simulada	1.2483	4.414,63185	4.409,01197	4.414,63185	1,20225	1.120	8

Tabla N° 20: "Comparación de Parámetros"

En la tabla N°20 se realiza una comparación entre los parámetros medidos y los obtenidos mediante la simulación. Para facilitar el análisis se presentan los datos como un promedio por hora del parámetro medido, es decir, por ejemplo se calculó un  $\Delta$  de altura por cada hora y luego se promedió para realizar la comparación.

Al no conocer las bombas que poseen los buques de descarga, y los datos eléctricos de las mismas, se realizó una estimación del valor de potencia a partir de los datos con los que se entregan en el informe de descarga. La fórmula para la estimación realizada en la tabla N°18 se muestra a continuación.

$$N_{bombeo} = \frac{\Delta P(Kg/m^2) \times V_{media}(m^3/s)}{75 \left( \frac{kg \ m}{s \ HP} \right)}$$

Donde:

$N_{bombeo}$ : Potencia de la bomba en HP

$\Delta P$ : Pérdida por fricción

$V_{media}$ : Velocidad media del fluido

El valor obtenido de esta fórmula se multiplica por la eficiencia de la bomba y se transforma la unidad de HP a KW.

Una vez realizado el cálculo se obtiene el promedio de potencia de bombeo del buque y se compara con el promedio de potencia de la estación de bombeo obtenida en la simulación.

Considerando los datos presentados en la tabla de comparación N°20, al realizar la migración de la estación de bombeo, se reduciría el tiempo de descarga total un 53% del tiempo que toma actualmente. Consecuentemente también hay un aumento de flujo de un 55.2% manteniendo las condiciones de operación similares a las que opera el OTEP.

Con respecto al consumo de potencia, se debe considerar que la estación de bombeo está compuesta por tres bombas, cada uno con un consumo promedio aproximado de 370 KW, generando un aumento del consumo cercano al 600% en comparación al consumo estimado de las bombas dispuestas en los buques. Este es un factor importante a considerar al momento de tomar una decisión de la viabilidad del proyecto. Mediante los resultados y

simulaciones obtenidos en la migración, se proporciona la información necesaria para que el OTEP realice un estudio de factibilidad de llevar a cabo este cambio en su proceso.

## 5.2 Cierre Abrupto de Válvula Durante la Descarga.

Para realizar el análisis del golpe de ariete e identificar las variaciones de presión que se generan a partir de este fenómeno, durante la simulación de la descarga de crudo se intervino una válvula modificando su tiempo de cierre con la intención de obtener un cierre abrupto.

Es posible configurar la válvula con cualquier tiempo que se estime, pero para que sea considerado un cierre abrupto es necesario que se cumpla la siguiente condición.

$$t < \frac{2 * L}{a}$$

Donde:

$L$ : Longitud de la tubería.

$a$ : Velocidad de la onda de presión en la tubería (celeridad).

Para el caso de nuestra simulación, la longitud de la tubería es de 7.600  $m$  y la celeridad de la onda de presión corresponde a 1.208,1022  $m/s$ . Establecidos estos valores, el tiempo para un cierre abrupto de la válvula debe ser  $t < 12.58 s$ .

En base a esta consideración procedimos a simular el cierre de la válvula MOV-7220 quien regula el paso del crudo desde la bahía San Vicente a las dependencias del oleoducto. Teniendo en cuenta que para un cierre abrupto el tiempo debe ser menor a los 12.58 segundos, se le asignó un tiempo de cierre de 5 segundos a la válvula.

La operación de la válvula en la descarga es inicialmente abierta, es decir 100 % de apertura. Una vez transcurrido una hora de descarga (3600 segundos), se realiza el cierre de la válvula, pasando del 100 % al 0 % de apertura en los 5 segundos previamente justificados. La válvula permanece en este estado durante media hora (1800 segundos), para luego volver a su condición de 100 % de apertura, manteniendo esta condición hasta el final de la descarga, como se muestra en la siguiente gráfica.

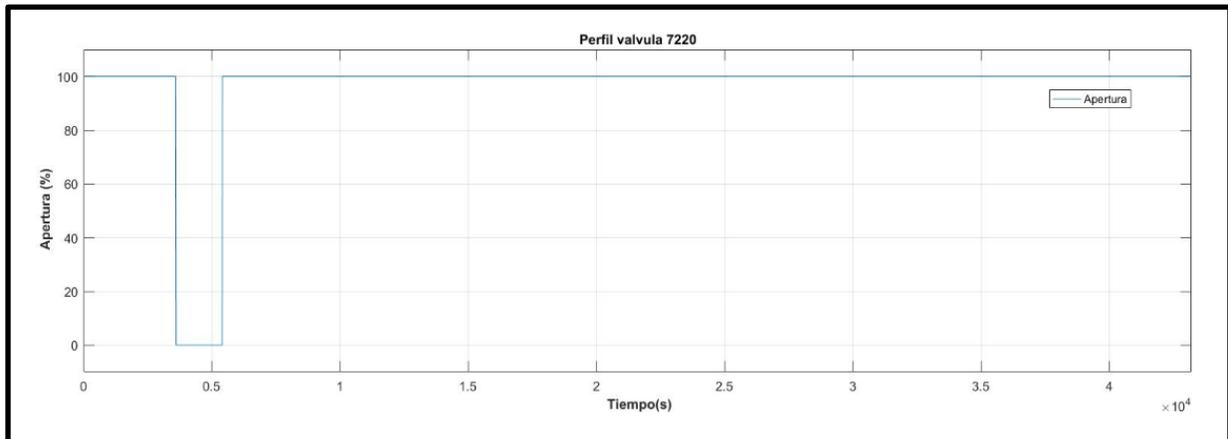


Figura N°51: “Perfil de Trabajo MOV-7220”

La operación de la bomba encargada de impulsar el crudo desde la bahía, es inicialmente en funcionamiento. En los 3605 segundos se detiene debido al alza de presión producido por el cierre abrupto de MOV-7220. Continúa detenida durante todo el tiempo que la válvula se encuentra cerrada (1800 segundos), y una vez que se da inicio a la apertura de la válvula (5405 segundos), la bomba vuelve a ser puesta en funcionamiento, incrementando el valor del caudal paulatinamente, perfil de trabajo que queda descrito en la siguiente gráfica.

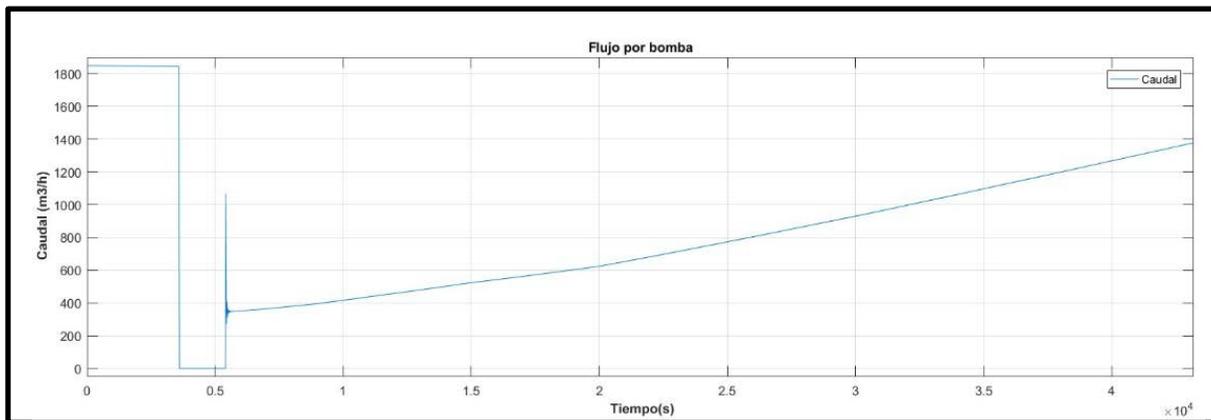


Figura N°52: “Perfil de Trabajo de la Bomba”

Una vez definidos los perfiles de trabajo de la válvula y la bomba, a continuación se presentan los resultados de la simulación, donde se pueden observar las variaciones de nivel de estanque de almacenamiento T-6030, el estanque del buque, y las variaciones de presión producidas por el cierre de la válvula MOV-7220.

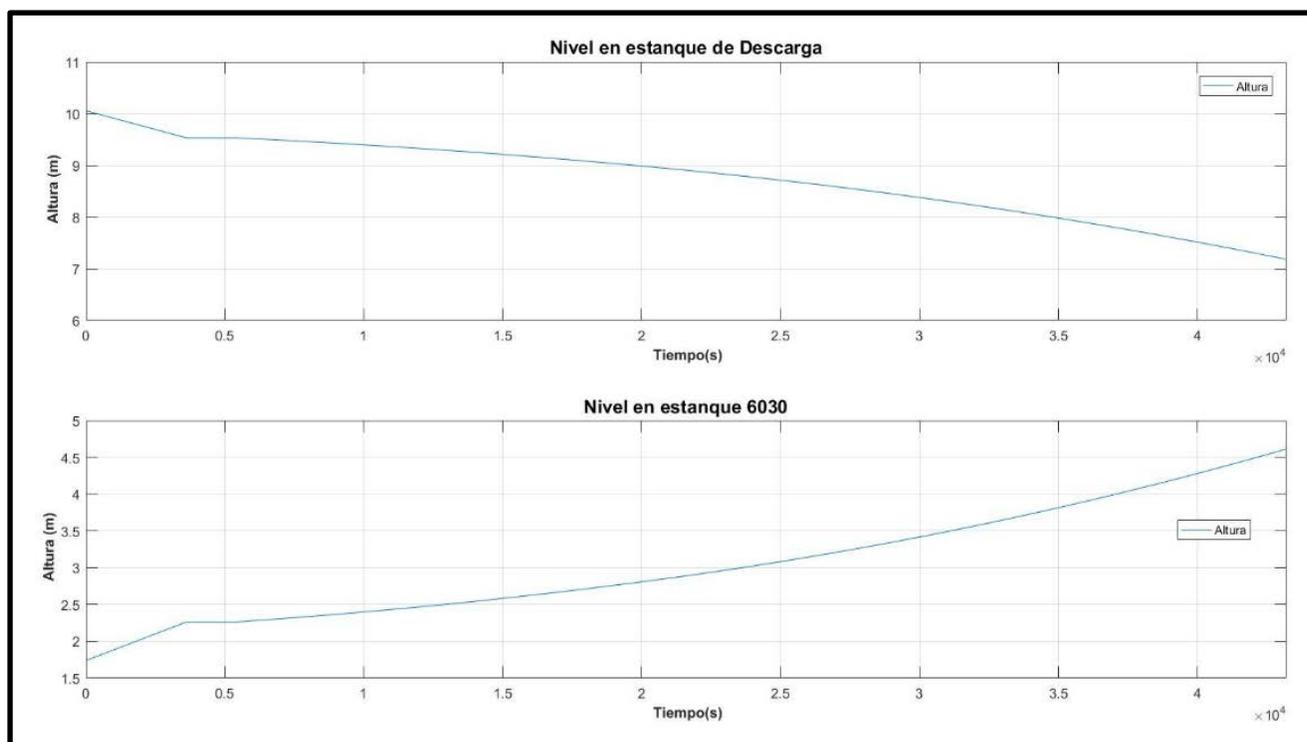


Figura N°53: "Altura en Estanque T-6030 y Estanque de Descarga"

Inicialmente se observan los niveles que posee cada estanque con las cotas que fueron establecidas de acuerdo al informe proporcionado por el oleoducto. A medida que se da inicio a la descarga los niveles comienzan a variar. El estanque de descarga del buque baja su nivel produciendo un aumento de nivel en el estanque de almacenamiento, comportamiento lógico y que se desarrolla con total normalidad dentro de la primera hora de descarga. Al llegar al instante en que se produce el cierre de la válvula de regulación MOV-7220 (3605 segundos), la variación de los niveles en los estanques se detiene debido a que no hay tránsito de fluido, lo que se observa en las gráficas de la figura N°53 entre los 3605 y 5405 segundos. Una vez que se restablece el tránsito del crudo al dar apertura a la válvula de regulación, la variación de los niveles continúa de manera normal, aumentando el nivel del estanque de almacenamiento T-6030 de forma proporcional a la que se descarga el estanque del buque.

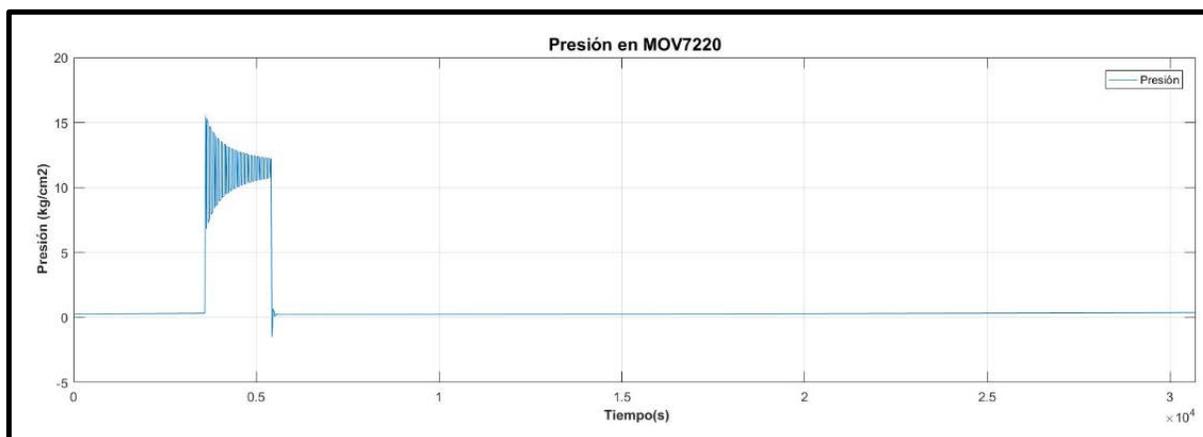


Figura N°54: "Variaciones de Presión en MOV-7220"

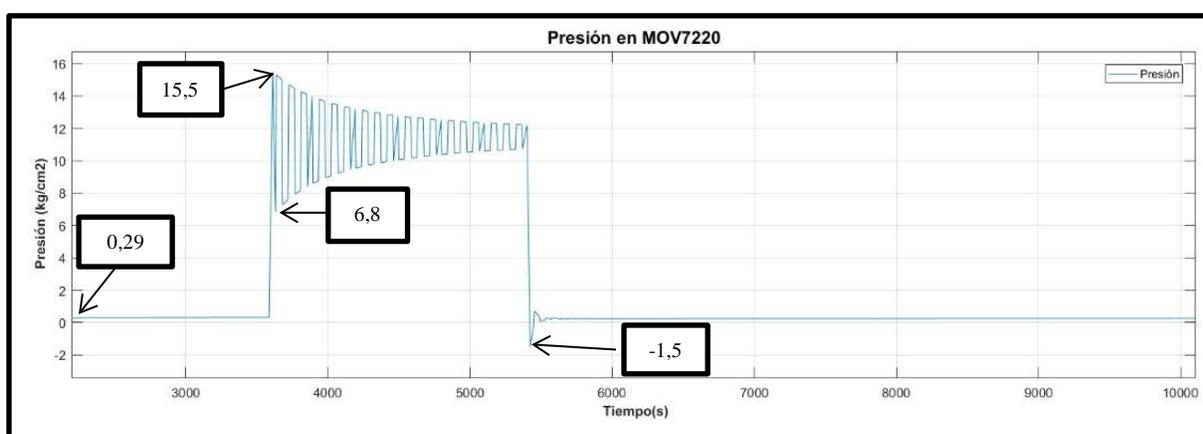


Figura N° 55: "Acercamiento Variaciones de Presión en MOV-7220"

De la figura N°54 se observa las variaciones de presión en el sistema producidas por la descarga de crudo y el cierre de la válvula MOV-7220. Con el fin de observar de mejor forma estas variaciones, se realizó un acercamiento al fenómeno de interés, que corresponde particularmente al cierre abrupto de la válvula de regulación, representado en la figura N°55. En esta se observa que en su operación normal, dentro de los primeros 3600 segundos, la presión se mantiene en  $0,29 \text{ Kg/cm}^2$ . Al momento de producirse el cierre de la válvula en un breve instante de tiempo (5 segundos), se produce una oscilación de presión que se va atenuando paulatinamente a medida que transcurre el tiempo, con un registro máximo de presión de  $15,5 \text{ Kg/cm}^2$  y un mínimo de  $6,8 \text{ Kg/cm}^2$ . En el instante en el que se realiza la apertura de la válvula se registra una depresión que llega a un mínimo de  $-1,5 \text{ Kg/cm}^2$  seguido de una leve oscilación hasta alcanzar el valor normal de presión y mantenerse así hasta finalizar la descarga.

## **CAPITULO 6: CONCLUSIONES.**

Durante el desarrollo de este proyecto de título, para cumplir los objetivos propuestos establecimos una estructura de desarrollo que contempla en primera instancia, realizar un levantamiento técnico de la planta, además de un estudio de la dinámica y la teoría involucrada en el proceso que se desarrolla actualmente en el Oleoducto Trasandino Estenssoro Pedrals. Teniendo en cuenta esto, y los requerimientos solicitados por el ingeniero de la planta, se realizó una búsqueda y posterior selección de un software que permitiera simular la planta en su forma más representativa. Una vez completada la selección del software, se hizo un modelo representativo de la planta cuya validación fue realizada experimentalmente. Concluyendo la validación se simularon dos casos particulares que eran de especial interés de estudio, los cuales fueron, la migración de la estación de bombeo, y el cierre abrupto de una válvula en un proceso normal de descarga.

Para facilitar la presentación de las conclusiones, estas se muestran con la misma estructura con la que se desarrolló este proyecto de título.

### **6.1 Levantamiento Técnico de la Planta, Estudio de la Dinámica y Teoría Involucrada en el Proceso.**

En la actualidad la planta está operando en condiciones para la cual no fue diseñada, en donde hay elementos que no están en funcionamiento, además de no contar con una documentación adecuada del proceso que permita instruir a los nuevos operadores.

Sobre la base de esto se realizó un levantamiento físico y técnico, ya que la planta fue intervenida agregando un nuevo estanque y nuevos elementos que no estaban documentados en los planos originales de la planta.

Además, para entender bien el proceso se debió hacer un estudio detallado de todas las singularidades que se dan en la dinámica de este proceso en particular, donde cobra gran importancia las condiciones de operación en la planta, el fluido con el cual se trabaja y los componentes presentes.

### **6.2 Selección de Software.**

Existe una gran variedad de programas disponibles en el mercado y cada uno con sus características particulares, pero no todos satisfacen la necesidad para nuestro objetivo. Para conseguir un programa especializado, es necesario obtener licencias pagas dentro de lo cual no contábamos con recursos necesarios, por lo que nos enfocamos en programas libres de licencia de pago.

Una de las principales diferencias entre los programas es como presentan los resultados. En este punto dentro de los que comparamos, la gran diferencia entre ellos es que trabajan en estado permanente y no en estado transitorio que era nuestro interés.

La interfaz de diseño también es un aspecto a considerar, ya que debe ser clara y amigable para el usuario final, donde nuestro objetivo es que sea una herramienta para realizar instrucciones a los nuevos operadores.

Finalmente para interpretar correctamente los resultados, fue necesario conocer la forma en la cual el software modela y resuelve las operaciones diseñadas, obligando a introducirnos en la operación matemática que realiza el software.

### **6.3 Validación y Simulación de Casos Particulares.**

En la práctica la adquisición de datos se hace difícil ya que no se puede intervenir el proceso. Hay mucho dinero involucrado y cada intervención se traduce en costo que para la industria petrolera es bastante elevado. Por lo cual para realizar la validación de nuestro modelo simulado, se trabajó con variables de presión y altura, obligando a estimar los valores de flujo en base a los datos técnicos proporcionados de las bombas que operan en la planta.

Al ser un sistema simple y sin variaciones de cota de niveles entre cada componente, las pérdidas prácticamente son despreciables.

A pesar de las estimaciones se consiguieron comportamientos teóricamente esperados y con valores medidos similares a los obtenidos en la práctica. Esto respalda el funcionamiento del modelo de la planta para realizar las simulaciones de casos particulares sobre el sistema.

Debido a la complejidad de resolución del software es necesario que al momento de simular solo se considere el proceso a analizar, ya que la solución se obtiene mediante integración matemática que conlleva gran cantidad de tiempo de simulación.

Al disminuir el  $\Delta t$  de integración asignado en la simulación para la resolución del modelo se obtendrá una mejor representación gráfica de las variables, pero esto conlleva un aumento del tiempo de simulación.

Realizar la simulación de casos particulares permite representar como va a trabajar la planta, obteniendo datos para contrastar con la operación actual, convirtiéndose así en una potente herramienta para tomar decisiones técnicas, económicas y analíticas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Jorge Ferioli: *El Oleoducto Trasandino* [en línea], <http://www.petrolerar.com.ar/>, [consulta: 06 septiembre 2017].
- [2] Frank M. White “*Mecánica de fluidos*”, sexta edición. Editorial Mc Graw Hill 2008.
- [3] J.A.SORIANO."Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas". Madrid 1996.
- [4] Giles, Evett, Liu, “*Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*”, McGraw-Hill, 2003.
- [5] Mott Robert L, “*Mecánica de Fluidos*”, Pearson, 2006.
- [6] Oscar Moller, Javier Signorelli, Mario Storti. "Mecánica Computacional". Rosario, Argentina, 2011.
- [7] *Teoría de transitorios hidráulicos* [En línea], [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8729/Anexo\\_1.pdf?sequence=2](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8729/Anexo_1.pdf?sequence=2), [consulta: 06 septiembre 2017].
- [8] *Modelo Hidráulico e Implementación* [En línea], <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-7.pdf?sequence=7&isAllowed=y>, [consulta: 06 septiembre 2017].
- [9] Luis E. PÉREZ FARRÁS, Adolfo GUITELMAN. ESTUDIO DE TRANSITORIOS: GOLPE DE ARIETE [En línea]. Argentina, Buenos Aires, 2005, disponible en [http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos\\_golpe\\_ariete.pdf](http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_golpe_ariete.pdf), [consulta: 06 septiembre 2017].
- [10] ¿Cómo leer la curva característica de una bomba? [En línea]. THE GORMAN-RUPP COMPANY, disponible en <http://www.pricast.es/files/6249/style/img/Como-leer-la-curva-caracteristica-de-una-bomba.pdf>, [consulta: 06 septiembre 2017].
- [11] API GRAVITY [En línea], [http://www.engineeringtoolbox.com/api-gravity-d\\_1212.html](http://www.engineeringtoolbox.com/api-gravity-d_1212.html), [consulta: 06 septiembre 2017].
- [12] *Manual técnico ALLIEVI*. Universidad Politécnica de Valencia. 2015.
- [13] Ernesto Ángel Rubio. *Apuntes Modelado de Procesos* [Diapositivas]. Universidad del Bío-Bío.
- [14] Reinaldo Sánchez. *Dinámica de Fluidos*. [Apuntes]. Universidad del Bío-Bío.