

**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE  
SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**

**VICERRECTORADO**

**CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**



**SELECCIÓN DE LA UNIDAD DE BOMBEO CON LAS CONDICIONES  
OPERATIVAS DE LA ESTACION TARABUQUILLO PARA EL  
TRANSPORTE DEL POLIDUCTO CAMIRI-SUCRE**

**TRABAJO EN OPCIÓN A DIPLOMADO EN TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO  
Y DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**BRYAN ALAN VIDAL TORRICO**

**Sucre - Bolivia**

**2023**

## **CESIÓN DE DERECHOS**

Al presentar este trabajo como requisito previo a la obtención del Diplomado en Transporte, Almacenamiento y Distribución de Hidrocarburos de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

Bryan Alan Vidal Torrico

Sucre, 01 de Diciembre de 2023

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por darme la vida y brindarme sus consejos, apoyo incondicional, así como por el amor que siempre me ofrecieron, por cultivar e inculcar ese sabio don de la responsabilidad.

A mis hermanos, familia y amigos por los sabios consejos en mi vida estudiantil, tanto emocionalmente como carismáticamente.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, por darme la bendición cada día, quien me ha guiado siempre por el camino de la sabiduría, el conocimiento, su amor y su bondad que no tiene fin.

A mis padres y familiares por haberme brindado su cariño y el apoyo incondicional día tras día. Sus palabras de aliento fueron un motor motivacional que me impulso a superar los desafíos.

A la universidad por haber contribuido a mis conocimientos y habilidades, por haberme acogido como mi segundo hogar y haberme dotado de conocimiento, que el día de hoy se ve reflejado en la culminación de mis estudios profesionales.

Al Ing. Vladimir Daza por brindarme toda su confianza, apoyo y conocimientos a lo largo de esta investigación.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo primordial de seleccionar una unidad de bombeo con las condiciones operativas de la estación de bombeo Tarabuquillo para el transporte de combustibles líquidos en el poliducto Camiri-Sucre, por otro lado la investigación tiene un enfoque cuantitativo, el tipo de investigación es propositiva dentro de los cuales se abordó el diagnóstico de las condiciones técnicas de la estación de bombeo donde se identificó el área crítica que requiere intervención para resguardar la integridad del poliducto. La recomendación de renovar la unidad de bombeo se respaldó coherentemente en el plan estratégico de YPFB, alineándose con las inversiones propuestas.

En el siguiente paso de la investigación, se llevó a cabo la identificación del dimensionamiento necesario para la unidad de reemplazo, con el objetivo de preservar la confiabilidad del sistema del poliducto. Asimismo, se procedió a una cuidadosa selección de la bomba en la estación Tarabuquillo, ajustándola a la capacidad del poliducto.

Esta selección se efectuó con el propósito de asegurar un flujo constante y eficiente a lo largo del sistema, optando por una bomba reciprocante triplex con una potencia de trabajo de 180 HP que cumplía con los requisitos de rendimiento del poliducto. Por último, se llevó a cabo un análisis de costos de inversión relacionados a la renovación de la unidad de bombeo, abarcando tanto los costos directos relacionados con la adquisición y mantenimiento de la bomba, con el fin de proporcionar un enfoque integral para la toma de decisiones.

En conjunto, este estudio no solo ofrece una guía valiosa para la optimización de la unidad de bombeo en la Estación Tarabuquillo, sino que también representa un aporte significativo hacia el incremento de la eficiencia y confiabilidad del sistema de transporte a lo largo del poliducto. Los beneficios resultantes repercuten directamente en los consumidores finales, particularmente en áreas geográficas que abarcan la ciudad de Sucre, Potosí y sus zonas circundantes. Este enfoque integral de mejora no solo tiene implicaciones prácticas en términos de operación y mantenimiento de la estación, sino que también en un suministro de productos continuo y beneficiando sus consumidores finales.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
RESUMEN .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.1.1. Planteamiento del Problema .....	2
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.2.1. Objetivo General .....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. JUSTIFICACION .....	4
1.3.1. Justificación Práctica.....	4
1.3.2. Justificación Teórica .....	4
1.4. METODOLOGIA .....	5
1.4.1. Técnicas de Investigación.....	5
1.4.2. Instrumentos de Investigación.....	5
<b>CAPÍTULO II: DESARROLLO.....</b>	<b>7</b>
2.1. MARCO TEORICO .....	7
2.1.1. Marco Conceptual .....	7
2.1.1.1. Transporte de Combustibles Líquidos .....	7
2.1.1.2. Transporte por Lotes (Batches) .....	8
2.1.1.3. Medición del Flujo de Fluidos.....	9
2.1.1.4. Características de Productos Transportados en Poliducto.....	9
2.1.1.5. Propiedades del Fluido .....	12

2.1.1.5.1. Densidad.....	12
2.1.1.5.2. Peso Específico .....	13
2.1.1.5.3. Gravedad Específica.....	13
2.1.1.5.4. Viscosidad .....	13
2.1.1.5.5. Presión.....	14
2.1.1.5.6. Caudal .....	15
2.1.1.5.7. Temperatura .....	15
2.1.1.6. Estaciones.....	16
2.1.1.7. Perdidas de Energía en Tuberías.....	17
2.1.1.7.1. Rugosidad.....	17
2.1.1.7.2. Numero de Reynolds .....	17
2.1.1.7.3. Factor de fricción .....	18
2.1.1.7.4. Pérdidas de Fricción Primarias .....	19
2.1.1.7.5. Pérdidas de Descarga.....	19
2.1.1.8. Sistemas de Bombeo Hidráulico.....	20
2.1.1.8.1. Bomba Hidráulico .....	20
2.1.1.8.2. Carga Total de Bomba.....	21
2.1.1.8.3. Capacidad de Bombeo (Q) .....	21
2.1.1.8.4. Carga Estática.....	21
2.1.1.8.5. Altura Efectiva de Bomba (total dinamic head).....	22
2.1.1.8.6. Potencia de Bomba (HP) .....	22
2.1.1.8.7. Carga Positiva Neta de Succión Requerida (NPSH <sub>R</sub> ) .....	23
2.1.2. Marco Contextual.....	24
2.1.2.1. Ubicación Geográfica.....	24
2.1.2.2. Contexto Económica de la Región .....	26
2.1.2.3. Contexto Cultural de la Región .....	26
2.1.2.4. Diagnóstico de la Situación de la Estación Tarabuquillo.....	26

2.1.2.5. Características de las Estaciones de Bombeo .....	28
2.1.2.6. Estación de Tarabuquillo .....	29
2.1.2.7. Características del Tramo Poliducto Camiri - Sucre .....	30
2.1.2.8. Características Técnicas de Construcción del Poliducto .....	31
2.1.2.9. Dimensiones de los Tramos Poliducto Camiri-Sucre .....	31
<b>2.2. INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS .....</b>	<b>33</b>
2.2.1. Presión de Diseño.....	33
2.2.2. Presión de Operación .....	33
2.2.3. Datos de Tubería .....	34
2.2.4. Datos de Capacidad.....	35
2.2.5. Gravedad Específica de los Productos Transportados .....	36
2.2.6. Dimensionamiento de la Bomba.....	36
2.2.6.1. Cálculos realizados a Condiciones Operativas .....	38
2.2.6.2. Cálculo de Potencia Requerida.....	41
<b>2.3. ANALISIS Y DISCUSION.....</b>	<b>42</b>
2.3.1. Selección de la Bomba .....	42
2.3.2. Análisis de Costos en la Inversión.....	44
<b>CAPITULO III: CONCLUSIONES .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>49</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Volúmenes de Carburantes Transportados en Poliductos .....	8
<b>Figura 2:</b> Relación de presiones .....	14
<b>Figura 3:</b> Rugosidad (tuberías lisas y rugosas).....	17
<b>Figura 4:</b> Bombas Hidráulicas .....	20
<b>Figura 5:</b> Carga Total de la bomba .....	21
<b>Figura 6:</b> Head Total Dynamic .....	22
<b>Figura 7:</b> NPSHR vs NPSHA .....	24
<b>Figura 8:</b> Ubicación de la Estación de Bombeo Tarabuquillo .....	25
<b>Figura 9:</b> Sala de Bombas, Estación Tarabuquillo .....	27
<b>Figura 10:</b> Manifolds y Sala de control de Bombas .....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Especificaciones de Diésel Oil .....	9
<b>Tabla 2:</b> Especificaciones de la Gasolina .....	10
<b>Tabla 3:</b> Especificaciones del GLP .....	11
<b>Tabla 4:</b> Especificaciones del Jet Fuel .....	12
<b>Tabla 5:</b> Características de la Ubicación Estación Tarabuquillo .....	25
<b>Tabla 6:</b> Estaciones de bombeo en el PCS .....	28
<b>Tabla 7:</b> Bombas en la Estación de Tarabuquillo .....	30
<b>Tabla 8:</b> Características de los tramos en el PCS .....	30
<b>Tabla 9:</b> Características Técnicas de la Tubería del Poliducto .....	31
<b>Tabla 10:</b> Dimensiones del Poliducto Camiri-Sucre .....	32
<b>Tabla 11:</b> Presión de Diseño del PCS .....	33
<b>Tabla 12:</b> Presión de Operación en Psi (Lbf/pulg2) .....	34
<b>Tabla 13:</b> Características condiciones actuales tramo 1 .....	35
<b>Tabla 14:</b> Régimen de envío de Capacidad .....	35
<b>Tabla 15:</b> Régimen de envío máximo en PCS .....	36
<b>Tabla 16:</b> Propiedades de los productos .....	36
<b>Tabla 17:</b> Tabla de Resultados (Diésel Oil) .....	39
<b>Tabla 18:</b> Tabla de Resultados (Gas Licuado Petróleo) .....	39
<b>Tabla 19:</b> Tabla de Resultados (Gasolina Especial) .....	40
<b>Tabla 20:</b> Tabla de Resultados (Jet Fuel) .....	41
<b>Tabla 21:</b> Tabla de Resultados de Potencias Requeridas .....	41
<b>Tabla 22:</b> Número de Unidades de Bombeo en base a la selección .....	43
<b>Tabla 23:</b> Tabla de Costo de Inversión .....	44

## CAPÍTULO I: INTRODUCCION

### 1.1. ANTECEDENTES

La operación del transporte de combustibles líquidos (derivados del petróleo), se las opera mediante un sistema de poliductos que atraviesan 7 departamentos de Bolivia, 109 municipios y más de 1200 comunidades con un total de 1449 Km en redes de distribución, siendo los departamentos de La Paz, Santa Cruz, Cochabamba, Oruro, Potosí, Tarija y Chuquisaca por los cuales atraviesan dichos poliductos terminando en refinerías o plantas de almacenamiento de combustibles líquidos importados a todo el consumo a nivel nacional, existiendo 54 estaciones de bombeo dentro de los poliductos.

El poliducto actualmente se encuentra trabajando en su límite por lo cual se están realizando trabajos de ampliación para su nueva capacidad prevista por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), la modalidad de transporte es por lotes, en secuencia Gasolina Especial – GLP – Gasolina Especial – Jet Fuel – Diésel Oil – Jet Fuel – Gasolina Especial. El poliducto cuenta con 4 estaciones de bombeo intermedias de refuerzo, las cuales son: Estación Monteagudo, Estación El Rosal, Estación Tarabuquillo, Estación Tapirani y la Terminal Qhora-Qhora, además que el poliducto abastece de los productos indicados a las plantas intermedias de Monteagudo y Tarabuquillo. (YPFB, Manual de Operacion del Poliducto Camiri-Sucre, 2018)

Ríos C. (Quito-Ecuador, 2017). Realizo una investigación titulada: “Análisis del sistema de alivios y drenajes y su incidencia en el control operativo del tanque de alivio de la estación de bombeo intermedia del poliducto Esmeraldas- Quito para la empresa DIMPROIN”. En la estación de bombeo Faisanes se realizó una investigación para la optimización del sistema de alivios, para que permita evacuar los productos del tanque de alivio que fueron almacenados. En el presente se analizó mediante un estudio el sistema de alivios y drenajes de la estación, en la cual se encontraron las causas del mal funcionamiento del equipo de reinyección, mediante los cálculos hidráulicos, se concluyó que el NPSH disponible del sistema es menor que el NPSH requerido de la bomba. Después de un análisis de diferentes propuestas, se optó por instalar una bomba de refuerzo (booster) a la bomba de reinyección, esta se instalara en paralelo a la bomba principal, donde reduce costos y complejidad de

implantación. Al instalar una bomba de refuerzo se añadió altura de presión al NPSH disponible. (Rios Narváes , 2017)

Nariño K. (Bogotá-Colombia, 2021). Realizo una investigación titulada: “Cambio de bomba BB-0450 en la planta Sebastopol para asegurar la entrega de productos refinados a clientes y consignatarios de Cenit”. En la planta Sebastopol se diagnosticó que debido al tiempo de operación (30 años) y la obsolescencia del equipo de bombeo, presentaba una dificultad para cumplir el abastecimiento con sus clientes de productos como la Gasolina Motor, Jet, Diésel; para lo cual se requirió un cambio o reposición de la bomba, por la baja confiabilidad de la misma en su operación. Para mejorar la confiabilidad y garantizar una entrega constante de productos refinados, se decidió instalar una bomba centrifuga, lo cual aumento la eficiencia y capacidad de transporte de combustibles, de esta manera se cumplió con las demandas que no podía abastecer el antiguo unidad de bombeo. (Nariño Olarto, 2021)

Amores F. (La Libertad-Ecuador, 2014). Realizo una investigación titulada: “Estudio para incrementar la capacidad de transporte de derivados de petróleo – análisis hidráulico, en el poliducto Libertad-Manta, operado por EP Petroecuador”. El estudio realizado en el poliducto, se estableció parámetros en el transporte, con la finalidad de optimizar la capacidad de transporte de combustible, donde el estudio hidráulico se determinó perdidas de energía para el aumento de caudal. Las bombas instaladas en la estación de bombeo de La Libertad son bombas multietapas y bombas centrifugas, despachan a una presión de 1300 psi. El cálculo de pérdidas de presión en el poliducto, ocasiona pérdidas primarias y secundarias, con un incremento de la presión de descarga. Sin embargo, después de llevar un análisis técnico, se determina que la eficiencia de la bomba es del 62%, teniendo un mayor rendimiento. Para lograr un rendimiento óptimo y satisfacer la demanda de un caudal de 370 BPH, se recomienda establecer una presión de descarga de 1310 psi, esta modificación es esencial para evitar cualquier alteración en las propiedades de los fluidos que se manejan. (Amores Cristobal, 2014)

### **1.1.1. Planteamiento del Problema**

El incremento del parque automotor en la ciudad de Sucre y áreas de afluencia, acontece que aumente la demanda de combustibles para el departamento que abastece el poliducto Camiri-

Sucre, esta demanda crece exponencialmente, ya que la capacidad del poliducto se encuentra en los límites de seguridad establecidos por lo cual se tiene que aumentar su diámetro y las estaciones de bombeo de dicho poliducto pase por un proceso de renovación lo que implica que los equipos instalados cuentan con varios años de servicio, el proceso de renovación garantizara que las estaciones de bombeo se encuentren en condiciones óptimas para transportar los nuevos caudales en los diferentes tramos del poliducto, encontrándose una de ellas la estación de bombeo en Tarabuquillo.

En virtud de que la estación de bombeo se encuentra operando a su capacidad máxima, y las demás estaciones de bombeo sucede lo mismo, se requiere llevar a cabo el traslado de combustibles mediante operadores comerciales especializados, conocidos como traders. Esta modalidad se debe a que los combustibles, al contar con un sistema de bombeo adecuado en las estaciones distribuidas a lo largo del tramo del poliducto, contribuyen a optimizar y asegurar la eficacia operativa del sistema. Este enfoque es esencial para el transporte eficiente de combustibles como Diésel Oíl, Gasolina, Jet Fuel y Gas Licuado de Petróleo (GLP) a lo largo del mencionado poliducto.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Seleccionar la unidad de bombeo con las condiciones operativas de la estación Tarabuquillo para el transporte del poliducto Camiri-Sucre.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Diagnosticar las condiciones operativas en la estación de Tarabuquillo del poliducto Camiri –Sucre.
- Realizar el dimensionamiento para la identificación de la unidad de bombeo de reemplazo en la estación de Tarabuquillo.
- Seleccionar la bomba en la Estación de Bombeo Tarabuquillo para la capacidad del poliducto.
- Realizar un análisis de costos de inversión para la renovación de la bomba seleccionada.

## **1.3. JUSTIFICACION**

### **1.3.1. Justificación Práctica**

La renovación de los equipos de bombeo en el poliducto Camiri – Sucre será muy requerida, ya que el poliducto opera a su máxima operativa por lo cual es necesario realizar una renovación de los equipos en las diferentes estaciones de bombeo siendo una de ellas la estación de bombeo de Tarabuquillo, para garantizar el despacho de la capacidad del poliducto y así transportar los combustibles al destino para su respectiva distribución, dándoles un servicio de combustibles líquidos continuo para el desarrollo de la región.

La selección apropiada de la unidad de bombeo en la estación de Tarabuquillo se erige como un factor para asegurar el suministro eficiente de combustibles líquidos a través del poliducto, beneficiando directamente al consumidor final. Este consumidor abarca tanto el parque automotor de la ciudad como de diversos sectores industriales que dependen de estos combustibles. La implementación efectiva de este equipo no solo contribuye a la satisfacción de la demanda, sino que también genera impactos económicos positivos al fomentar el desarrollo regional y fortalecer la actividad industrial en esta área del país. La renovación de la unidad de bombeo en la estación de Tarabuquillo constituye un proyecto que demandara la participación de profesionales capacitados, tanto en el ámbito de las obras mecánicas como del funcionamiento técnico del equipo. Generará oportunidades de empleo de manera directa e indirecta, impactando positivamente en la dinámica socioeconómica de la comunidad, la creación de puestos de trabajo no solo contribuirá al desarrollo personal y profesional de los empleados, sino que también repercutirá en la calidad de vida de sus familias, generando un efecto positivo a nivel local.

### **1.3.2. Justificación Teórica**

La elaboración de la presente monografía se fundamenta en los principios teóricos de la ingeniería de fluidos y mecánica de fluidos, explorando conceptos como la dinámica de fluidos, las pérdidas de carga y la potencia de bombeo que se exploraron en el primer módulo del diplomado denominado Fundamentos del Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburos. La aplicación de estas teorías proporciona una base sólida para entender como

las condiciones técnicas, tales como la presión de succión y descarga impacta en el rendimiento de la potencia de la unidad de bombeo y, por ende en la eficiencia del sistema.

Asimismo, la monografía se apoya en los principios de selección de equipos de bombeo, considerando factores como la capacidad de bombeo, la potencia requerida y la adaptabilidad a las condiciones específicas de la Estación de Tarabuquillo. La revisión de literatura en este sentido permitirá una compresión profunda de las mejores prácticas y metodologías empleadas en la selección de unidades de bombeo.

## **1.4. METODOLOGIA**

La presente monografía es una investigación propositiva, con un enfoque cuantitativo. (Sampieri, 2014)

### **1.4.1. Técnicas de Investigación**

La información esencial para la elaboración de la presente monografía se obtuvo a través de informes y manuales de operación proporcionados por una empresa subsidiaria de YPFB transporte. Además, se recurrió a fuentes secundarias, como la página oficial de YPFB, donde se consultaron los informes anuales presentados cada año. Estos informes proporcionaron datos cruciales tanto sobre el poliducto como sobre la estación de bombeo objeto de este estudio. Asimismo, se utilizó la página de la ANH para obtener información relacionada con el plan de seguimiento de proyectos que involucra a la mencionada estación. La combinación de estas fuentes permitió reunir una perspectiva integral y detallada para el desarrollo de la monografía.

### **1.4.2. Instrumentos de Investigación**

Se procedió a la recopilación sistemática de datos, fundamental para llevar a cabo un análisis exhaustivo en el marco de la investigación. Estos datos fueron meticulosamente registrados en planillas dedicadas, destacando la obtención de la presión de succión y descarga, aspecto crítico para la realización de un estudio integral sobre la renovación de la unidad de bombeo.

Además, se generaron fichas específicas que detallan el volumen de combustible líquido transportado a lo largo del poliducto, con especial énfasis en el tramo que alberga la estación

de bombeo. Esta información resulta esencial para evaluar la capacidad y eficiencia del sistema. Asimismo, se implementaron planillas específicas destinadas a calcular las potencias de bombeo necesarias, proporcionando así datos cruciales que respaldan el proceso de selección de la unidad de bombeo más adecuada para las necesidades del proyecto.

La utilización de estos instrumentos de investigación sienta las bases para un análisis bien fundamentado, esencial para la toma de decisiones informadas en el contexto de la renovación de la unidad de bombeo.

## CAPÍTULO II: DESARROLLO

### 2.1. MARCO TEORICO

#### 2.1.1. Marco Conceptual

##### 2.1.1.1. Transporte de Combustibles Líquidos

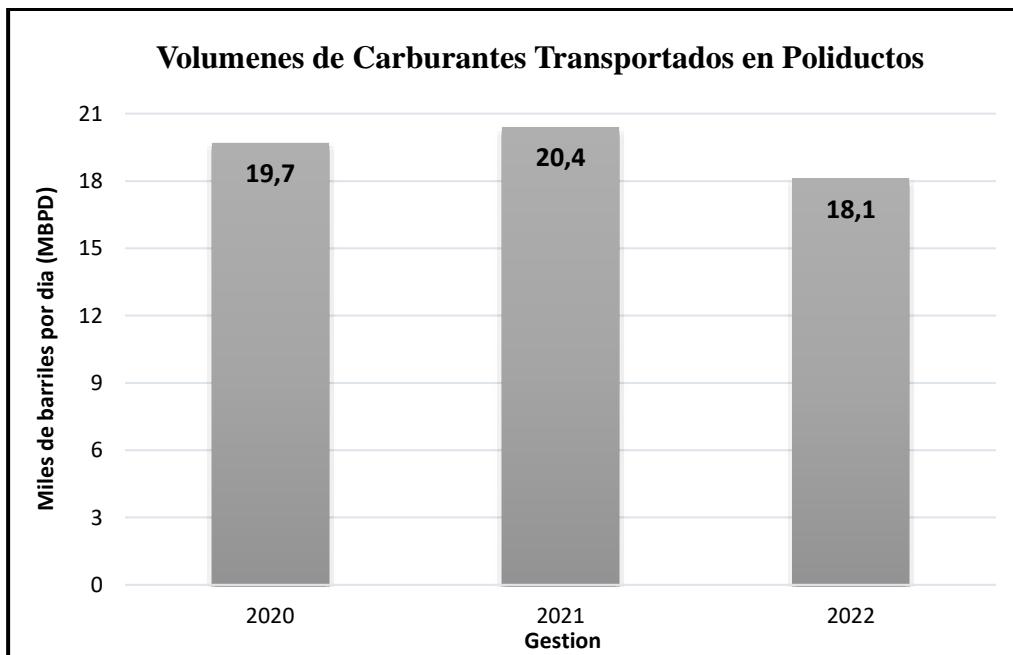
Los combustibles que son productos finales de las plantas refinerías, plantas petroquímicas o mercados de consumo, se transporta de hidrocarburos, es decir llevar el producto de un punto a otro mediante un método de transporte ya sea: Poliducto, gaseoducto, traders, barcos, trenes, etc. En la actualidad los derivados del petróleo y el gas natural continúan siendo un pilar fundamental del consumo energético, en ese caso la demanda de estos combustibles lleva al desarrollo tecnológico para el transporte de estos combustibles. Hace cien años, el agua era el principal fluido que se transportaba mediante tuberías, pero hoy en día, cualquier fluido se puede transportar mediante tuberías ya sea en su producción, transporte o consumo.

Los poliductos son sistemas que sirven para transportar derivados del petróleo en estado líquido, mediante redes de tuberías que utilizan estaciones de bombeo, donde su función es bombear hasta llegar a otra estación que es la encargada de distribuir mediante traders donde finalmente son comercializadas en estación de servicio o empresas donde hacen el uso de este combustible de manera industrial.

Los poliductos son los encargados de abastecer a las ciudades capitales de los departamentos y poblaciones intermedias los combustibles líquidos como ser Diésel Oil, GLP, Gasolina y Jet Fuel; el incremento del parque automotor en las ciudades y añadiendo el incremento de diferentes actividades industriales que requieren el combustible líquido, lleva a que los poliductos se encuentren operando a su máxima capacidad operativa, las cuales se encuentren con falta de sistemas de protección adecuados, la necesidad de mantenimientos mayores, la falta de automatización de los mismos y el incremento de demanda de los combustibles conlleva que los poliductos, juntos con sus estaciones de bombeo, representan un riesgo constante de sufrir fallos operativos. (Suarez , 2021)

Durante la gestión 2022, se transportaron los diferentes combustibles mediante los sistemas de poliductos como: Gasolina Especial (GE), Diésel Oíl (DO), Gas Licuado de Petróleo (GLP), Jet Fuel (JF), Kerosene (KE), Gasolina Liviana Blanca (GLRS) y Gasolina Base 81 (GB81), Siendo la gestión 2021 la que se registró mayor cantidad de transporte con un volumen de 20400 BPD en toda la red de distribución mediante los poliductos. (YPFB, Memoria Anual 2022, 2023)

**Figura 1: Volúmenes de Carburantes Transportados en Poliductos**



**Fuente:** Elaboración Propia en base a YPFB Memoria Anual 2022

Se presenta de manera gráfica la variación en la cantidad de volúmenes de combustibles transportados a nivel nacional a través de poliductos durante los años 2020, 2021 y 2022, ofreciendo una representación visual detallada de la evolución en el transporte de estos carburantes.

#### **2.1.1.2. Transporte por Lotes (Batches)**

En el transporte de combustibles líquidas mediante poliductos mantienen un constante llenado de combustibles, es común que en el interior de una línea de transmisión este ocupado por diversos lotes de productos que se desplazan en una secuencia continua.

La operación clave para garantizar una distribución eficiente de los productos refinados se relaciona con el proceso de determinar el tamaño de los lotes o batches de combustible que transportaran a través del poliducto. El transporte mediante estos lotes de diferentes combustibles permite satisfacer las demandas de los productos transportados mediante una única tubería, en lugar de requerir un conducto separado para cada tipo de combustible.

#### 2.1.1.3. Medición del Flujo de Fluidos

En el control de los procesos industriales, resulta fundamental disponer de información precisa sobre la cantidad de material que ingresa y sale del proceso que va a realizarse. Dado que estos materiales se desplazan en estado fluido, es esencial medir la velocidad a la que el fluido fluye a través de una tubería u otro conducto, siempre que sea factible.

#### 2.1.1.4. Características de Productos Transportados en Poliducto

- **Diésel Oil**

Son fluidos derivados de hidrocarburos, utilizados como combustibles en motores de ignición por compresión. Se originan a partir del proceso de refinación del petróleo y son comúnmente denominados destilados medios. Se distinguen por su destilación a temperaturas superiores a las del queroseno. Físicamente, son de color amarillo con un aroma distintivo y presenta un punto de inflamabilidad de 71 °C.

**Tabla 1:** Especificaciones de Diésel Oil

Prueba	Especificaciones		Unidad	Método de Ensayo	
	Mínimo	Máximo		Altern. 1	Altern. 2
Gravedad Específica a 15,6/16,5 °C	0,79	0,88		D1298	D4052
Punto de Escr��imiento		-1 (30)	°C (°F)	D97	
Apariencia	Cristalina			Visual	
Viscosidad cinemática a 40°C	1,3	5,5	cSt	D445	D7042
Índice de Cetano	45			D976	D4737
Agua y Sedimentos		0,05	% vol.	D1796	D2709

**Fuente:** Extraído de Reglamento de calidad de carburantes y lubricantes

Presenta las características y especificaciones del combustible diésel oíl que se transporta por los poliductos a nivel nacional según el reglamento de calidad de carburantes y lubricantes presentado el 18 de Mayo del 2022.

- **Gasolina Especial**

La gasolina, es un combustible derivado del petróleo, se compone de una mezcla de hidrocarburos y se utiliza en motores de combustión interna con encendido mediante chispa. Su origen se encuentra en la nafta de destilación primaria, la fracción más ligera del petróleo, excluyendo los gases. La compleja composición de la gasolina abarca más de 200 hidrocarburos individuales, con un rango de ebullición generalmente entre 30 y 200 °C, desde butanos (C4) hasta productos como el metil naftaleno (C11). (Reglamento de calidad de carburantes, 2013)

**Tabla 2: Especificaciones de la Gasolina**

Prueba	Especificaciones		Unidad	Método de Ensayo	
	Mínimo	Máximo		Altern. 1	Altern. 2
<b>Gravedad Específica a 15,6/16,5 °C</b>	Informar			D1298	D4052
<b>Tensión de vapor Reíd a 100 °F (37,8 °C)</b>	7	11,5	psig	D323	D4953
<b>Gomas existentes</b>		5	mg/100 mL	D381	
<b>Azufre total</b>		0,05	% peso	D2622	D4294
<b>Color</b>	Incoloro a amarillo			Visual	
<b>Apariencia</b>	Cristalina			Visual	

**Fuente:** Extraído de Reglamento de calidad de carburantes y lubricantes

Presenta las características del combustible gasolina que se transporta por los poliductos a nivel nacional según el reglamento de calidad de carburantes y lubricantes presentado el 18 de Mayo del 2022.

- **Gas Licuado de Petróleo (GLP)**

Se trata de una amalgama de hidrocarburos gaseosos predominantemente parafínicos, en su mayoría compuestos por butano y propano. Estos gases, al tener la capacidad de liquefacerse fácilmente a presiones moderadas, pueden ser transportados en forma líquida y transformarse nuevamente en estado gaseoso al liberar la presión. En consecuencia, el gas licuado de petróleo se presenta como una fuente móvil de energía térmica con diversas aplicaciones, especialmente en áreas donde la distribución de gas natural no es factible. (Reglamento de calidad de carburantes, 2013)

**Tabla 3: Especificaciones del GLP**

Prueba	Especificaciones		Unidad	Método de Ensayo	
	Mínimo	Máximo		Altern. 1	Altern. 2
<b>Gravedad Específica a 15,6/16,5 °C</b>	0,52	0,57		D1657	D2598
<b>Tensión de vapor a 100°F</b>	80	170	psig	D1267	
<b>Humedad</b>	Negativo			D2713	
<b>Azufre total</b>		100	ppm	D6667	UOP791
<b>Contenido de Etano</b>		3	% vol	D2163	UOP539
<b>Cromatografía</b>	Informar				

**Fuente:** Extraído de Reglamento de calidad de carburantes y lubricantes

Presenta las características y especificaciones del combustible gas licuado de petróleo que se transporta por los políductos a nivel nacional según el reglamento de calidad de carburantes y lubricantes presentado el 18 de Mayo del 2022.

- **Jet Fuel**

Se trata de una combinación de hidrocarburos que incluye aromáticos, olefinas y naftenos, con un punto de inflamación de 38°C, coincidente con el keroseno. Este combustible, conocido por su aplicación en aeronaves, proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de los motores de aviación. (Reglamento de calidad de carburantes, 2013)

**Tabla 4: Especificaciones del Jet Fuel**

Prueba	Especificaciones		Unidad	Método de Ensayo	
	Mínimo	Máximo		Altern. 1	Altern. 2
<b>Gravedad Específica a 15,6/16,5 °C</b>	0,775	0,84		D1298	D4052
<b>Azufre total</b>		0,3	% peso	D1266	D2622
<b>Punto de inflamación</b>	38(100)		°C (°F)	D56	D93
<b>Viscosidad cinemática a -20°C (4°F)</b>		8	cSt	D445	D7042
<b>Partículas contaminantes</b>		1	mg/L	D2276	D5452
<b>Destilación Engler (760 mmHg)</b>				D86	D2887

**Fuente:** Extraído de Reglamento de calidad de carburantes y lubricantes

Presenta las características y especificaciones del combustible jet fuel que se transporta por los políuductos a nivel nacional según el reglamento de calidad de carburantes y lubricantes presentado el 18 de Mayo del 2022.

### 2.1.1.5. Propiedades del Fluido

Los fluidos son un medio material continuo, deformable, desprovisto de rigidez y capaz de “fluir”, se pueden clasificar en: líquidos y gases. Las propiedades de los fluidos nos permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento para distinguirlos de otros.

#### 2.1.1.5.1. Densidad

La densidad de una sustancia es su masa por unidad de volumen, o dicho de otra forma, la cantidad de masa obtenida en un volumen determinado, se denota con la letra griega Rho ( $\rho$ ).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec(1)}$$

#### 2.1.1.5.2. Peso Específico

El peso específico se define como el peso por una unidad de volumen, este cambia con la gravedad, en el sistema internacional sus unidades son (N/m<sup>3</sup>).

$$\gamma = \rho * g \quad \text{Ec(2)}$$

#### 2.1.1.5.3. Gravedad Específica

La gravedad específica o densidad relativa de un material se define como el cociente de su densidad entre la densidad del agua; esta relación no tiene unidades, es simplemente un número.

$$DR = \frac{\rho_{material}}{\rho_{agua}} \quad \text{Ec(3)}$$

#### 2.1.1.5.4. Viscosidad

La viscosidad es la propiedad que refleja la resistencia al movimiento del fluido y tiene un papel análogo al del rozamiento en el movimiento de los sólidos. La viscosidad está siempre presente en mayor o menor medida tanto en fluidos compresibles como incompresibles, en el caso de los fluidos perfectos o no viscosos su efecto es muy pequeño y no se tiene en cuenta.

- **Viscosidad Absoluta o Dinámica ( $\mu$ )**

Es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas. La unidad de la viscosidad absoluta o dinámica es Pascal por segundo en el sistema internacional (SI). Otra propiedad importante que tiene la viscosidad es la dependencia que tiene con la temperatura. La viscosidad de un fluido disminuye al reducir la densidad de dicho fluido cuando aumenta la temperatura.

- **Viscosidad Cinemática (9)**

Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. En el sistema internacional (SI) la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo.

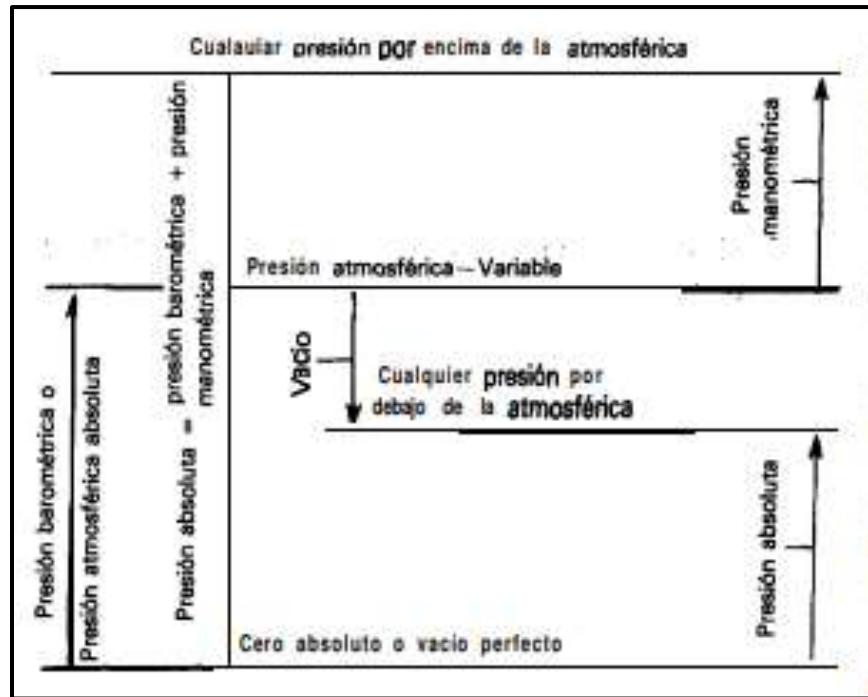
$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

Ec(4)

### 2.1.1.5.5. Presión

Cuando un fluido está en reposo ejerce una fuerza perpendicular sobre cualquier superficie que este en contacto con él, como las paredes de un recipiente o la superficie de un cuerpo que está sumergido en el fluido. (Crane, 1992)

**Figura 2: Relación de presiones**



**Fuente:** Extraído de Flujo de Fluidos en Válvulas y Accesorios

Proporciona una representación visual detallada que ilustra la compleja relación entre las diversas presiones experimentales por un fluido en distintos puntos. Este grafico detalla como varían las presiones a lo largo de diferentes etapas.

- **Presión Atmosférica**

Es la presión que ejerce la atmósfera terrestre sobre la tierra. Esta presión varía con los cambios de clima y con la altura. La presión atmosférica a nivel del mar tiene un valor de 1 atm o 1,013 bares.

- **Presión Absoluta**

La presión absoluta se refiere siempre al vacío perfecto, la medida de la presión atmosférica del lugar añadiendo la presión manométrica.

- **Presión Barométrica**

Es el nivel de la presión atmosférica por encima del vacío perfecto. La presión se aproxima a 14,7 psia.

- **Presión Manométrica**

Es la presión que es medida por encima de la atmosférica, llamada también la diferencia la presión absoluta que se encuentra encima de la presión atmosférica y la presión atmosférica en el lugar donde se realiza la medición.

- **Presión de Vacío**

La presión se vacío se denomina a la depresión que se encuentra por debajo del nivel atmosférico. La referencia a las condiciones de vacío se hace a menudo expresando la presión absoluta en términos de columna de mercurio o columna de agua.

#### **2.1.1.5.6. Caudal**

El caudal es el volumen del fluido que atraviesa una sección en la unidad de tiempo.

$$Q = v * A \quad \text{Ec(5)}$$

#### **2.1.1.5.7. Temperatura**

La temperatura es una medida de calor o energía térmica de las partículas en una sustancia, la temperatura no depende del número de partículas de un objeto. En la actualidad se utilizan comúnmente tres unidades de medida: Grados Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) y los grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) que es una unidad derivada de los Kelvin.

### **2.1.1.6. Estaciones**

Son instalaciones integradas en un conducto, las cuales pueden categorizarse como estaciones de bombeo, estaciones reductoras de presión y estaciones de recepción

- **Estaciones de Bombeo**

Las estaciones de bombeo son instalaciones, construidas y equipadas para transportar fluidos, son los encargados de proporcionar la presión necesaria para transportar carburantes, cuando la disposición final del flujo por gravedad ya no es posible. Cuando se trata de largos tramos se puede necesitar varias estaciones de bombeo para el transporte de una capacidad determinada en el ducto.

- **Estaciones Reductoras de Presión**

Componentes del ducto diseñados para reducir la presión del producto mediante el uso de válvulas reductoras de presión. Se lleva a cabo esta operación en situaciones operativas específicas, especialmente cuando el cambio en la elevación del producto resulta en una energía potencial que se convierte en energía de presión elevada.

- **Estaciones de Recepción**

Son infraestructuras destinadas a recibir y almacenar el fluido transportado por el conducto. Estas estaciones constan de una tubería principal y un manifold, que distribuye el producto a los tanques respectivos.

- **Estaciones Reductora y de Recepción**

Son instalaciones que desempeñan la función tanto de reducir la presión de llegada del producto como de recibirlo en los tanques de almacenamiento.

- **Estaciones de Bombeo y Recepción**

Son infraestructuras versátiles que pueden operar tanto como estaciones de bombeo como de recepción. Tienen la capacidad de impulsar o recibir el producto según sea necesario, incluso actuando como una estación inicial o de cabecera. (Garaicochea, 1991)

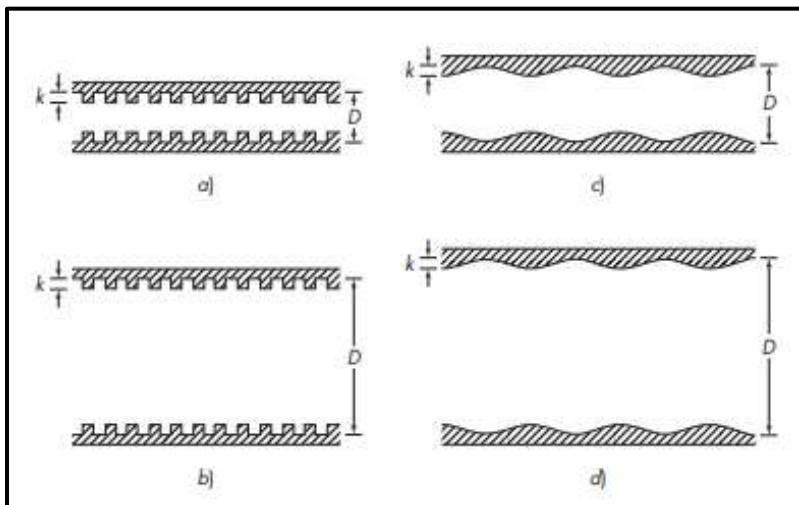
### 2.1.1.7. Perdidas de Energía en Tuberías

La pérdida de carga en tuberías se refiere a la disminución de la presión de un fluido en su transporte, estas pérdidas pueden ser constantes a lo largo de ductos regulares o puntuales, representando la perdida de energía del flujo hidráulico.

#### 2.1.1.7.1. Rugosidad

La rugosidad se refiere a las imperfecciones en un material, y cuando hablamos de tuberías rugosas, nos referimos a las irregularidades en su interior que se pueden perturbar la capa límite del flujo laminar. Las tuberías rugosas generan más turbulencia y, como resultado, presentan una mayor resistencia al flujo por una unidad de longitud en comparación con las tuberías lisas. (McCabe, Smith, Harriot, 2007)

**Figura 3: Rugosidad (tuberías lisas y rugosas)**



**Fuente:** Extraído de Operaciones Unitarias en Ingeniería Química

Se ofrece una detallada representación visual que aborda la rugosidad en tuberías, destacando y comparando entre las tuberías lisas y aquellas que presentan rugosidades.

#### 2.1.1.7.2. Número de Reynolds

La transición del flujo laminar al turbulento está condicionada por diversos factores, tales como la geometría del conducto, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y la naturaleza del fluido, entre otros. Uno de los determinantes

más significativos en este proceso es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en el fluido, siendo esta relación la que en última define el régimen de flujo predominante. La influencia de estos múltiples factores destaca la complejidad y la interconexión de las variables que impactan en la transición de los regímenes de flujo.

En la mayoría de las situaciones prácticas, el comportamiento del flujo en una tubería de forma circular se caracteriza por:

$$Re \leq 2300 \quad \text{Flujo Laminar}$$

$$2300 \leq Re \leq 4000 \quad \text{Flujo Transicional}$$

$$Re \geq 4000 \quad \text{Flujo Turbulento}$$

Desde una perspectiva matemática, el Número de Reynolds se define mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\nu * D * \delta}{\mu} \quad \text{Ec(6)}$$

#### 2.1.1.7.3. Factor de fricción

Después de identificar el tipo de flujo que atraviesa la tubería mediante la evaluación del número de Reynolds, se puede calcular el factor de fricción de Darcy, representado por la variable  $f$ .

En el escenario de tuberías que exhiben condiciones lisas o rugosas bajo un régimen laminar ( $Re < 2000$ ), es posible deducir matemáticamente el comportamiento utilizando la ecuación de Hagen-Poiseuille.

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ec(7)}$$

Desde la década de 1970 hasta la actualidad, varios investigadores han dedicado esfuerzos a desarrollar fórmulas que permitan aproximaciones explícitas del valor de fricción de Darcy. El propósito principal de estos esfuerzos ha sido facilitar el uso extensivo de la fórmula de Colebrook & White en el cálculo de tuberías, evitando la necesidad de recurrir a métodos iterativos. Un ejemplo de estos avances es la fórmula propuesta por Swamee & Jain en 1976.

Estas fórmula específica se aplica al análisis de tuberías, tanto lisas como rugosas, bajo condiciones de régimen turbulento ( $Re > 4000$ ). (Fesmex, 2020)

$$f = \frac{0,25}{\log \left( \frac{R/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)^2} \quad \text{Ec(8)}$$

#### 2.1.1.7.4. Pérdidas de Fricción Primarias

La pérdida de presión por fricción ocurre cuando un líquido en movimiento entra en contacto con el medio a través del cual se desplaza (tuberías). Este factor de pérdida por fricción en el sistema de tuberías es un elemento crítico que debe considerarse al instalar y operar bombas.

En el contexto de sistemas más extensos, las pérdidas que ocurren en las válvulas y accesorios son categorizadas como pérdidas menores. Esto se debe a que, sistemas de mayor escala, las pérdidas debidas a la fricción en las tuberías tienden a ser más significativas en comparación con las pérdidas asociadas a las válvulas y otros accesorios.

$$hf = f * \left( \frac{L}{D} \right) * \left( \frac{v^2}{2 * 32,2} \right) \quad \text{Ec(9)}$$

#### 2.1.1.7.5. Pérdidas de Descarga

La presión de salida o descarga está directamente relacionada con la tensión de los hidrocarburos líquidos que se están transportando. Es importante ser especialmente cauteloso con el GLP, ya que incluso una pequeña evaporación puede causar daños a la bomba, como la cavitación. Por lo tanto, al diseñar sistemas, se debe proporcionar un margen de seguridad para evitar la vaporización de líquidos livianos, lo que a su vez prevendría la contaminación de los lotes de combustibles líquidos.

$$hp = \frac{Pop * 144}{\delta} \quad \text{Ec(10)}$$

## 2.1.1.8. Sistemas de Bombeo Hidráulico

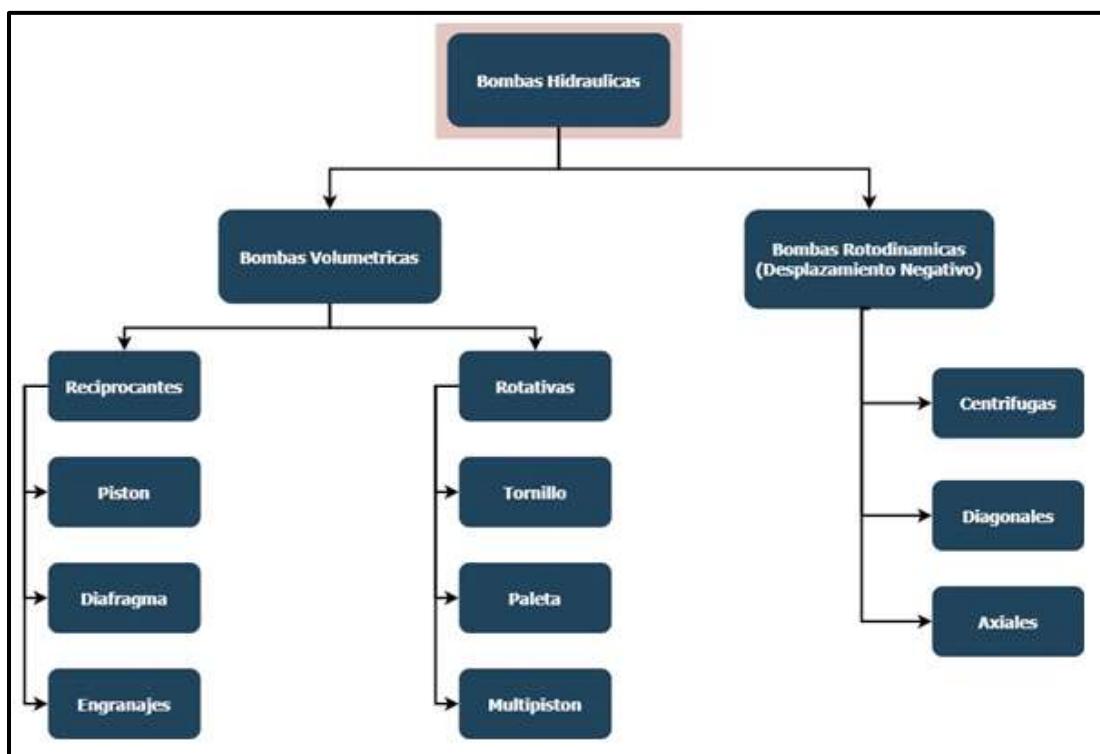
### 2.1.1.8.1. Bomba Hidráulico

La bomba hidráulica es una maquina capaz de transformar energía con la que funciona (generalmente mecánica o eléctrica), que recibe esta energía de un motor impulsor el cual transfiere la energía al fluido. El medio que se utiliza para el accionamiento es mediante los motores eléctricos, motores de combustión interna o turbinas de vapor. Las bombas hidráulicas se dividen en dos grupos:

- Bombas rotodinamicas (desplazamiento negativo)
- Bombas volumétricas

Las bombas son máquinas usadas para mover fluidos a través de tuberías mediante diferentes transformadores de energía. El funcionamiento se basa en encerrar el volumen del fluido para transportarlo mediante la impulsión con un aumento de presión.

**Figura 4: Bombas Hidráulicas**



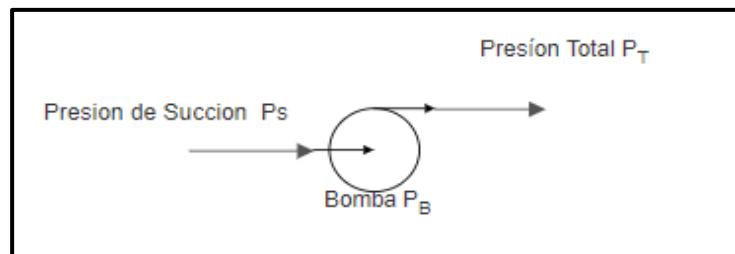
**Fuente:** Elaboración Propia en base a Pipe Friction Manual

Muestra la clasificación de las bombas hidráulicas entre las cuales destaca las bombas de desplazamiento positivo o volumétricas, el principio de funcionamiento se basa en la hidrostática, de modo que el aumento de la presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen, en cada ciclo la bomba genera de manera positiva un volumen dado, por lo que se denominan bombas volumétricas. Las bombas rotodinámicas son las que utilizan el principio de funcionamiento que se basa en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. Entre las cuales se destacan las centrifugas o radiales, axiales y diagonales o helicocentrífugas. (Institute, 1954)

#### 2.1.1.8.2. Carga Total de Bomba

La carga o presión total de un sistema contra el cual debe operar una bomba está en función a la suma algebraica de la presión estática cuando se trata de elevación.

**Figura 5: Carga Total de la bomba**



**Fuente:** Elaboración Propia en base a Mecánica de Fluidos

Se ilustra la carga total de la bomba en relación tanto con la presión de succión como con la presión de descarga. La presión estática, es la presión equivalente a la diferencia de elevación; entre dos puntos de referencia al nivel del mar.

#### 2.1.1.8.3. Capacidad de Bombeo (Q)

La capacidad de bombeo es la cantidad de fluido que pasa a través del conducto de salida de una bomba en un periodo de tiempo determinado.

#### 2.1.1.8.4. Carga Estática

La carga estática se refiere a la resistencia en un sistema de bombeo que se presenta antes de que el líquido comience a moverse. La componente principal de la carga estática consiste en

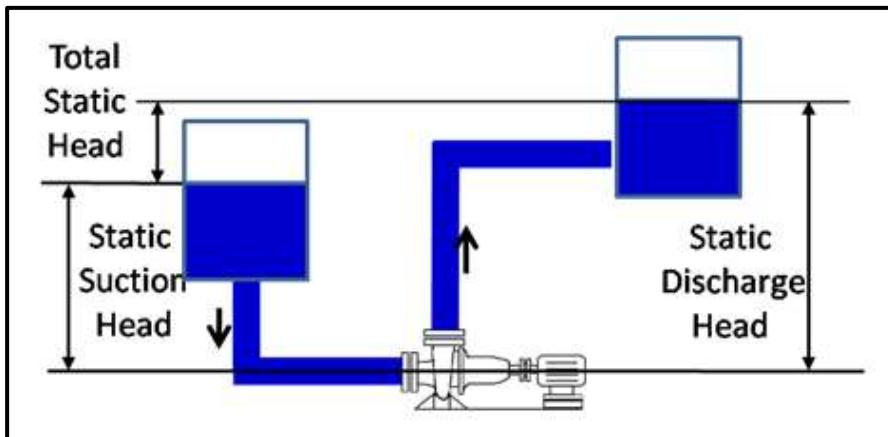
la diferencia de altura entre la superficie del líquido en la entrada y la superficie del líquido de salida.

Además, la carga estática da lugar a una variación en la presión entre el punto de entrada y el punto de salida. Es importante destacar que la carga estática no se modifica con cambios en la capacidad del sistema. La bomba debe tener la capacidad suficiente para vencer esta carga estática; por el lado, en caso de que el perfil longitudinal presente una depresión, la carga estática actuara a favor de la bomba.

#### 2.1.1.8.5. Altura Efectiva de Bomba (total dynamic head)

La altura efectiva de bombeo se refiere a la capacidad de una bomba para elevar el fluido a transportar a lo largo de un sistema de ductos, esta métrica es esencial para evaluar si una bomba es la adecuada para la tarea que se requiere.

**Figura 6: Head Total Dynamic**



**Fuente:** Extraído de Pump Net Positive, Hiclipart

Se presenta la altura efectiva de bombeo considerando la variación de alturas entre el punto de succión y el punto de descarga del fluido, ofreciendo así una perspectiva detallada sobre la capacidad de elevación del sistema de bombeo.

#### 2.1.1.8.6. Potencia de Bomba (HP)

Es la potencia entregada por la bomba al fluido que fluye a través de ella, se relaciona directamente con la altura efectiva de la bomba. Para la industria petrolera y su transporte de

sus derivados por ductos, diferentes autores desarrollaron ecuaciones para las pérdidas por fricción, como también para el cálculo de la potencia hidráulica de la bomba.

- **Potencia Hidráulica**

Potencia hidráulica es la energía transferida al fluido, por la bomba. Esta potencia se necesita para llevar el fluido el punto de succión hasta el punto de descarga.

$$hyd\ hp = \frac{Q * \Delta P}{1714} \quad \text{Ec(11)}$$

- **Potencia Mecánica**

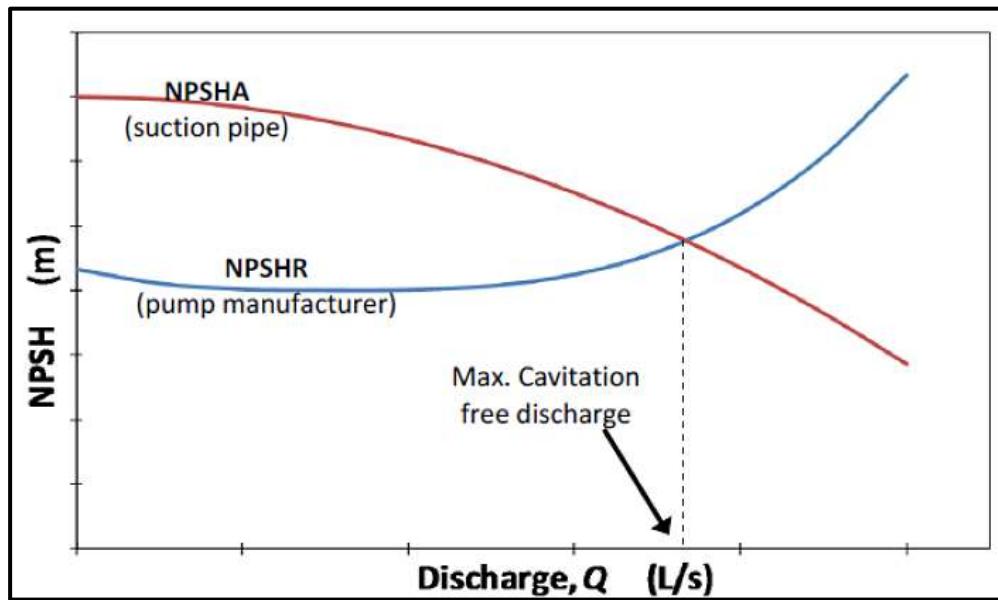
La potencia mecánica se define como la energía requerida para operar la bomba, específicamente la cantidad de energía que debe suministrarse al eje de la bomba para permitir su funcionamiento efectivo.

$$bhp = \frac{hyd\ hp}{e} \quad \text{Ec(12)}$$

#### 2.1.1.8.7. Carga Positiva Neta de Succión Requerida (NPSH<sub>R</sub>)

La NPSH<sub>req</sub> o carga de succión requerida, constituye una propiedad crucial en el diseño de bombas, siendo evaluada a través de una prueba estructurada desarrollada por el Instituto de Hidráulica de los Estados Unidos. Definida como la carga mínima necesaria para prevenir la cavitación, la NPSH<sub>req</sub> se expresa en relación con el plano de referencia. Esta carga, esencial para evitar la formación de burbujas de vapor en el fluido de succión, varía en función de las características específicas de cada bomba. En este sentido, la NPSH<sub>req</sub> se erige como un parámetro fundamental que se debe tener en cuenta durante el diseño y operación de sistemas de bombeo, asegurando un rendimiento óptimo y evitando problemas asociados con la cavitación.

**Figura 7: NPSHR vs NPSHA**



**Fuente:** Extraído de IQR Ingeniería Química

Representa gráficamente el punto de intersección entre el NPSH<sub>disp</sub> y el NPSH<sub>req</sub> como parte de la estimación del NPSH óptimo o máximo para un bomba centrífuga, ofreciendo una visualización detallada que facilita la comprensión de cómo estos dos parámetros se relacionan y afecta el rendimiento de la bomba por la cavitación.

Por otro lado, el Cabezal Neto de Succión Positivo Disponible (NPSHA), se define como la altura total de succión absoluta o disponible y la siguiente ecuación está en función al API espec. 14 E. ((API), 1991)

$$NPSH_A = hp - hvpa + hst - hf - hvh - ha \quad \text{Ec(13)}$$

### 2.1.2. Marco Contextual

#### 2.1.2.1. Ubicación Geográfica

La selección de unidad de bombeo en la estación de bombeo, se encuentra ubicada a 176 Km, progresiva 176+254 km al Noroeste de la ciudad de Camiri, Departamento de Chuquisaca, Provincia Tomina, Estado Plurinacional de Bolivia (Maps, 2023). La estación como tal recibe el nombre de “Estación de Bombeo Tarabuquillo”, la cual es propiedad de YPFB TRANSPORTE S.A. (YPFB, Manual de Operacion del Poliduto Camiri-Sucre, 2018)

**Figura 8:** Ubicación de la Estación de Bombeo Tarabuquillo



**Fuente:** Extraído de Google Maps

Nos da una ubicación exacta de la estación de bombeo además podemos detallar que la estación colinda por el Norte con el pueblo de Tarabuquillo, Oeste y Este con terrenos eriazos, por el sur con el Rio de Tarabuquillo teniendo las siguientes condiciones: (Tomina, 2016)

**Tabla 5:** Características de la Ubicación Estación Tarabuquillo

Características de la Ubicación de la Estación Tarabuquillo	
Elevación Promedio	2.332,85 msnm.
Temperatura Máxima	30 °C
Temperatura Mínima	-5 °C
Latitud	9°21'09.25" S
Longitud	64°28'43.88" O
Precipitación pluvial mínimo	82,9 mm
Precipitación pluvial máximo	577,7 mm

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística

Nos proporciona las características más importantes donde se ubica la estación de Tarabuquillo además se tiene que la provincia de Tomina se encuentra en el departamento de Chuquisaca tiene una superficie de 3.947 km<sup>2</sup> y una población de 37.482 habitantes. Se divide en 5 secciones municipales las cuales son: Padilla, Villa Tomina, Villa de Sopachuy, Villa Alcalá y El Villar. Predomina el español, en la secciones de Sopachuy y Villa Tomina se habla Quechua. (Vedia, 2005)

#### **2.1.2.2. Contexto Económica de la Región**

En la provincia de Tomina su principal actividad es la agricultura la cual participa el 8,7% de la superficie total de cultivos del departamento y destina a cultivos en una extensión de 4% del total. El principal producto agrícola es el maíz en mayor proporción, además de maní y papa, y en una producción más baja la tienen el trigo, ají y maíz choclo. (Vedia, 2005)

La comercialización del producto agrícola se realiza por lo general en las mismas comunidades con los que existe una dinámica estable de negocios, y comunidades como Pucará, los productores sacan sus productos, que son dirigidos a la ciudad de Sucre para su comercialización. Es importante agregar que hay una cantidad respectiva de tierra que se utilizan para la ganadería, utilizando pasturas naturales para la crianza de caprinos, ovinos y bovinos, en ese orden de importancia. (Tomina, 2016)

#### **2.1.2.3. Contexto Cultural de la Región**

Las características principales socioculturales de los residentes del municipio de Tomina, indican que la mayoría se autodefine perteneciente a la cultura Quechua con un 98,5% y reconoce que su principal idioma materno es el Quechua en un 78,2% en las secciones de Tomina y Sopachuy, cultura que termina en el cruce de Khonchupata, seguido del castellano con un 21,6%. A partir del cruce, comienza la cultura guaraní, razón por la que Tomina se denomina Santiago de la Frontera de Tomina. (Vedia, 2005)

#### **2.1.2.4. Diagnóstico de la Situación de la Estación Tarabuquillo**

El análisis detallado de la unidad en la estación de bombeo de Tarabuquillo, ubicada estratégicamente en el departamento de Chuquisaca, provincia Tomina, y 2da Sección

Municipal Villa Tomina, pone de manifiesto la necesidad inminente de su sustitución. Este imperativo se fundamenta en la constatación de que, ante el incremento en la capacidad de transporte que se indica en los proyectos de seguimiento de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2023), la unidad de bombeo existente ha quedado obsoleta, siendo incapaz de satisfacer eficazmente las demandas operativas y la creciente necesidad de productos terminados en Sucre y áreas circundantes.

La ejecución de la renovación no solo responde a la urgencia de adecuar la infraestructura a los avances y cambios en las condiciones operativas, sino que también representa un paso estratégico para fortalecer la eficiencia y capacidad de la estación. Este proceso se erige como una contribución significativa para abastecer la potencia necesaria frente a la creciente demanda de productos finales en Sucre.

**Figura 9:** *Sala de Bombas, Estación Tarabuquillo*



**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística

En la representación visual proporcionada en la figura, se ofrece una visión de la sala de bombas en la estación Tarabuquillo del poliducto Camiri-Sucre. En esta imagen, se exhiben con claridad las distintas bombas que conforman el equipamiento de la estación.

Es relevante destacar que la renovación de la unidad de bombeo del sistema poliducto Camiri-Sucre se encuentra presupuestada, según informes de proyectos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2022), y el informe de rendición de cuentas pública del año 2022 proporcionado por YPFB. Este presupuesto contempla la instalación de nuevas unidades de bombeo en varias estaciones, siendo la estación de Tarabuquillo una de las beneficiarias directas de este proyecto. La inversión proyectada en esta renovación no solo está respaldada por la necesidad operativa y técnica identificada, sino que también está alineada con las iniciativas estratégicas y financieras planificadas a nivel gubernamental y de la industria petrolera para optimizar y modernizar la red de transporte de hidrocarburos en la región.

#### **2.1.2.5. Características de las Estaciones de Bombeo**

A lo largo del poliducto, se ubican 5 estaciones de bombeo estratégicamente distribuidas en puntos clave, teniendo las siguientes características:

**Tabla 6:** Estaciones de bombeo en el PCS

<b>ESTACIÓN DE BOMBEO</b>	<b>Tipo de Bomba</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Mantenimiento</b>
#1 Choretty	Bomba triplex Vertical Worthington VTEL.	3	5.000 Hrs
#2 Monteagudo	Bomba triplex Vertical Worthington VTEL.	3	5.000 Hrs
#3 El Rosal	Bomba Dúplex Horizontal GASO 1742	2	5.000 Hrs
<b>#4 Tarabuquillo</b>	<b>Bomba Reciprocante Worthington KUF-12</b>	<b>2</b>	<b>5.000 Hrs</b>
#5 Tapiro	Bomba triplex Vertical Worthington VTEL.	2	5.000 Hrs

**Fuente:** Extraído de Y.P.F.B. Transporte S.A.

Brinda una detallada información de las estaciones de bombeo a lo largo del poliducto Camiri-Sucre, ofreciendo información sobre la cantidad de bombas presentes en cada

estación, así como los períodos específicos en los cuales se lleva a cabo el mantenimiento correspondiente de dichas unidades de bombeo.

#### **2.1.2.6. Estación de Tarabuquillo**

La estación de Tarabuquillo cumple la función de booster para el transporte de hidrocarburos líquidos en el poliducto PCS. Además es un centro de distribución y consumo de productos, para lo cual existe una planta de ventas de 400 metros, por donde pasa el ducto y deja GLP a tanque de YPFB, gasolina y diésel a tanque de CLHB, todo esto de acuerdo a programas establecidos.

**Figura 10:** *Manifolds y Sala de control de Bombas*



**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística

Nos muestra una vista tanto de los Manifolds y la sala de bombas ubicada en la estación Tarabuquillo, también destacar que la operación de transporte de los productos en el ducto se realiza sin mediar ningún elemento de separación entre los mismos. Se tiene en cuenta cierto orden o secuencia de bombeo; es decir que el GLP siempre está entre las gasolinas y luego el diésel.

**Tabla 7: Bombas en la Estación de Tarabuquillo**

<b>Estación de Tarabuquillo</b>	
Bombas P1 y P2 de productos	
Tipo	Reciprocante horizontal Dúplex
Marca	Worthington 12U
Motor a	Diésel
Marca del Motor	Worthington CC5

**Fuente:** Elaboración Propia con datos de Manual de Operaciones PCS

Se proporciona una descripción detallada de las bombas presentes en la estación de Tarabuquillo, incluyendo la información como la marca y el tipo de bomba, ofreciendo una visión completa de los componentes específicos.

#### **2.1.2.7. Características del Tramo Poliducto Camiri - Sucre**

El ducto del PCS se encuentra mayormente en la superficie, sostenido por soportes, abarcando un 90% de su extensión. En algunos casos, presenta tramos subterráneos, especialmente en áreas de carreteras y cruces.

**Tabla 8: Características de los tramos en el PCS**

<b>PARAMETRO</b>	<b>TRAMO #1</b>	<b>Tramo #2</b>
	Estación Choretty a	Estación Tapirani a
	Estación Tapirani	Estación Qhora-Qhora
<b>Diámetro de la tubería</b>	6 in	4 in
<b>Longitud del tramo</b>	236 km	67.8 km
	550-600 m <sup>3</sup> , bombeados por	550-600 m <sup>3</sup> , bombeados por
<b>Volumen transportado</b>	día de acuerdo a programación de lotes de producto.	día de acuerdo a programación de lotes de producto.
<b>Espesor de la tubería</b>	7,11 mm	6,03 mm
<b>Productos transportados</b>	GLP, GE, DO, JF (separador entre DO y GE)	GLP, GE, DO y JF (separador entre DO y GE)
<b>Presión de operación</b>	Presión Inicial: 1.365 psi	Presión Final: 910 psi

**Fuente:** Extraído de Y.P.F.B. Transporte S.A.

Nos brinda las características de los tramos desde el punto de inicio del PCS es la Estación Cabecera Chorety, ubicada en la ciudad de Camiri. Desde este punto, se extiende a lo largo de 236 Km con una tubería de 6" y 67,8 Km con una tubería de 4", sumando una longitud de 303,8 Km. Su trayecto concluye en la Terminal de Qhora-Qhora, en la ciudad de Sucre.

### 2.1.2.8. Características Técnicas de Construcción del Poliducto

Todo el sistema de tuberías del poliducto está unido mediante soldaduras y el material utilizado para la construcción de estas tuberías es:

**Tabla 9: Características Técnicas de la Tubería del Poliducto**

Progresivas		Características Técnicas de la Tubería del PCS					
Inicial	Final	Longitud Sector	Diámetro Exterior	Espesor	API de Tubería	Peso	
		(Km.)	Pulg (mm)	Pulg (mm)		Lb/Pie (Kg/m)	
0+000	236+567	236,6	6,625 (168,3)	0,280 (6,4)	SCH-40 5LX- Grado B	17,0 (25,4)	
236+567	303+782	67,2	4,5 (114,3)	0,237 (6,0)	SCH-40 5LX- Grado B	10,8 (16,1)	

**Fuente:** Extraído de Y.P.F.B. Transporte S.A.

Se proporciona un desglose de las características técnicas de la tubería a lo largo del poliducto Camiri-Sucre, ofrece una información detallada sobre las especificaciones técnicas de la tubería en cada tramo.

### 2.1.2.9. Dimensiones de los Tramos Poliducto Camiri-Sucre

A lo largo de la totalidad del sistema de control de procesos, que comprende el poliducto Camiri-Sucre, se pueden identificar distintos segmentos, cada uno caracterizado por sus dimensiones particulares. Estos segmentos, distribuidos a lo largo de la extensión del poliducto.

Para proporcionar una comprensión más detallada de la configuración del poliducto, se incluye el perfil longitudinal correspondiente en el Anexo 2 y Anexo 3, ofreciendo así una representación gráfica adicional que complementa la información de las dimensiones de cada segmento

**Tabla 10: Dimensiones del Poliducto Camiri-Sucre**

<b>Descripción</b>	<b>Progresiva</b> <b>(Km.)</b>	<b>Diámetro</b> <b>(Pulg.)</b>	<b>Altura</b> <b>(msnm)</b>
Chorety	00.000	6"	810
Monteagudo	74+800		
<b>Long. de Tramo</b>	<b>74.800</b>		
Monteagudo	74+800	6"	1.312
El Rosal	126+000		
<b>Long. de Tramo</b>	<b>51.200</b>		
El Rosal	126+000	6"	2.080
Tarabuquillo	176+254		
<b>Long. de Tramo</b>	<b>50.254</b>		
Tarabuquillo	176+254	6"	2.333
Tapirani	236+567		
<b>Long. de Tramo</b>	<b>60.313</b>		
Tapirani	236+567	4"	2.963
Qhora Qhora	303+782		2.770
<b>Long. de Tramo</b>	<b>67.215</b>		
<b>Long. Total Ducto</b>	<b>303.782</b>		

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística

Se detalla la información de la longitud de los tramos entre estaciones de bombeo, así como también la altura a la que se encuentran las mencionadas estaciones de bombeo a lo largo del poliducto Camiri-Sucre.

## 2.2. INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS

### 2.2.1. Presión de Diseño

La presión experimenta cambios de una estación a otra según el producto en tránsito, de acuerdo con los siguientes valores:

**Tabla 11: Presión de Diseño del PCS**

ESTACION	Presión de Diseño (Kg/cm <sup>2</sup> - Psi)	
	Succión	Descarga
CAMIRI	26 - 370	82 – 1.166
MONTEAGUDO	20 - 284	87 – 1.237
EL ROSAL	16 - 228	52 - 739
<b>TARABUQUILLO</b>	<b>16 - 228</b>	<b>90 – 1.280</b>
TAPIRANI	10 - 142	62 – 882

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS

Se detallan las presiones de diseño, abarcando tanto la presión de succión como la de descarga, y resaltando las presiones máximas y mínimas a las cuales el poliducto puede operar. Esta tabla ofrece una visión completa de los parámetros de presión críticos, proporcionando información esencial sobre los límites operativos del sistema.

### 2.2.2. Presión de Operación

El monitoreo y control de la presión de operación son esenciales para asegurar la integridad del poliducto, optimizar el rendimiento del sistema y mantener la seguridad operativa, evitando tanto situaciones de bajo rendimiento como posibles riesgos asociados con variaciones extremas de presión.

**Tabla 12: Presión de Operación en Psi (Lbf/pulg2)**

ESTACION		DO		JF		GE		GLP	
		MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
Camiri	<b>Succión</b>	213	28	70	28	156	28	370	227
	<b>Descarga</b>	1.166	1.052	1.109	995	1.052	967	967	739
Monteagudo	<b>Succión</b>	213	28	213	28	213	28	284	99
	<b>Descarga</b>	1.237	981	1.223	967	1.109	881	1.024	782
Rosal	<b>Succión</b>	113	28	113	28	113	28	256	99
	<b>Descarga</b>	810	739	796	725	739	682	640	568
Tarabuquillo	<b>Succión</b>	<b>56</b>	<b>28</b>	<b>56</b>	<b>28</b>	<b>56</b>	<b>28</b>	<b>199</b>	<b>99</b>
	<b>Descarga</b>	<b>1.280</b>	<b>1.137</b>	<b>1.280</b>	<b>1.109</b>	<b>1.251</b>	<b>1.095</b>	<b>1.137</b>	<b>967</b>
Tapirani	<b>Succión</b>	142	28	142	28	142	28	256	99
	<b>Descarga</b>	881	824	881	824	824	711	739	568
Qhora-Qhora	<b>Succión</b>	14	0	28	0	14	0	142	113
	<b>Descarga</b>	-	-	-	-	-	-	-	-

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística

Se detallan las presiones de operación de los fluidos transportados a lo largo del poliducto, presentando tanto los valores máximos como mínimos. Esta tabla específicamente desglosa las presiones operativas en las diversas estaciones de bombeo, ofreciendo una visión detallada de las variaciones en los niveles de presión a lo largo del sistema.

### 2.2.3. Datos de Tubería

Los datos relativos a la tubería del poliducto Camiri-Sucre, específicamente en el tramo 1 desde Choretty hasta la estación de bombeo Tapirani, constituyen un componente fundamental para el análisis detallado de la infraestructura. Estos incluyen características técnicas, espesor de la pared y la rugosidad fueron tomados de acuerdo al tipo de tubería.

**Tabla 13:** Características condiciones actuales tramo 1

Diámetro Externo	Diámetro Interno	Espesor de la pared	Rugosidad
6,625 in	6,065 in	0,280 in	0,0032 $\mu$ ft

**Fuente:** Extraído de Cangzhou Yizeng Industry Co., Ltd.

Se detalla las características de la tubería en el tramo 1, donde se encuentra la estación de bombeo de Tarabuquillo en el poliducto Camiri-Sucre.

#### 2.2.4. Datos de Capacidad

La capacidad se ve afectado por los parámetros límite de operación del poliducto, que definen la máxima capacidad de bombeo para cada producto (PCS).

**Tabla 14:** Régimen de envío de Capacidad

PRODUCTOS	REGIMEN DE ENVIO	
	(M <sup>3</sup> / DIA)	BPD
GLP	600	3.774
Gasolina Especial	550	3.459
Diésel Oíl	500	3.145
Jet fuel	500	3.145

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS

La información contenida en la tabla ofrece una detallada descripción de los caudales actuales de transporte en el poliducto Camiri-Sucre, presentando una visión minuciosa de los volúmenes de flujo que atraviesan el sistema en diferentes puntos. Este análisis proporciona datos cruciales para comprender y evaluar el rendimiento operativo del poliducto, permitiendo una visualización precisa de la distribución y magnitud de los flujos a lo largo de su extensión.

**Tabla 15:** *Régimen de envío máximo en PCS*

<b>PRODUCTOS</b>	<b>MAXIMO (BPD)</b>
GLP	8.386
Gasolina Especial	7.686
Diésel Oil	6.988
Jet fuel	6.988

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS

La información proporcionada en la tabla hace referencia a los caudales máximos que la capacidad del poliducto puede soportar. Estos datos son críticos para entender y gestionar la operación eficiente del sistema de transporte de hidrocarburos.

### **2.2.5. Gravedad Específica de los Productos Transportados**

Teniendo las siguientes características principales de los productos transportados:

**Tabla 16:** *Propiedades de los productos*

<b>Producto</b>	<b>Gravedad Específica</b>
<b>GLP</b>	0,530 – 0,570
<b>Gasolina</b>	0,720 - 0,724
<b>Jet Fuel</b>	0,773 – 0,788
<b>Diésel Oil</b>	0,825– 0,835

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS

En el contexto de la tabla, se ofrece un desglose de las propiedades del fluido correspondientes a los diversos productos que el poliducto Camiri-Sucre transporta.

### **2.2.6. Dimensionamiento de la Bomba**

Para realizar los cálculos en esta sección se mostró solo del tramo Tarabuquillo – Tapirani, ya que el objeto de estudio como tal fue la estación Tarabuquillo, se utilizó los 4 productos

transportados para nuestros cálculos pero para la selección se tomó solo en cuenta el producto de Gas Licuado de Petróleo (GLP).

El proceso de análisis de dimensionamiento para la selección de la bomba inicia con la realización de cálculos de altura, los cuales son importantes para determinar las especificaciones adecuadas del equipo a utilizar en el sistema.

El cálculo de la cabeza de presión absoluta debida a la presión atmosférica o de otro tipo, en la superficie del líquido que va a la aspiración, pies de líquido.

$$hp = \frac{Pop * 144}{\delta} \quad \text{Ec(14)}$$

El cálculo de la altura de la presión absoluta de vapor del líquido a la temperatura de aspiración, pies de líquido.

$$hpva = \frac{Pvap * 144}{\delta} \quad \text{Ec(15)}$$

El cálculo de la altura de generada por la velocidad de ingreso, si se realiza de un tanque se considera 0.

$$hva = \frac{v^2}{2 * g} \quad \text{Ec(16)}$$

Calculo del área de la tubería con la ecuación.

$$A = \frac{\pi * D_i^2}{4} \quad \text{Ec(17)}$$

Calculo de la velocidad del flujo con la ecuación.

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec(5)}$$

Calculo del número de Reynolds con la ecuación

$$Re = \frac{v * D * \delta}{\mu} \quad \text{Ec(6)}$$

Calculo de factor de fricción (Régimen Turbulento Rugoso). Ecuación de Swamme y Jain

$$f = \frac{0,25}{\log \left( \frac{R/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)^2} \quad \text{Ec(8)}$$

Calculo de la altura de fricción, o pérdida de altura debida a la fricción de flujo en la tubería de succión, incluidas las pérdidas de entrada y salida,

$$hf = f * \left( \frac{L}{D} \right) * \left( \frac{v^2}{2 * 32,2} \right) \quad \text{Ec(9)}$$

Calculo del Cabezal Neto de Succión Positivo

$$NPSH_R = hp - hvpa + hst - hf - hvh - ha \quad \text{Ec(13)}$$

Calculo de la Potencia Hidráulica

$$hyd\ hp = \frac{Q * \Delta P}{1714} \quad \text{Ec(11)}$$

Calculo de Potencia Mecánica necesaria para funcionar la bomba

$$bhp = \frac{hyd\ hp}{e} \quad \text{Ec(12)}$$

Número de unidades de Bombeo

$$N^o = \frac{HP_{requerido}}{HP_{Standard}} * 1,25 \quad \text{Ec(18)}$$

A continuación, se presenta de manera detallada la tabulación de los resultados obtenidos al evaluar la diversidad de productos transportados por el poliducto en la estación de Tarabuquillo. Los cálculos han sido llevados en una planilla, y se encuentra disponible en Anexo 1

### 2.2.6.1. Cálculos realizados a Condiciones Operativas

- **Diésel Oíl**

A continuación se realizaron los cálculos, según la secuencia previamente mencionada con las condiciones operativas del producto diésel oíl.

**Tabla 17: Tabla de Resultados (Diésel Oíl)**

<b>Diésel Oíl</b>	
<b>hp (m)</b>	1.084,78
<b>hst (m)</b>	630
<b>hpva (m)</b>	1.084,78
<b>hva (m)</b>	47,06
<b>Re (adim)</b>	19.931
<b>f (adim)</b>	0,052
<b>hf (m)</b>	514,34
<b>NPSH<sub>A</sub> (m)</b>	68,6

**Fuente:** Elaboración Propia con cálculos realizados

Presenta un desglose pormenorizado de los resultados obtenidos del producto conocido como diésel oíl.

- **Gas Licuado de Petróleo**

A continuación se realizaron los cálculos, según la secuencia previamente mencionada con las condiciones operativas del producto gas licuado de petróleo.

**Tabla 18: Tabla de Resultados (Gas Licuado Petróleo)**

<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	
<b>hp (m)</b>	1.467,43
<b>hst (m)</b>	630
<b>hpva (m)</b>	1.467,34
<b>hva (m)</b>	67,77
<b>Re (adim)</b>	514.294
<b>f (adim)</b>	0,0496
<b>hf (m)</b>	521,08
<b>NPSH<sub>A</sub> (m)</b>	108,92

**Fuente:** Elaboración Propia con cálculos realizados

Presenta un desglose pormenorizado de los resultados obtenidos del producto conocido como gas licuado de petróleo.

- **Gasolina Especial**

A continuación se realizaron los cálculos, según la secuencia previamente mencionada con las condiciones operativas del producto gasolina especial.

**Tabla 19: Tabla de Resultados (Gasolina Especial)**

<b>Gasolina Especial</b>	
<b>hp (m)</b>	1.218,82
<b>hst (m)</b>	630
<b>hpva (m)</b>	1.218,82
<b>hva (m)</b>	31,53
<b>Re (adim)</b>	141.525
<b>f (adim)</b>	0,0499
<b>hf (m)</b>	592,64
<b>NPSH<sub>A</sub> (m)</b>	50,83

**Fuente:** Elaboración Propia con cálculos realizados

Presenta un desglose pormenorizado de los resultados obtenidos del producto conocido como gasolina especial.

- **Jet Fuel**

A continuación se realizaron los cálculos, según la secuencia previamente mencionada con las condiciones operativas del producto Jet Fuel.

**Tabla 20: Tabla de Resultados (Jet Fuel)**

<b>Jet Fuel</b>	
<b>hp (m)</b>	1.152,9
<b>hst (m)</b>	630
<b>hpva (m)</b>	1.152,9
<b>hva (m)</b>	47,06
<b>Re (adim)</b>	64.238
<b>f (adim)</b>	0,0504
<b>hf (m)</b>	498,30
<b>NPSH<sub>A</sub> (m)</b>	84,87

**Fuente:** Elaboración Propia con cálculos realizados

Presenta un desglose pormenorizado de los resultados obtenidos del producto conocido como jet fuel.

#### **2.2.6.2. Cálculo de Potencia Requerida**

En el siguiente paso, se han realizado cálculos para determinar las potencias necesarias para transportar diversos productos, siendo notable que el Gas Licuado de Petróleo (GLP) demanda la mayor potencia de trabajo.

**Tabla 21: Tabla de Resultados de Potencias Requeridas**

<b>Potencia</b>	<b>Diésel Oil</b>	<b>Gasolina Especial</b>	<b>Jet Fuel</b>	<b>GLP</b>
<b>Hyd (HP)</b>	86,81	76,75	86,81	100,05
<b>BHP (HP)</b>	115,75	102,33	115,75	<b>133,39</b>

**Fuente:** Elaboración Propia con cálculos realizados

Se proporciona el cálculo de las potencias hidráulicas y mecánicas que requieren los productos transportados. Con base a estos resultados, se llevara a cabo la selección de la bomba necesaria, asegurando que sea el adecuado para el sistema.

## 2.3. ANALISIS Y DISCUSION

### 2.3.1. Selección de la Bomba

Después de llevar a cabo los cálculos exhaustivos y necesarios, se llevará a cabo el proceso de selección de la bomba de reemplazo en la estación de Tarabuquillo, este paso es esencial en el contexto de transporte de hidrocarburos, ya que la elección de la bomba adecuada tiene un impacto directo en la capacidad de respuesta del sistema, la selección se convierte en un componente clave para asegurar que la nueva bomba cumpla con los requerimientos específicos de la estación, y así también contribuya al rendimiento del poliducto.

- **Bomba Reciprocante Triplex**

Caudal: 53900 BPD

Marca: Aldrich

Modelo: 286-49080 Triplex 27/8" x6"

Tubería: 1-8 in

Presión: 1500 Max.

Motor: Eléctrico 180 HP

Marca: General Electric

Modelo: 5k6447CK316

Grupo electrógeno Waukesha Modelo L-3711G 380V, 50Hz, C1000 RPM a gas natural

- **Bomba Reciprocante Triplex Vertical**

Caudal: 4285 BPD

Marca: Aldrich Groff

RPM: 240

Tubería: 1-8 in

Motor: A diésel

Rango de presión: 15 psi – 1540 psi

Motor: Eléctrico: 135 HP

- **Bomba Reciprocante Triplex**

Caudal: 18869,4 BPD

Marca: RUHRPUMPEN

RPM: 450

Tubería: 1-8 in

Motor: A diésel

Presión máxima: 7252 psi

Motor Eléctrico: 100 HP

Eficiencia Mecánica: 90%

Utilizando la potencia calculada, se examina el número de bombas necesarias según las alternativas propuestas, de las cuales se conocen tres, con datos obtenidos en catálogos de bombas. Se asume una potencia estándar de 1,25 HP, selecciona en función de los HP necesarios y la disponibilidad en el mercado de bombas de ese tamaño.

$$N^o = \frac{HP_{requerido}}{HP_{Standard}} * 1,25 \quad \text{Ec(18)}$$

**Tabla 22:** Número de Unidades de Bombeo en base a la selección

Marca	Tipo de Bomba	HP requerido (HP)	HP standard (HP)	No Bomba	No Bomba
<b>Aldrich</b>	<b>Reciprocante Triplex</b>	<b>133,39</b>	<b>180 HP</b>	<b>0,923</b>	<b>1</b>
Aldrich Groff	Reciprocante Triplex	133,39	135 HP	1,33	2
	Vertical				
<b>RUHRPUMPEN</b>	<b>Reciprocante Triplex</b>	<b>133,39</b>	<b>100 HP</b>	<b>1,66</b>	<b>2</b>

**Fuente:** Elaboración Propia con cálculos realizados

Con el resultado obtenido en la tabla de la cantidad o el número de bombas necesarias con respecto a la capacidad presentada, se propone considerar para su selección la primera opción siendo esta una bomba Reciprocante Triplex con una potencia de 180 HP de la marca Aldrich,

ya que se utilizaría 1 unidad de bombeo y 1 unidad de respaldo para su eficiente funcionamiento de la estación de Tarabuquillo, por su facilidad de operación y presentar una capacidad de 53,9 MBPD para el funcionamiento.

### 2.3.2. Análisis de Costos en la Inversión

La consideración de una inversión en una unidad de reemplazo para la Estación de Bombeo de Tarabuquillo se posiciona como una estrategia clave para mejorar y optimizar las operaciones del poliducto Camiri-Sucre. Este enfoque se centra en la eficiencia y la modernización de las instalaciones para asegurar un rendimiento óptimo y sostenible a lo largo del tiempo.

La siguiente tabla proporciona una visión detallada de la inversión requerida para garantizar la óptima operación del poliducto Camiri-Sucre en la estación de Tarabuquillo, consolidando así la información esencial para respaldar la toma de decisiones estratégicas en el contexto del desarrollo y mantenimiento de las infraestructuras de transporte de hidrocarburos.

**Tabla 23: Tabla de Costo de Inversión**

DETALLE	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	TOTAL (USD)
<b>ADQUISICION DE MATERIAL</b>				
Bombas	HP	2	35.605	71.210
<b>TOTAL (USD)</b>				<b>71.210</b>
<b>ESTACION DE BOMBEO</b>				
Obras Mecánicas	--	1	35.000	35.000
Repuestos y Mantenimiento	--	1	50.000	50.000
<b>TOTAL (USD)</b>				<b>85.000</b>
<b>TOTAL INVERSION (USD)</b>				<b>156.210</b>

**Fuente:** Elaboración Propia en base a datos aproximados de catálogos

Al explorar los detalles de esta inversión, se determinó que el costo de la inversión es 156.210 dólares americanos (USD), equivalentes al tipo de cambio 6,97 bs c/dólar vigente el día 30 de Noviembre del año 2023, se revela la inversión total necesaria para llevar a cabo la renovación de la unidad de bombeo, lo cual incluye tanto los costos asociados con la adquisición de la nueva unidad como los relacionados con su mantenimiento continuo, en el marco de esta evaluación de inversión, no se ha incluido el gasto asociado a la adquisición de nuevas válvulas. Esta omisión se justifica como recomendación de aprovechar las válvulas existentes como medida de reducir costos, en caso de que sea estrictamente necesario realizar un reemplazo, se contemplara y presupuestara como parte integral de los costos generales destinados a repuestos y mantenimiento, presentados en la Tabla 23. Este enfoque busca optimizar la gestión de los recursos al considerar la reutilización de las válvulas existentes, siempre y cuando cumplan con los estándares y requisitos técnicos necesarios.

### CAPITULO III: CONCLUSIONES

- El diagnostico de las condiciones operativas en la estación ha arrojado una visión integral, destacando áreas críticas que demandan intervención para optimizar la eficacia operativa y salvaguardar la integridad del poliducto. Este análisis evidencia la prudencia de proceder con la renovación de la unidad de bombeo en la Estación Tarabuquillo, una medida esencial para asegurar el funcionamiento eficiente del poliducto. La presente monografía se alinea de manera coherente con las inversiones propuestas en el plan estratégico de YPFB, respaldando por un análisis de los desafíos operativos.
- El proceso de dimensionamiento para la identificación de la unidad de bombeo de reemplazo en la estación de Tarabuquillo realizado en la investigación revelo como una etapa esencial. Este análisis considero tanto las demandas actuales como las máximas capacidades del poliducto, asegurando que la nueva unidad de bombeo cumpla con los requisitos operativos a largo plazo. La identificación precisa de esta unidad de reemplazo fue crucial para mantener la confiabilidad y la capacidad de respuesta del sistema.
- La selección de la bomba en la estación de Tarabuquillo para adecuarla a la capacidad del poliducto se realizó con meticulosidad. Este proceso considero factores como la confiabilidad operativa, la potencia mecánica del sistema que llego a ser 133 HP y la seleccionada bomba reciprocante triplex con una potencia mecánica de 180 HP. La elección de la bomba adecuada fue fundamental para mantener un flujo constante y eficiente a lo largo del poliducto, evitando posibles fugas o fallas y optimizando el rendimiento del sistema a través de la estación de bombeo.
- El análisis de costos de inversión para la renovación de la unidad de bombeo fue un inicio para la actividad económica de la intervención propuesta en esta monografía, proporcionando una evaluación de la inversión necesaria para llevar a cabo la mejora. Este análisis no solo pudo identificar los costos directos asociados con la adquisición de la nueva bomba, sino también los gastos indirectos, tales como instalación, mantenimiento y posibles costos operativos a lo largo de su vida útil.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(API), A. P. (Octubre de 1991). API Recommended Practice 14E. *API Recommended Practice 14E*. Washington DC, Estados Unidos.

Agencia Nacional Hidrocarburos. (20 de Febrero de 2013). Obtenido de [https://www.anh.gob.bo/InsideFiles/Documentos/Documentos\\_Id-167-170703-1002-0.pdf](https://www.anh.gob.bo/InsideFiles/Documentos/Documentos_Id-167-170703-1002-0.pdf)

Amores Cristobal, F. G. (Febrero de 2014). UPSE. Obtenido de UPSE: <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/1668/1/ESTUDIO%20PARA%20INCREMENTAR%20LA%20CAPACIDAD%20DE%20TRANSPORTE%20DE%20DERIVADOS%20DE%20PETR%C3%93LEO%20E%2080%93%20AN%C3%81LISIS%20HIDR%C3%81ULICO%20EN%20EL%20POLIDUCTO%20LIBERTAD%20E%2080%93%20MA>

ANH. (2022). *Agencia Nacional de Hidrocarburos*. Obtenido de Agencia Nacional de Hidrocarburos: [https://www.anh.gob.bo/InsideFiles/Documentos/Documentos\\_Id-939-220411-0234-0.pdf](https://www.anh.gob.bo/InsideFiles/Documentos/Documentos_Id-939-220411-0234-0.pdf)

Crane. (1992). *Flujo de fluidos en valvulas, accesorios y tuberias*. D.F Mexico, Mexico: McGRAW-HILL.

Fesmex. (Enero de 2020). *FESMEX Fluid Equipment Supply*. Obtenido de FESMEX Fluid Equipment Supply: <https://www.fesmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/>

Garaicochea, F. (1991). *Scribd*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/399596760/LIBRO-GARAICOCHEA-TRANSPORTE-DE-HIDROCARBUROS-POR-DUCTOS-pdf>

Institute, H. (1954). *HathiTrust*. Obtenido de HathiTrust: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015024496898&seq=5>

Maps, G. (Noviembre de 2023). *VYMaps.com*. Obtenido de VYMaps.com: <https://vymaps.com/BO/Estacion-de-Bombeo-Tarabuquillo-YPFB--151487/>

McCabe, Smith, Harriot. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingenieria Quimica* (7ma ed.). D.F. Mexico, Mexico: McGraw-Hill Interamericana.

Nariño Olarto, K. D. (julio de 2021). Cambio de bomba BB-0450 en la planta Sebastopol para asegurar entrega de productos refinados a clientes y consignatarios de Cenit . Bogota, Colombia. Obtenido de [http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/11062/CAMBIO\\_BOMBA\\_ENTREGA\\_CONSIGNATARIO\\_PLANTA\\_SEBASTOPOL\\_.pdf?sequence=3](http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/11062/CAMBIO_BOMBA_ENTREGA_CONSIGNATARIO_PLANTA_SEBASTOPOL_.pdf?sequence=3)

Rios Narváes , C. A. (20 de Febrero de 2017). *DSpace Universidad Indoamerica*. Obtenido de DSpace Universidad Indoamerica: <https://repositorio.uti.edu.ec/bitstream/123456789/487/1/TESIS%20RIOSNARVAEZ%20CESAR%20ANTONIO.pdf>

Sampieri, R. (2014). *Metodologia de la Investigacion*. D.F. Mexico: Mc Graw Hill Education.

Suarez , J. (2021). Dimensionamiento de la ampliacion de capacidad de transporte del poliducto Choretty-Sucre. Santa Cruz, Bolivia. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/qdownload/trabajo-de-modalidad-de-grado-fernando-2-pdf-free.html>

Tomina, G. A. (2016). *Plan Territorial de Desarrollo Integral*. Tomina. Obtenido de <https://sucre.bo/wp-content/uploads/2021/10/Plan-Territorial-de-Desarrollo-Integral-2016-2020.pdf>

Vedia, J. (2005). *¿A dónde vas Chuquisaca...?* (Primera ed.). Sucre, Bolivia: Tupac Katari.

YPFB. (2018). *Manual de Operacion del Poliduto Camiri-Sucre*. Sucre: YPFB Logistica.

YPFB. (2023). *YPFB Transporte*. Obtenido de YPFB Transporte: <https://www.ypfbtransporte.com.bo/memoria-anual/>

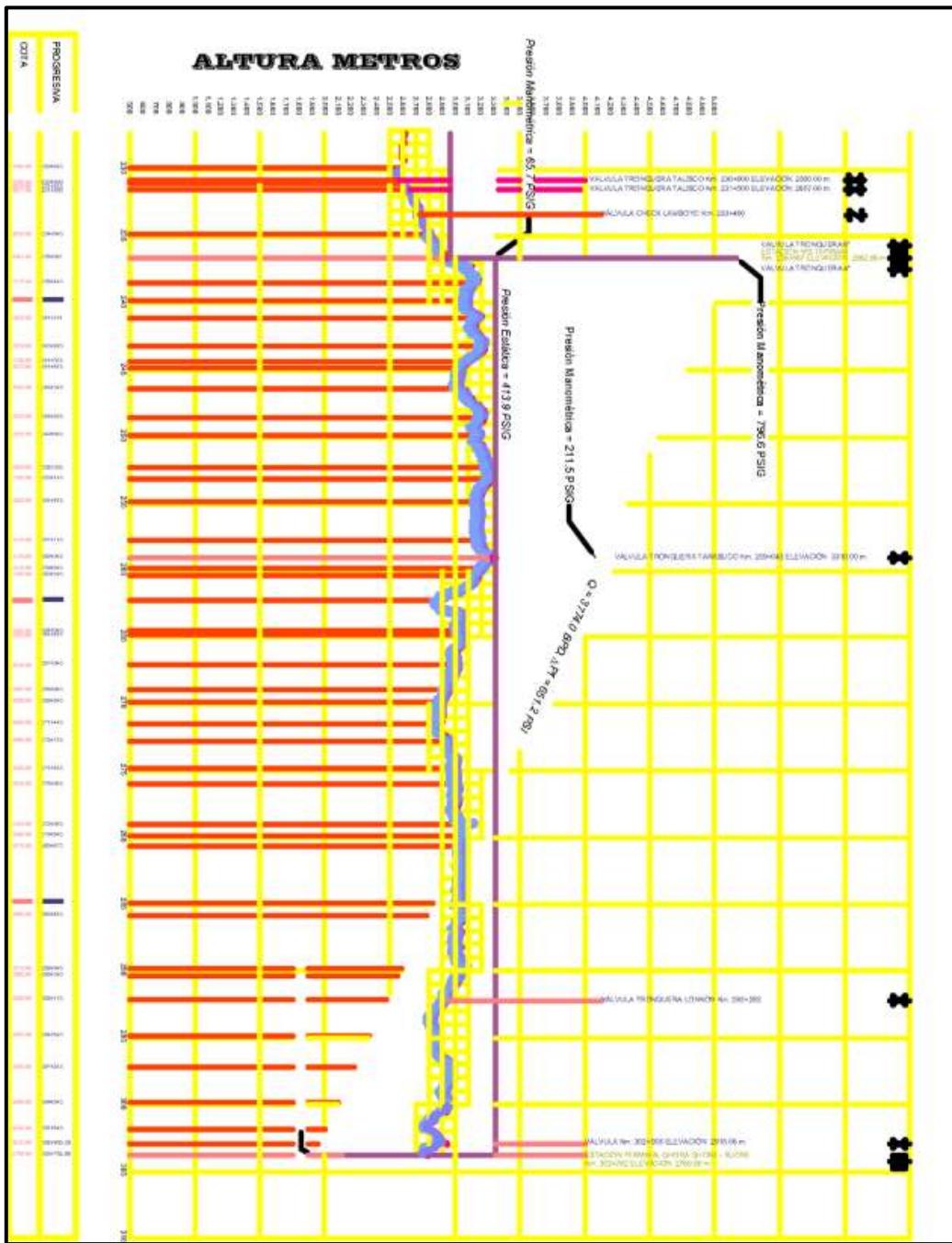
## ANEXOS

### Anexo 1: Hoja de Cálculo NPSH

CALCULO DIESEL OIL			
Densidad	lb/ft <sup>3</sup>	51,79	
Presion de operacion:	psig	1280,00	
hp	ft	3558,99	
Densidad	lb/ft <sup>3</sup>	51,79	
Presion de vapor	psig	1280,00	
hVpa	ft	3558,99	
hst	m	630,00	
	ft	2068,93	
Caudal	BPD	6988,0	
	m <sup>3</sup> /s	0,0129	
	ft <sup>3</sup> /s	0,454	
Diametro	m	0,025	
	ft	0,153	
Rugosidad	m	0,003	
	ft	1,050E-02	
Densidad	lb/ft <sup>3</sup>	51,79	
	kg/m <sup>3</sup>	829,596	
Viscosidad	cP	4,453	
Area	m <sup>2</sup>	0,018	
	ft <sup>2</sup>	0,198	
Velocidad 1	ft/s	55,040	
Gravedad	m/s <sup>2</sup>	9,810	
hvh	ft	154,404	
CALCULO DIESEL OIL			
Perdida de caida de friccion			
Longitud Tuberia	m	60313,000	
	ft	197877	
Valvula Bola	cant	2	
Valvula Gate	cant		
Valvula Check	cant	1	
Valvula Globo	cant		
Valvula Plug	cant		
Codo 90	cant	4	
Codo 45	cant		
Tee as Elbow	cant		
Boquilla de Recipiente	cant		
Filtros strainer	cant		
Longitud Total Accesorios	m	449,2	
	ft	1473,6	
Longitud Total	m	60762,2	
	ft	199350,9	
Velocidad	m/s	0,70	
	ft/s	2,29	
Reynolds	adim	19931	
Factor friccion "f"	adim	0,0520	
Perdida de friccion	m	514,56	
hf	ft	1687,47	
NPSHA	ft	225,0587117	
DO			
hp	ft	3558,99	1064,78
hVpa	ft	3558,99	1064,78
hst	ft	2068,93	630
hf	ft	1687,47	514,54
NPSHA	ft	225,06	66,6

**Fuente:** Elaboración Propia en base a API 14 E

## **Anexo 2: Perfil Longitudinal PCS**



**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística, 2018

**Anexo 3: Perfil Longitudinal Tarabuquillo-Tapirani**

TRAMO	ALTURA (msnm)		LONGITUD (m)	
	Punto Inicial	Punto final	Longitud de tramo	Progresiva
83	2453,139	2575,414	11469,511	186640,454
84	2575,414	2526,966	2101,814	188742,2675
85	2526,966	2563,02	2315,805	191058,0725
86	2563,02	2638,838	1759,269	192817,3414
87	2638,838	2662,938	1494,718	194312,0593
88	2662,938	2735,53	1651,349	195963,408
89	2735,53	2764,036	1749,225	197712,6329
90	2764,036	2724,266	1629,254	199341,8874
91	2724,266	2681,787	2140,534	201482,4212
92	2681,787	2653,382	1690,037	203172,4585
93	2653,382	2616,614	2124,700	205297,1588
94	2616,614	2569,188	1970,472	207267,6308
95	2569,188	2679,561	2314,841	209582,4716
96	2679,561	2519,253	2286,321	211868,7921
97	2519,253	2513,31	2633,991	214502,7832
98	2513,31	2564,308	2598,598	217101,3807
99	2564,308	2715,265	1883,001	218984,3821
100	2715,265	2663,924	1903,502	220887,8845
101	2663,924	2620,245	1547,723	222435,6079
102	2620,245	2725,3	1580,607	224016,215
103	2725,3	2576,243	1965,470	225981,6849
104	2576,243	2562,021	1812,997	227794,6816
105	2562,021	2732,059	2238,085	230082,7662
106	2732,059	2809,569	3907,252	233940,0183
107	2809,569	2941,767	1679,968	235619,986

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística, 2018

**Anexo 4: Tipo y Ubicación de Válvulas**

Nº	Diámetro	Tipo	Conexión	Progresiva	Sector
1	6"	Cortina	Bridada	0+560	Planta Camiri
2	6"	Cortina	Soldada	0+675	Cuartel Abaroa
3	6"	Check	Bridada	9+500	Guapoy
4	6"	Check	Bridada	10+500	Guapoy
5	6"	Cortina	Soldada	11+768	Charaguami
6	6"	Cortina	Bridada	19+820	Ibiyeca
7	6"	Check	Bridada	20+145	Ibiyeca
8	6"	Cortina	Soldada	23+580	Ibiyeca
9	6"	Check	Bridada	29+300	Incahuasi
10	6"	Check	Bridada	29+700	Incahuasi
11	6"	Cortina	Bridada	33+000	Arrayan
12	6"	Cortina	Soldada	36+371	Muyupampa
13	6"	Cortina	Soldada	57+817	Timboypampa
14	6"	Cortina	Soldada	74+800	Monteagudo
15	6"	Cortina	Bridada	90+200	Bartolo
16	6"	Cortina	Bridada	91+550	Bartolo
17	6"	Cortina	Bridada	101+000	Rio Azero
18	6"	Check	Bridada	103+050	Rio Azero
19	6"	Cortina	Bridada	105+400	Thiyumayu
20	6"	Check	Bridada	116+700	El Salto
21	6"	Cortina	Soldada	126+100	Rosal
22	6"	Cortina	Bridada	144+970	El Phity
23	6"	Cortina	Bridada	161+500	Alcalá
24	6"	Check	Bridada	162+290	Alcalá
25	6"	Cortina	Bridada	164+346	Alcalá
26	6"	Cortina	Soldada	176+350	Tarabuquillo
27	6"	Cortina	Bridada	193+500	La Torre
28	6"	Cortina	Bridada	210+430	Rosas Mayu
29	6"	Cortina	Bridada	212+000	Coilolo
30	6"	Cortina	Soldada	218+200	Zudáñez
31	6"	Cortina	Bridada	230+800	Talisco
32	6"	Cortina	Bridada	231+500	Talisco
33	6"	Check	Bridada	233+460	Lamboyo
34	6"	Cortina	Soldada	236+450	Tapirani
35	4"	Cortina	Bridada	236+700	Tapirani
36	4"	Cortina	Soldada	259+043	Tarabuco
37	4"	Cortina	Bridada	292+282	Lonkon
38	4"	Cortina	Bridada	302+905	Qhora Qhora

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística, 2018

**Anexo 5: Planilla de Control de Operaciones Tarabuquillo**

CONTROL HORARIO DE OPERACIONES OCS.										
Estación: <b>TARABUQUILLO</b>		Fecha: <b>12/02/2014</b>		PRISIONES ( )						
UNIDADES ( )		LLE		Volumen (Litros)		Tiempo (Min)		Cant.		
HORA	1	2	3	Liq. (Litros)	Gas (Litros)	Enc. (Litros)	Ext. (Litros)	Autotanque (Litros)	Prod. (Litros)	Res. (Litros)
06:00										
07:00										
08:00										
09:00										
10:00										
11:00										
12:00										
13:00										
14:00										
15:00										
16:00										
17:00										
18:00										
19:00										
20:00										
21:00										
22:00										
23:00										
00:00										
01:00										
02:00										
03:00										
04:00										
05:00										

La muestra que se presentó anteriormente

Encargado de Eliminación (Nombre y Firma): \_\_\_\_\_

Operador (Nombre y Firma): \_\_\_\_\_

Operador (Nombre y Firma): \_\_\_\_\_

**Fuente:** Extraído de Manual de Operaciones PCS YPFB Logística, 2018