

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

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA



**DISEÑO DE LINEA DE DESCARGA DE LA BOMBA CENTRIFUGA UPB-02
ATRAVEZ DE CORRELACIONES EMPIRICAS PARA GARANTIZAR UNA
OPTIMA OPERACIÓN DE BOMBEO EN LA ESTACION DE BOMBEO ORURO**

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

GUIDO CECILIO RIOS OVANDO

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.

Guido Cecilio Ríos Ovando

Sucre, 7 diciembre del 2023

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mi Familia. Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por apoyarme en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien. A mi Madre y Padre. Por ver en mí lo que ninguna otra persona logro ver, por ser mis ojos y pies cuando no podía ver ni andar y por todo ese infinito amor.

A mis docentes de la Facultad de Tecnología, que siempre estuvieron brindándome la enseñanza y apoyo para ser un profesional.

A mis amigos. Por su mutua confianza que depositaron en mí, que siempre estuvieron en la buenas y malas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios infinitamente por la vida, por iluminar mi vida, por ser luz, esperanza mi faro y mi guía.

A mi familia por ser pilar fundamental para el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de la formación de esta carrera.

A mi madre y padre Leonor Ovando Condori, Rafael Rios Villegas (+), por brindarme el apoyo que necesitaba, confianza y amor incondicional gracias por permitirme la oportunidad, de haberme dado la vida para ser alguien en este mundo.

Agradezco a la universidad de San Francisco xavier de Chuquisaca por haberme permitido y formarme en ella

Agradezco de manera especial y sincera a mis docentes de la carrera de Ingenieria en Petroleo y gas Natural, por haberme regalado un pedazo de su conocimiento y guiado en toda la formación académica.

A los encargados y docentes del diplomado en Transporte, Almacenamiento y Distribución de Hidrocarburos de la universidad San Francisco Xavier de la Facultad de Tecnología que hacen todo el esfuerzo para que se lleve adelante este tipo de programas tambien a los docentes de las materias que dieron lo mejor para brindar su conocimiento y guiado en todo el desarrollo del diplomado.

RESUMEN

La presente monografía tiene como objetivo la implementación de un diseño de la línea de descarga de la bomba centrífuga a través de correlaciones empíricas para una óptima operación de bombeo en la estación Oruro.

YPFB Transporte S. A. procederá al desmontaje de la Bomba centrífuga de Diésel Oíl de la Estación de bombeo Chorety (Santa Cruz) y la trasladará a la estación Oruro para posteriormente realizar su montaje una unidad de bombeo principal UBP-2. En la Estación Oruro actualmente ya se cuenta con una bomba centrífuga existente, la cual estará funcionando en paralelo a la bomba a instalarse. La succión de la unidad principal de bombeo se mantendrá de la estación Chorety también la parte faltante del sistema que conforma para su eficiencia en la operación.

En el presente trabajo de investigación se realizó un diseño hidráulico teórico de los hidrocarburos a través de correlaciones empíricas para transportarlos de manera óptima a una velocidad de flujo permisible, recomendada en la norma API 14E “Recomendaciones prácticas de diseño de sistemas de tuberías”, que no cause erosión o corrosión que es acelerada por las altas velocidades.

Se realiza el cálculo del espesor óptimo para la línea de descarga de la Bomba centrífuga de Diésel Oíl de acuerdo a la norma ASMEB31.4 “Tuberías de transporte de Hidrocarburos líquidos”. Se considera el comportamiento de los caudales y la presión del hidrocarburo a las condiciones más críticas pronosticadas para asegurar su confiabilidad a lo largo del tiempo a las condiciones de trabajo, evitando posibles fallas.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
INDICE DE CONTENIDO	iv
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE TABLAS	vii
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3.1. Justificacion Practica	2
1.3.2. Justificacion Teorica.....	3
1.4 METODOLOGÍA.....	3
1.4.1. Tecnicas de Investigacion.....	3
1.4.2. Instrumentos de Investigación	4
CAPITULO II: DESARROLLO.....	5
2.1. MARCO TEORICO (CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL)	5
2.1.1. Marco Conceptual.....	5
2.1.1.1. Unidad de Bombeo	5
2.1.1.2. Sistemas de Bombeo.....	5
2.1.1.3. Fundamentos de la Estacion de Bombeo	7
2.1.1.4. Ecuaciones de Energia.....	8
2.1.1.5. Gradiente de presión total.....	12
2.1.1.6. Numero de Reynolds.	13
2.1.1.7. Rugosidad relativa.	14
2.1.1.8. Determinación del factor de fricción.	16
2.1.1.9. Flujo turbulento y Laminar.....	16

2.1.1.10.	Espesor de pared de tubería	17
2.1.1.11	Gestión de Riesgos y Seguridad en el Diseño de Líneas de Descarga	18
2.1.1.12.	Normativas y Estándares Ambientales en la Industria de Hidrocarburos	20
2.1.2.	Marco Contextual	21
2.1.2.1.	Ubicación Geográfica de la Planta	21
2.1.2.2.	Condiciones de lugar	21
2.1.2.3.	Características del fluido	22
2.1.2.4.	Sistema de Bombeo	25
2.2	INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS	27
2.2.1	Descripción del caso de estudio	27
2.2.2	Parámetros de diseño	27
2.2.3	Propiedades del fluido	29
2.2.4	Número de Reynolds	30
2.2.6	Rugosidad relativa	30
2.2.7	Factor de fricción.....	31
2.2.8	Caída de presión	32
2.2.9	Velocidad del fluido	32
2.2.10	Diámetro óptimo de tubería.....	33
2.2.11	Espesor de tubería.....	34
2.3	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	35
3.1	CONCLUSIONES	36
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
	ANEXOS	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	<i>Equilibrio de Fuerzas</i>	111
Figura 2:	<i>Factores de fricción para cualquier tipo de tubería comercial.</i>	15
Figura 3:	<i>Flujo laminar y turbulento</i>	17
Figura 4:	<i>Vista satelital estación Oruro.....</i>	21
Figura 5:	<i>Vista general de Bomba Centrifuga existente en Estación Oruro.....</i>	26
Figura 6:	<i>Vista lateral de bomba existente UPB-01.....</i>	26
Figura 7:	<i>Factor de fricción de Moody</i>	31

INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	<i>Régimen de Flujo</i>	14
Tabla 2:	<i>Rugosidad absoluta de tuberías de acero al carbono.....</i>	15
Tabla 3:	<i>Rugosidad absoluta de tuberías de acero al carbono.....</i>	16
Tabla 4:	<i>Factor de unión de Soldadura y Esfuerzo mínimo de tensión.....</i>	18
Tabla 5:	<i>Datos de la planta Oruro</i>	22
Tabla 6:	<i>Propiedades PVT</i>	27
Tabla 7:	<i>Especificaciones de la Unidad de Bombeo Principal</i>	28
Tabla 8:	<i>Especificaciones de la bomba booster</i>	29
Tabla 9:	<i>Especificaciones tecnicas del Diesel Oil</i>	29
Tabla 10:	<i>Numero de Reynolds de tuberías.....</i>	30
Tabla 11:	<i>Rugosidad relativa</i>	31
Tabla 12:	<i>Factores de fricción determinados</i>	32
Tabla 13:	<i>Caída de presión dentro de la tubería</i>	32
Tabla 14:	<i>Velocidades del fluido</i>	33
Tabla 15:	<i>Selección de diámetro optimo</i>	33

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Los antecedentes de la monografía sobre el diseño de la línea de descarga de la bomba centrífuga en la estación de bombeo Oruro se sumergen en la evolución histórica de estas estaciones, desde sus inicios hasta su complejidad actual. Se exploran los avances tecnológicos que han revolucionado las bombas centrífugas, abordando desde mejoras en materiales hasta innovaciones en sistemas de control y eficiencia energética. Además, se consideran las normativas y estándares que rigen esta industria, así como investigaciones previas que han abordado el diseño de tuberías, la eficiencia del transporte de fluidos y la seguridad en el manejo de los mismos.

Un estudio fundamental en este contexto es el realizado por Aerojet-General Corp. Sacramento, Calif. (USA) en 2011, donde se abordaron los requisitos de rendimiento y diseño para líneas de descarga de bombas (Aerojet-General Corp. , Sacramento, Calif. (USA), 2011). Este estudio, llevado a cabo en Sacramento, California, EE. UU. , se enfocó en la evaluación técnica y normativa, resaltando la importancia de cumplir con estándares específicos para garantizar la eficiencia y seguridad operativa.

Por otro lado, la investigación de Polat y Ebrinc (2010) realizada por SAE International, centrada en el diseño de un sistema de accionamiento de bomba de aceite en motores diesel, aporta puntos de vistas valiosos. Este estudio adoptó un enfoque técnico y de ingeniería de sistemas, culminando en un diseño optimizado que mejora la eficiencia y fiabilidad del sistema de bombeo.

En conjunto, estos antecedentes proporcionan una base sólida y coherente para el estudio actual. Desde la perspectiva de diseño, rendimiento, seguridad y tecnología, cada uno de estos estudios contribuye significativamente al entendimiento y desarrollo de sistemas de bombeo de diesel oil eficientes y seguros. La integración de estos conocimientos es fundamental para abordar los desafíos y objetivos específicos del presente proyecto de investigación..

1.1.1. Planteamiento del problema

El problema a abordar en la presente monografía es la pérdida de carga del fluido, la velocidad de erosión de fluidos a alta velocidad al transportar el Diesel Oil a través de largas distancias debido a un diseño inadecuado en términos de diámetro, rugosidad, materiales no resistentes a la corrosión ocasionando pérdida de eficiencia, costos elevados y posibles fugas dañando al medio ambiente y a la salud de la comunidad.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Diseñar la línea de descarga de la Bomba Centrífuga UPB-02 a través de correlaciones empíricas para garantizar una óptima operación de bombeo en la Estación de Bombeo Oruro.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Describir las características del fluido y del caso del estudio tomando en cuenta la información existente de la estación de Bombeo Oruro.
- Determinar el diámetro óptimo de la línea de descarga de acuerdo a la normativa API 14E para evitar una velocidad erosional dentro de la tubería.
- Establecer el espesor de la tubería de acuerdo a normativa ASME B31.4 para garantizar la integridad mecánica de la tubería.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1. Justificación Práctica

La monografía propuesta se enfoca en el diseño de tuberías de descarga para la bomba centrífuga de diésel UPB-02, buscando optimizar la eficiencia operativa, garantizar la seguridad y cumplir con las regulaciones. Este análisis se fundamenta en reducir pérdidas de carga, prevenir fugas, minimizar costos de mantenimiento y asegurar un suministro constante y confiable de diésel. El objetivo principal es desarrollar un diseño que no solo mejore la

operatividad del sistema, sino que también contribuya a la sostenibilidad, la rentabilidad y el cumplimiento normativo en entornos industriales y de transporte de combustible.

1.3.2. Justificación Teórica

La presente monografía se basa en fundamentos teóricos sólidos para el diseño de la tubería de descarga de la bomba centrífuga de Diésel Oíl UPB-02. Se emplean correlaciones empíricas para determinar el diámetro de las tuberías, considerando variables como el caudal y las pérdidas de carga. Además, se recurre a la norma ASME, específicamente la sección B31.4 “Tuberías de Transporte de Hidrocarburos líquidos y otros líquidos”, para determinar el espesor de la tubería de acuerdo con el material utilizado y las condiciones de operación. Estas herramientas, respaldadas por relaciones experimentales y estándares internacionalmente reconocidos, permiten un diseño preciso y seguro, garantizando la eficiencia operativa y la integridad estructural del sistema de tuberías en el transporte de diésel mediante bombas centrífugas.

1.4 METODOLOGÍA

1.4.1. Técnicas de Investigación

La investigación adoptará un enfoque cuantitativo, según su proposito corresponde a una investigación aplicada, según la fuente de datos corresponde a una investigación de tipo documental y según su alcance es de tipo descriptiva y propositiva (Gallardo Echenique, 2017).

Toda la información necesaria para el desarrollo de la presente monografía fue proporcionada con una solicitud escrita de la información a la Gerencia de YPFB – Distrito Comercial Oruro. Mediante informes, entrevistas historial de la planta, además se realizó una entrevista al encargado en Gestión de Operaciones de la Dirección de Operaciones y Mantenimiento de YPFB, también se hizo la revisión mediante fuentes secundarias como ser páginas de web oficiales de YPFB, CBHE que sean necesarias para el desarrollo de tema seleccionado también se verificó la página oficial de la Agencia Nacional de Hidrocarburos donde se encuentran la información respecto al transporte de hidrocarburos por ductos.

Esto permitirá obtener una visión detallada y actualizada de los desafíos y oportunidades específicos asociados con el diseño de la línea de descarga.

1.4.2. Instrumentos de Investigación

La investigación se estructurará en varias fases, comenzando con un análisis de las necesidades y requisitos específicos de la Estación Oruro. Esto incluirá la evaluación de las condiciones actuales, las capacidades de las infraestructuras existentes y los requisitos operativos y ambientales.

Análisis de Datos: Los datos recopilados se analizarán utilizando herramientas estadísticas y de modelado para identificar patrones, tendencias y posibles soluciones. Este análisis se basará en metodologías probadas en estudios de diseño de sistemas de bombeo, como el enfoque de desarrollo basado en modelos descrito por (S, 2019).

Desarrollo de Diseño: Basándose en el análisis realizado, se desarrollará una propuesta de diseño para la línea de descarga de la bomba de diesel oil. Este diseño considerará aspectos como la eficiencia operativa, la seguridad, la sostenibilidad y el cumplimiento de las normativas ambientales.

Esto asegurará que el diseño sea viable y efectivo en el contexto real de la Estación Oruro.

Evaluación de Impacto: Se evaluará el impacto potencial del diseño propuesto, tanto en términos de mejoras operativas como de beneficios ambientales

Documentación y Presentación de Resultados: Finalmente, los hallazgos y recomendaciones de la investigación se documentarán de manera detallada y se presentarán en un formato que sea accesible tanto para los especialistas en el campo como para los tomadores de decisiones en la Estación Oruro.

Este marco metodológico proporciona una estructura coherente y detallada para abordar la complejidad del diseño de líneas de descarga de bombas de diesel oil, asegurando que todos los aspectos relevantes sean considerados y que los resultados sean prácticos y aplicables en el contexto de la Estación Oruro. proyecto llegará a su objetivo general planteado en un principio.

CAPITULO II: DESARROLLO

2.1 MARCO TEORICO (CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL)

2.1.1. Marco Conceptual

2.1.1.1. Unidad de Bombeo

El petróleo se mantiene en movimiento por medio de un sistema de estaciones de bombeo construidas a lo largo del oleoducto y normalmente fluye a una velocidad de entre 1 y 6 m/s. En ocasiones se utiliza el oleoducto para transportar dos productos distintos o más, sin hacer ninguna separación física entre los productos. Esto crea una mezcla en donde los productos se unen llamada la interfaz. Esta interfaz debe retirarse en las estaciones de recepción de los productos para evitar contaminar los. El petróleo crudo contiene cantidades variables de cera o parafina la cual se puede acumular dentro de la tubería. Para limpiarla, suele enviarse periódicamente indicadores de inspección mecánicos a lo largo de la tubería, también conocidos como pigs (en español cerdo, chanco, cuchi, marrano, etc.) por su nombre en inglés, que se introducen por los extremos de la tubería y en las estaciones de bombeo, en los programas de mantenimiento del oleoducto. Pueden transportar diferentes tipos de petróleo como ser pesado, ligero y de diferente calidad; en las estaciones de transferencia y refinerías, se conectan con tubos más pequeños llamados poliductos, que transportan el combustible refinado del petróleo, diésel y gasolina a diferentes lugares del país.

La mayoría de las tuberías requiere la presurización del fluido para incrementar la capacidad de transporte y contrarrestar las caídas de presión. Esto se logra mediante el uso de estaciones de bombeo para las tuberías de líquidos.

2.1.1.2. Sistemas de Bombeo

Los sistemas de bombeo están compuestos de diferentes dispositivos y condiciones que se presentan en determinados procesos, y que permiten transportar fluidos a través de tuberías o líneas de petróleo. Los dispositivos más significativos dentro del sistema de bombeo son las bombas, las cuales efectúan el trabajo de adicionar energía al líquido, pero el sistema de bombeo se complementa con el uso de tuberías, válvulas, filtros y accesorios. El diseño del

sistema de bombeo lo debe realizar un experto en el área, para seleccionar el sistema de bombeo adecuado para cada caso. La información que se debe obtener, es la siguiente:

- Propiedades del fluido que se va a bombear.
- Volumen que se va a transportar.
- Condición de bombeo en la succión.
- Condición de bombeo en la descarga.
- Cabeza total de la bomba.
- Tipo de sistema al que la bomba está entregando el fluido.
- Fuente de alimentación de energía.
- Limitaciones de peso, espacio y posición.
- Condiciones ambientales.
- Costo de la bomba e instalación.
- Costo de operación de la bomba.
- Códigos y estándares.

Existe una variedad de tecnologías y equipos usados para el bombeo, entre los más usados están:

- Motores eléctricos
- Máquinas reciprocantes (motores y bombas) Los equipos más comunes consisten en:
- Bombas centrífugas

Los componentes principales de una unidad de bombeo típica son:

- Válvula de succión
- Bomba centrífuga
- Motor (eléctrico, diésel, gasolina) para mover la bomba
- Motor de Frecuencia Variable
- Válvula de descarga

- Cuando una estación de bombeo tiene más de una bomba se usa configuraciones en serie y paralelo

En la actualidad existe una gran variedad de bombas de alta tecnología que cuentan con diseños específicos para cada tipo y rangos de operación presentando un mayor rendimiento en cuanto al sistema en general.

2.1.1.3. Fundamentos de la Estacion de Bombeo

La presión generada por las bombas, se necesita para asegurar el paso del líquido a través del oleoducto. Las estaciones de bombeo están estratégicamente ubicadas a lo largo del oleoducto para proveer la presión que permita al líquido transitar a la capacidad que está diseñado el oleoducto. Los siguientes son los factores principales que causan las pérdidas de presión y consecuentemente los requerimientos de las bombas.

- Viscosidad del fluido.
- Tasa de flujo (cantidad de fluido en movimiento a través de un poliducto).
- Elevación o desnivel de terreno(topografía).

Características del fluido.

Densidad: Es la masa por unidad de volumen del combustible

Viscosidad: Resistencia que ofrecen los combustibles a ser deformados

Gravedad API: Es una medida que compara la densidad de un combustible con la del agua y define cuan liviano es o pesado.

Numero de cetano: Mide la calidad de ignición de un combustible

Capacidad calorífica: Es la energía necesaria para aumentar una unidad de temperatura de un combustible

Temperatura: Temperatura de operación del combustible

Gradiente de presión: Es el cambio de la presión atmosférica en una cierta distancia normalmente se refiere a la distancia entre dos puntos en la horizontal

Numero de Reynolds: caracteriza el movimiento de un fluido.

Factor de fricción: Es adimensional que sirve para calcular la pérdida de carga en tuberías debido a la fricción

Rugosidad relativa: Permite definir la micro geometría de las superficies para hacerlas validad para la función para la que hayan sido realizadas

Flujo Laminar: Es aquel donde el aire se desplaza en un mismo volumen y en una misma dirección a través de la sala blanca o de una zona de ambiente controlado en un flujo paralelo y de velocidad uniforme

Flujo turbulento: Es aquel en el que hay fluctuaciones en el flujo todo el tiempo y las partículas invaden la trayectoria de las partículas adyacentes, mezclándose y desplazándose de una manera aleatoria

2.1.1.4 Ecuaciones de Energia

La base teórica para la mayoría de las ecuaciones de flujo de fluidos es la ecuación general de energía, la cual es una expresión del balance o conservación de energía entre dos puntos en un sistema. Considerando un sistema de estado estable, el balance de energía se puede escribir como:

$$U_1 + p_1V_1 + \frac{m u_1^2}{2g_c} + \frac{mgZ_1}{g_c} + Q - w = U_2 + p_2V_2 + \frac{m u_2^2}{2g_c} + \frac{mgZ_2}{g_c} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

U = Energía interna.

pV = Energía de expansión o compresión.

$\frac{m u^2}{2g_c}$ = Energía cinética.

$\frac{mgZ}{g_c}$ = Energía potencial.

Q = Transferencia de calor.

W = Trabajo desenvuelto por el fluido.

Dividiendo la ecuación 1 por m para obtener un balance de energía por unidad de masa y escribiendo la ecuación resultante en forma diferencial.

$$dU + d\frac{p}{\rho} + \frac{u du}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ + dQ - dw = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

La ecuación 2 se puede convertir en un balance de energía mecánica usando la siguiente relación termodinámica:

$$dh = Tds + \frac{dp}{\rho} \quad \text{Ec. 3}$$

$$dU = dh - d\frac{p}{\rho} \quad \text{Ec. 4}$$

$$dU = Tds + \frac{dp}{\rho} - d\frac{p}{\rho} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

H = Entalpía

s = Entropía

T = Temperatura

Substituyendo la ecuación 5 en la ecuación 2, se obtiene:

$$Tds + \frac{dp}{\rho} + \frac{u du}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ + dQ - dw = 0 \quad \text{Ec. 6}$$

Para un proceso irreversible, los estados de desigualdad de Clasius son:

$$ds \geq \frac{-dQ}{T} \quad \text{Ec. 7}$$

$$Tds = -dQ + d(l_w) \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

l_w = Pérdida de trabajo, debido a la irreversibilidad.

Substituyendo la ecuación 8 en la ecuación 6 se tiene:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{u du}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ + d(l_w) - dw = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

Si ningún trabajo es hecho por el fluido, $dw = 0$, se obtiene:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{udu}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ + d(l_w) = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

Considerando una tubería inclinada por donde escurra un fluido en régimen permanente, conforme se muestra en la Figura 7, ya que $dz = dl \sin\theta$, la ecuación de energía se vuelve:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{udu}{g_c} + \frac{g}{g_c} dL \sin\theta + d(l_w) = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

La ecuación 11 se puede escribir en términos de gradientes de presión, multiplicando la ecuación por ρ / dL :

$$\frac{dp}{dL} + \frac{\rho u du}{g_c dL} + \frac{g}{g_c} \rho \sin\theta + \rho \frac{d(l_w)}{dL} = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

Considerando la caída de presión positiva en la dirección del flujo, la ecuación 12 puede ser escrita como:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{g}{g_c} \rho \sin\theta + \left(\frac{dp}{dL} \right)_f + \frac{\rho u du}{g_c dL} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde el gradiente de presión debido al esfuerzo viscoso o las pérdidas por fricción son expresados como:

$$\left(\frac{dp}{dL} \right)_f = \rho \frac{d(l_w)}{dL} \quad \text{Ec. 14}$$

Se puede definir un factor de fricción:

$$f_i = \frac{\tau_w}{\frac{\rho u^2}{2g_c}} = \frac{2\tau_w g_c}{\rho u^2} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

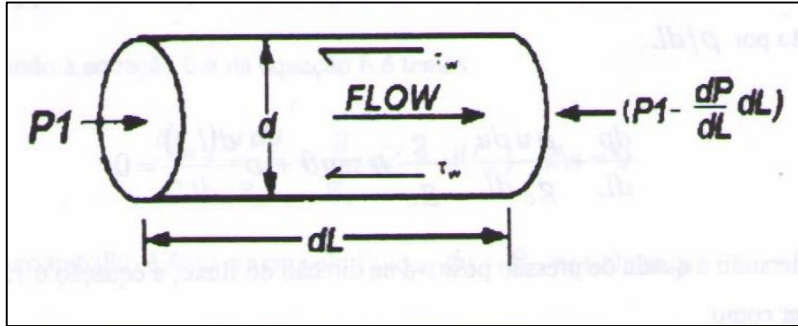
τ_w = Esfuerzo cortante.

$\frac{\rho u^2}{2g_c}$ = Energía cinética por unidad de volumen.

La ecuación 15; define la relación entre el esfuerzo cortante sobre la pared, y la energía cinética por unidad de volumen, refleja la importancia relativa del esfuerzo cortante en la pared sobre la pérdida total. El esfuerzo de corte sobre la pared puede ser válido fácilmente de un balance de fuerzas entre las fuerzas de presión y las fuerzas de viscosidad.

$$\left[p_1 - \left(p_1 - \frac{dp}{dL} dL \right) \right] \frac{\pi d^2}{4} = \tau_w (\pi d) dL \quad \text{Ec. 16}$$

Figura 1. Equilibrio de Fuerzas



Fuente: Libro de Explotación del gas y optimización de la producción - Jose L. Rivero.

Reescribiendo la ecuación 16,

$$\tau_w = \frac{d}{4} \left(\frac{dp}{dL} \right)_f \quad \text{Ec. 17}$$

Substituyendo la ecuación 17 en la ecuación 15 y resolviendo para el gradiente de presión debido a la atracción, se obtiene:

$$\left(\frac{dp}{dL} \right)_f = \frac{2f' \rho u^2}{g_c d} \quad \text{Ec. 18}$$

Esta es la ecuación de Fanning, y f' es llamado el factor de fricción Fanning. En términos del factor de fricción Darcy – Weisbach o Moody, $f \neq 4f'$, la ecuación 18 toma la siguiente forma:

$$\left(\frac{dp}{dL} \right)_f = \frac{f \rho u^2}{2g_c d} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

- u = Velocidad de flujo, ft / seg.
- g_c = Factor de conversión gravitacional 32.17 lb_m/ft / lb_f seg².
- d = Diámetro de la tubería, ft.
- f = Factor de fricción Moody.

2.1.1.5. Gradiente de presión total.

El gradiente de presión total puede ser considerado como la composición de los tres componentes del sistema.

El componente por el cambio de elevación:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{elevf}$$

Componente por la pérdida por fricción:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{friccion}$$

Ultimo componente es por los cambios en la energía cinética o aceleración:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{accel}$$

Reescribiendo la ecuación en función al gradiente de presión total se tiene:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{dp}{dL} + \left(\frac{dp}{dL}\right)_f + \frac{dp}{dL} \quad \text{Ec. 20}$$

- $\left(\frac{dp}{dL}\right)_{elevf}$: Pérdida de presión debido al peso de la columna de fluido hidrostático, esta es cero si se trata de un flujo horizontal. La pérdida de presión debido al cambio de la energía potencial entre las posiciones 1 y 2 de la Figura 8, la expresión viene dada:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{elev} = \frac{g\delta * \text{sen}\theta}{g_c} \quad \text{Ec. 21}$$

- $\left(\frac{dp}{dL}\right)_{friccion}$: Pérdida de presión por fricción, que se origina por el movimiento del fluido contra las paredes de la tubería de producción que están en función del diámetro de la tubería y las propiedades del fluido, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_f = \frac{f\rho u^2}{2g_c d} \quad \text{Ec. 22}$$

- $\left(\frac{dp}{dL}\right)_{acele}$: Caída de presión que resulta de un cambio en la velocidad del fluido entre las posiciones 1 y 2 de la Figura 8, la ecuación para la caída de presión por aceleración es la siguiente:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{acc} = \frac{\rho v dv}{g_c dL} \quad \text{Ec. 23}$$

La ecuación 13 se aplica perfectamente al flujo multifásico, debiendo modificarse ligeramente algunos términos:

- La densidad, es la densidad de la mezcla Gas-Líquido (ρ_m).
- La velocidad, es también la velocidad de la mezcla (v_m).
- El factor de fricción, es ahora factor de fricción bifásico (f_m).

Por lo tanto, la ecuación general para flujo multifásico se convierte en:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\rho_m v_m du_m}{g_c dL} + \frac{g}{g_c} \rho_m \sin \theta + \frac{f_m \rho_m v_m}{2 g_c D} \quad \text{Ec. 24}$$

2.1.1.6. Numero de Reynolds.

Reynolds, aplicó el análisis adimensional al movimiento del fluido en relación a la viscosidad para dos flujos, definiendo los parámetros adimensionales. El número de Reynolds, parámetro no dimensional, utilizado para distinguir entre un flujo laminar y turbulento, se define como la relación entre el momento de fuerzas del fluido y las fuerzas viscosas o de corte.

$$N_{RE} = \frac{d u \rho}{\mu} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

- d = Diámetro de la tubería, pulg.
- ρ = Densidad del fluido, lb_m/ ft³.
- u = Velocidad del fluido, ft/ seg.
- μ = Viscosidad del fluido, lb_m/ ft seg.

La viscosidad dinámica del fluido “ μ ”, frecuentemente indicada en cp, puede ser convertida en lb_m/ft seg. utilizando el factor de conversión de 1 cp = 6.7197x10⁻⁴ lb_m/ ft seg. Así mismo:

$$N_{RE} = 1488 \frac{d u \rho}{\mu} \quad \text{Ec. 26}$$

El número de Reynolds para líquidos puede ser expresado como:

$$N_{RE} = \frac{92.1(SG)Q_L}{d_u} \quad \text{Ec. 27}$$

El régimen de flujo es relacionado al número de Reynolds como sigue:

Tabla 1: Régimen de Flujo

TIPO DE FLUJO	N _{Re}
Laminar	< 2.000
Crítico	2.000 – 3.000
Transición	3.000 – 4.000
Turbulento	> 4.000

Fuente: Libro de Explotación del gas y optimización de la producción - Jose L. Rivero.

2.1.1.7. Rugosidad relativa.

El factor de fricción a través de una tubería es afectado por la rugosidad en la pared de la tubería. En tanto, la rugosidad de la tubería no es fácilmente ni directamente medible. La rugosidad es una función del material tubular, el método de manufactura y del medio ambiente al que es expuesto, por tanto, no es uniforme a lo largo de la longitud de la tubería. El efecto de rugosidad en tanto, no es debido a las dimensiones absolutas definida como la medida de la altura y el diámetro existentes en una zona de mayor protuberancia y una distribución relativamente uniforme, donde los grados proporcionan el mismo comportamiento del gradiente de presión. Más así, las dimensiones relativas del diámetro interno de la tubería, así mismo, la rugosidad relativa es la relación de la rugosidad absoluta y el diámetro interno de la tubería.

$$rugosidad - relativa = \frac{e}{d} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

e = Rugosidad absoluta, ft o in.

d = Diámetro interno, ft o in.

La rugosidad absoluta se determina de acuerdo al tipo de material de la tubería como sigue:

Tabla 2: Rugosidad absoluta para varios tipos de tuberías

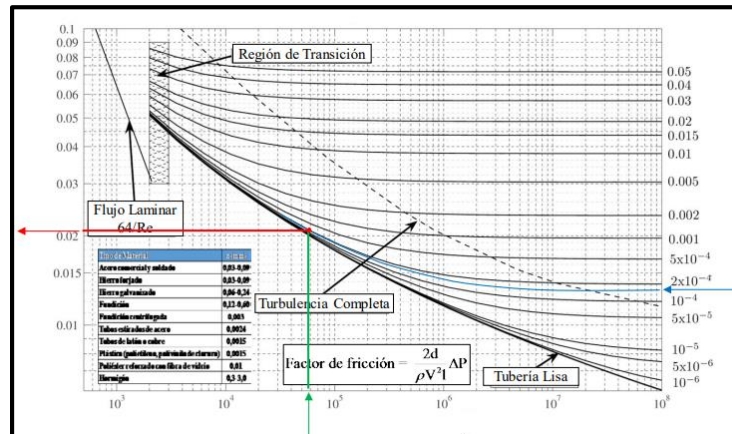
Type of Pipe (New, Clean condition)	Absolute Roughness, M		
	(mm)	(ft)	(in)
Unlined concrete	0.3 - 3.05	0.001 - 0.01	0.012 - 0.12
Cast iron (uncoated)	0.26	0.00085	0.0102
Galvanized iron	0.15	0.0005	0.006
Carbon steel	0.046	0.00015	0.0018
fiberglass epoxy	0.0076	0.000025	0.0003
Drawn tubing	0.0015	0.000005	0.00006

Increase by factor of 2-4 to allow for age and use.

Fuente: Libro de Explotación del gas y optimización de la producción - Jose L. Rivero.

Como la rugosidad absoluta no es directamente medible, la selección de la rugosidad de la tubería es difícil, especialmente si no se tienen los datos disponibles como el gradiente de presión, factor de fricción y el número de Reynolds para hacer uso del diagrama de Moody, en este caso el valor de 0.0006 es recomendado para tuberías y líneas.

Figura 2. Factores de fricción para cualquier tipo de tubería comercial.



Fuente: Libro de Explotación del gas y optimización de la producción - Jose L. Rivero.

En esta figura se lee el factor de fricción para ello se entra con los datos del número de Reynolds y la rugosidad relativa

2.1.1.8. Determinación del factor de fricción.

Los valores de flujo normalmente se encuentran entre dos extremos: flujo laminar y flujo turbulento, dentro de estos valores se distinguen cuatro zonas: laminar, crítico, transición y totalmente turbulento, para cada zona las ecuaciones varían en función del número de Reynolds y la rugosidad.

Tabla 3. *Rugosidad absoluta de tuberías de acero al carbono.*

MATERIAL DE TUBERIA	e (pulg)
Vidrio - bronce	0.00006
Tubería de pozo	0.0006
Aluminio	0.0002
Plástico	0.0002 - 0.0003
Acero comercial	0.0018
Fierro común	0.0048
Revestimiento de cemento	0.012 - 0.12

Fuente: Libro de Explotación del gas y optimización de la producción - Jose L. Rivero.

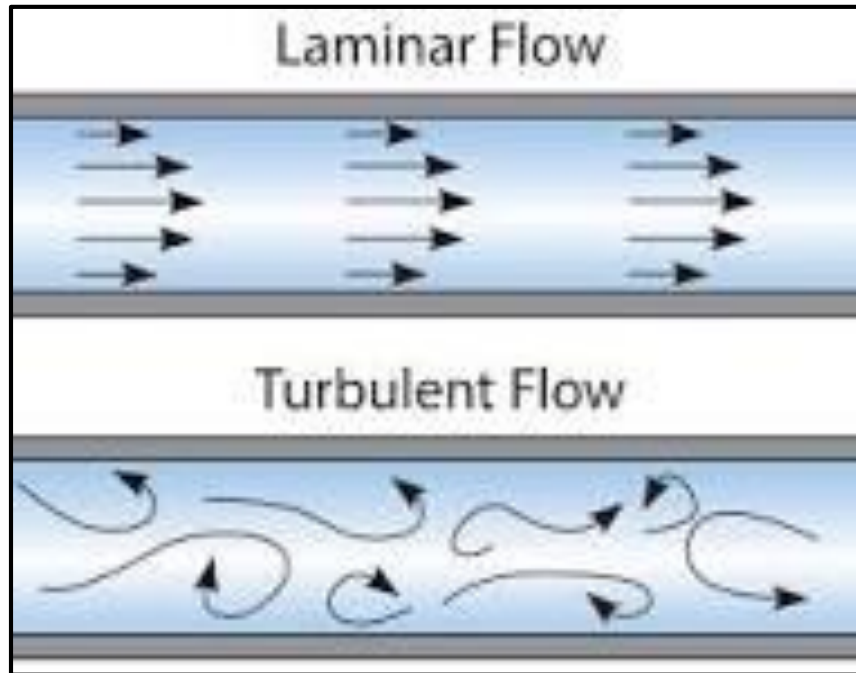
2.1.1.9. Flujo turbulento y Laminar.

Flujo Laminar: Flujo Laminar o corriente laminar, el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente. En flujos laminares el mecanismo de transporte lateral es exclusivamente molecular.

Flujo turbulento: Se llama flujo turbulento o corriente turbulenta al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las

trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos periódicos (no coordinados).

Figura 3: *flujo laminar y turbulento*



Fuente: Libro de Explotación del gas y optimización de la producción –José L. Rivero.

2.1.1.10. Espesor de pared de tubería

La presión de diseño de la tubería para sistema de tuberías de acero de líquidos o el espesor de pared nominal para una dada presión de diseño debe ser determinada por la siguiente formula:

$$t = \frac{P * do}{2(FES_y)} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

- D = Diámetro externo nominal de la tubería (pulg).
- F = Factor de Diseño, es 0,72 en todos los casos
- E = Factor de unión longitudinal obtenido de la tabla 12.

P = Presión de diseño, (psi).

S = Mínimo esfuerzo de tensión especificado, (psi), estipulado en las especificaciones bajo la cual la tubería fue comprada del fabricante. El esfuerzo de tensión mínimo de algunos de los aceros de tubería más comúnmente usados, cuyas especificaciones están incorporadas por referencia en este documento están tabulados para conveniencia en la tabla 13 del Apéndice Mandatorio D.

t = Espesor de pared nominal (pulg)¹.

Tabla 4. Factor de unión de Soldadura y Esfuerzo mínimo de tensión

Specification	Grade	Specifid Min. Yiel Strength, Psi (Mpa)	Weld Joint Factor E
API 5L	A25	25,000 (172)	1
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 106	A	30,000 (207)	1
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 106	B	35,000 (241)	1
API 5LU	U80	80,000 (551)	1
API 5LU	U100	100,000 (689)	1
API 5L	X42	42,000 (289)	1
API 5L	X46	46,000 (317)	1
API 5L	X52	52,000 (358)	1
API 5L	X56	56,000 (386)	1
API 5L	X60	60,000 (413)	1

Fuente: ASME B31.4

2.1.1.11 Gestión de Riesgos y Seguridad en el Diseño de Líneas de Descarga

Análisis de Riesgos en el Manejo de Diesel Oil: El manejo de diesel oil implica riesgos significativos, que deben ser meticulosamente analizados para garantizar la seguridad operativa. Los riesgos asociados incluyen derrames accidentales, incendios, explosiones y contaminación ambiental. Un análisis de riesgos efectivo comienza con la identificación de

posibles escenarios de fallo, como fugas en las líneas de descarga, fallos en las bombas o errores operativos. La evaluación de estos riesgos implica considerar la probabilidad de ocurrencia y el impacto potencial en términos de seguridad, salud y medio ambiente. Este análisis debe basarse en datos históricos, experiencias operativas y estudios de caso relevantes, y debe ser actualizado regularmente para reflejar cambios en las operaciones o en el entorno (Smith, 2015).

Estrategias de Seguridad y Medidas Preventivas en el Diseño: La seguridad en el diseño de líneas de descarga de bombas de diesel oil es primordial y debe abordarse mediante una combinación de medidas preventivas y estrategias de mitigación. Las medidas preventivas incluyen el diseño de sistemas de contención secundaria para contener derrames, la selección de materiales resistentes a la corrosión y la implementación de sistemas de detección de fugas. Además, es crucial incorporar dispositivos de seguridad como válvulas de alivio de presión, interruptores de emergencia y sistemas de extinción de incendios. Las estrategias de seguridad también deben incluir procedimientos operativos estándar (SOP) claros, formación regular del personal y simulacros de emergencia para preparar al personal para responder efectivamente en caso de incidentes (Jones, 2018).

Integración de Sistemas de Gestión de Seguridad: La gestión de la seguridad en el diseño de líneas de descarga debe integrarse en un sistema de gestión de seguridad más amplio. Esto implica la adopción de un enfoque sistemático para la gestión de riesgos, que incluye la evaluación regular de riesgos, la implementación de medidas de control y la monitorización continua del rendimiento de seguridad. La adopción de estándares internacionales como ISO 45001 puede proporcionar un marco para desarrollar un sistema de gestión de seguridad efectivo. Este enfoque integrado asegura que la seguridad sea una consideración central en todas las etapas del diseño, la construcción y la operación de las líneas de descarga (International Organization for Standardization, 2018).

Desarrollo Continuo y Mejora de la Seguridad: La seguridad en el diseño de líneas de descarga es un proceso continuo que requiere una revisión y mejora constantes. Esto implica mantenerse al día con los avances tecnológicos, revisar regularmente los procedimientos operativos y adaptarse a los cambios en las regulaciones y estándares de la industria. La

implementación de un sistema de gestión de seguridad que fomente una cultura de seguridad y aprendizaje continuo es esencial para lograr mejoras sostenidas en la seguridad operativa.

2.1.1.12. Normativas y Estándares Ambientales en la Industria de Hidrocarburos

Revisión de Normativas y Estándares Ambientales Aplicables: La industria de hidrocarburos está sujeta a una serie de normativas y estándares ambientales que buscan minimizar el impacto ambiental y garantizar la seguridad y la salud pública. Estos estándares son establecidos tanto por organismos reguladores internacionales como por entidades gubernamentales locales. Entre los más relevantes se encuentran las normativas de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos, las directrices de la Unión Europea y los estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO), como la ISO 14001, que se centra en los sistemas de gestión ambiental. Estas regulaciones abarcan aspectos como la emisión de contaminantes, la gestión de residuos, el control de derrames y la protección de ecosistemas sensibles (Environmental Protection Agency, 2020).

Impacto de la Legislación en el Diseño de Líneas de Descarga: La legislación ambiental tiene un impacto significativo en el diseño de líneas de descarga de bombas de diesel oil. Los requisitos legales influyen en la selección de materiales, la implementación de sistemas de control de emisiones y la adopción de medidas de seguridad para prevenir derrames y fugas. Por ejemplo, las normativas sobre emisiones volátiles pueden requerir la instalación de sistemas de recuperación de vapores en las líneas de descarga. Además, las regulaciones sobre derrames de hidrocarburos exigen que las líneas de descarga estén equipadas con sistemas de detección de fugas y planes de respuesta a emergencias. Estos requisitos legales no solo aseguran la protección del medio ambiente, sino que también guían a las empresas en la implementación de prácticas sostenibles y responsables (International Organization for Standardization, 2015).

Tendencias Futuras en Normativas y Estándares Ambientales: Se espera que las normativas y estándares ambientales en la industria de hidrocarburos continúen evolucionando en respuesta a los desafíos globales como el cambio climático y la degradación ambiental. Esto podría incluir regulaciones más estrictas sobre emisiones de gases de efecto invernadero, mayores restricciones en la gestión de residuos y un enfoque más fuerte en la sostenibilidad

a lo largo de toda la cadena de suministro. Las empresas deben estar preparadas para adaptarse a estos cambios, lo que implica una vigilancia constante de las tendencias legislativas y una inversión continua en innovación y desarrollo sostenible (United Nations Environment Programme, 2021).

2.1.2. Marco Contextual

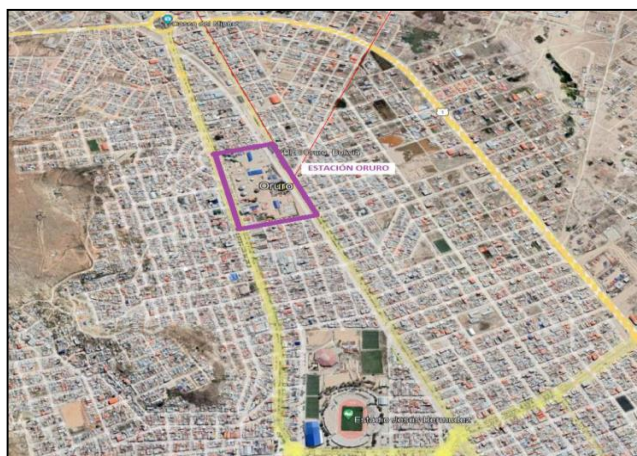
2.1.2.1. Ubicación Geográfica de la Planta

Se encuentra en la estación Oruro, coordenadas UTM: zona 19 k; 699752.09 m E ;8015941.23 m S, en el municipio de Oruro Provincia Cercado del Departamento de Oruro, en predios de YPFB PLANTA SAN PEDRO DE ORURO.

Tenemos una capacidad de almacenaje y despacho de hidrocarburos de 127.462 m³ distribuidos en 16 plantas a nivel Nacional.

El sistema de gas de transporte en la estación de Oruro inició las operaciones en el año 1987. El producto que transporta es Gas Natural y Diésel Oil.

Figura 4: Vista satelital estación Oruro



Fuente: google eart

2.1.2.2. Condiciones de lugar

Las condiciones del lugar son importantes para el diseño y funcionamiento eficiente de la bomba. A continuación, se presenta los datos del lugar de la Estación de Bombeo Oruro:

Tabla 5: Datos de la planta Oruro

Elevación	Promedio	3072 m
Presión Barométrica (atm)	Promedio	9.5 psia (653 hPa @ 3072 msnm)
Temperatura atmosférica	Promedio	60 °F
	Máxima	68 °F – (20 °C)
Temperatura Ambiente	Promedio	55 °F – (13 °C)
	Mínima	33 °F – (1 °C)
Precipitación	Promedio anual	19.2 in/año
	Máximo anual	21.0 in/año
Nevada	Promedio anual	1 día
Humedad relativa	Promedio anual	40.5 %

Fuente: www.tutitempo.net/clima/Oruro

2.1.2.3. Características del fluido

Densidad: La densidad está envuelto en la evaluación de los cambios de energía debido a la energía potencial y los cambios de energía cinética. Para calcular los cambios de densidad con los cambios de presión y temperatura, se necesita tener una ecuación de estado para el líquido sobre consideraciones. Las ecuaciones de estado son fácilmente disponibles para fluidos de fase simple.

Cuando dos líquidos inmiscibles como petróleo y el agua fluyen simultáneamente, la definición de densidad se vuelve más complicada. La densidad de una mezcla fluyente de gas – líquido es muy difícil de evaluar debido a la separación gravitacional de las fases, y la volatilidad entre las mismas. La densidad de una mezcla de petróleo – agua se puede calcular de forma aproximada de la siguiente manera:

$$\rho_L = \rho_o f_o + \rho_w f_w$$

Donde:

$$f_o = \frac{q_o}{q_o + q_w}$$

Y

$$f_w = 1 - f_o$$

Para determinar la densidad de una mezcla de gas – líquido, se necesita conocer el escurrimiento de líquido utilizando tres ecuaciones para densidad de dos fases hecha por varios autores para flujo de dos fases:

$$\rho_s = \rho_L H_L + \rho_g H_g$$

$$\rho_n = \rho_L \lambda_L + \rho_g \lambda_g$$

$$\rho_k = \frac{\rho_L \lambda_L^2}{H_L} + \frac{\rho_g \lambda_g^2}{H_g}$$

Viscosidad: La viscosidad de un fluido es utilizada en la determinación del número de Reynolds, así mismo como otros números sin dimensiones utilizados como parámetros de correlación.

El concepto de viscosidad de dos fases es discutido y tiene que ser definida en forma diferente por varios autores. Las siguientes ecuaciones utilizadas por los autores para calcular la viscosidad de dos fases de gas – líquido son:

$$\mu_n = \mu_L \lambda_L + \mu_g \lambda_g$$

$$\mu_s = \mu_L^{H_L} * \mu_g^{H_g}$$

La viscosidad de una mezcla petróleo – agua es generalmente calculada utilizando las fracciones fluyentes de petróleo y agua en una mezcla con los factores de peso. La ecuación normalmente utilizada es:

$$\mu_n = \mu_L f_o + \mu_w f_w$$

Esta ecuación no es válida si se formase una emulsión de agua – petróleo. La viscosidad de petróleo crudo, gas natural y agua puede ser estimada por correlaciones empíricas.

Velocidad: Muchas correlaciones están basadas en una variable llamada velocidad superficial. La velocidad superficial de la fase de un líquido es definida como la velocidad en la cual esa fase existiría si este fluido pasa a través de toda sección transversal de tubería. La velocidad de gas superficial está determinada por:

$$v_{sg} = \frac{q_g}{A}$$

El área real por la cual los flujos de gas están reducidos por la presencia de líquido al $A \cdot H_g$. Por tanto, la velocidad real está determinada por:

$$v_g = \frac{q_g}{A H_g}$$

Donde A es el área de la tubería.

Las velocidades de líquido real y la superficial son determinadas de forma similar:

$$v_{sL} = \frac{q_L}{A}$$

$$v_L = \frac{q_L}{A H_L}$$

Desde que H_g y H_L son menores que uno, las velocidades reales son mayores que las velocidades superficiales.

La velocidad de dos fases o mezcla es determinada en base a los caudales de flujo instantáneo total de la ecuación:

$$v_m = \frac{q_L + q_g}{A} = v_{SL} + v_{sg}$$

Las fases de gas y líquido viajan a velocidades diferentes en la tubería. Algunos autores prefieren evaluar el grado de desprendimiento y así mismo el escurrimiento de líquido para determinar la velocidad de deslizamiento vs. la velocidad de deslizamiento es definido como la diferencia entre las velocidades de gas real y líquido por:

$$v_s = v_g - v_L = \frac{v_{sg}}{H_g} - \frac{v_{SL}}{H_L}$$

Utilizando las anteriores definiciones para varias velocidades, formas alternativas de las ecuaciones para no-escurrimiento de líquido real son:

$$\lambda_L = \frac{v_{SL}}{v_m}$$

$$H_L = \frac{v_s - v_m + [(v_m - v_s)^2 + 4v_s v_L]^{1/2}}{2v_s}$$

Temperatura: Se debe indicar la temperatura de trabajo, así como posibles variaciones de la misma en este caso se trabajo con 50 a 59 °F

2.1.2.4. Sistema de Bombeo

La nueva bomba centrífuga Booster y su arreglo, se ubicará paralelo a la bomba existente, el punto de alimentación (tie-in) será en el codo de 6" del bypass aguas arriba de la válvula de bloqueo, con la implementación de soportes y drenaje idénticos al existente.

La bomba proviene de la Estación de Bombeo Chorety (Santa Cruz), se realizará su desmontaje, traslado y montaje en la Estación de bombeo Oruro.

Figura 5: *Vista general de Bomba Centrífuga existente en Estación Oruro*



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos

La nueva bomba y su arreglo se ubicará paralelo a la bomba existente, el punto de alimentación (tie-in) será en el codo del bypass aguas arriba de la válvula de bloqueo (ver figura vista lateral), con la implementación de soportes y drenaje al existente

Figura 6: *Vista lateral de bomba existente UPB-*



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos

2.2 INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS

2.2.1 Descripción del caso de estudio

Se realizará el dimensionamiento de la línea de descarga de la bomba centrífuga UPB-02 a instalarse en la estación de Bombeo Oruro, proveniente de la estación de bombeo Chorety, según las condiciones de operación programadas. El fluido a bombear es Diésel Oíl, el cual cuenta con su ficha técnica donde se puede obtener sus propiedades del líquido. Actualmente, en dicha estación de bombeo se encuentra funcionando la bomba centrífuga UPB-01, lo que significaría que se aumentara la capacidad de bombeo de la estación de bombeo Oruro. Además, se determinará el espesor de la pared de la tubería de acero de acuerdo a la normativa ASME B31.4.

2.2.2 Parametros de diseño

A continuacion, se detalla los parametros de diseño referidos para la caracterizacion de las propiedades PVT(Presion, volumen y temperatura) del Diesel Oil:

Tabla 6: *Propiedades PVT*

Producto	Condición de Operaciones Normales							
	Flujo m ³ /hr. (BPD)		Temperatura °C (°F)		Presión (PSIG)			
					Succión		Descarga	
	Normal	Máxima	Normal	Máxima	Normal	Mínimo	Normal	Máxima
Diésel	59.6	79.5	10	15	100 -			
Oíl	90000	12000	50	59	150	20	1420	1450

Fuente: Fuente:Agencia Nacional de Hidrocarburos

Motor:

Para su funcionamiento adecuado del motor se esta realizando el calculo con la potencia maxima absorbida por la bomba.

Tambien hay que tomar en cuenta que motor tenga lo siguiente:

- Se va trabajar a nivel del mar
- Que si va arrancar contra valvula de descarga cerrada.
- El calculo de la altura manometrica sea confiable.

Tabla 7: *Especificaciones de la Unidad de Bombeo Principal*

EQUIPO	MOTOR	BOMBA
UNIDAD DE BOMBEO UBP-02	Marca:: CATERPILLAR Serie 7N100278	Marca: BW/IP International Tipo: Centrifuga Horizontal - Head 300 ft
COD. E19-01-UBP- 02	Combustible Gas Natural Potencia: 945 HP	Size: 3 X 6 Succión x Descarga – 900# Cap. 300 – Head. 4300 – BHP 438
SERIE 7N100278	Velocidad: 1400 RPM	Velocidad 3560 RPM Capacidad. 10 MBPD Presión Desc. Min / Normal 1300 / 1400 psi

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos

Bomba:

Para la selección correcta de la bomba radica en el conocimiento del sistema donde trabajara, como sabemos que trabajo va relaizar los requisitos tales para su operación son los siguientes datos como especifica en la siguiente tabla.

Si la bomba trabaja a una elevacion diferente a la del nivel del mar se recomienda tomar en cuenta las recomendaciones del fabricante del motor sobre perdidas de potencia por elevacion generalmente como promedio se puede considerar una perdida Matriz de 1% en cada 100 m de elevacion (cada fabricante especifica en sus hojas tecnicas).

Tabla 8: Especificaciones de la bomba booster

EQUIPO	MOTOR	BOMBA
BOOSTER BOMBA CENTRIFUGA VERTICAL	Marca:: NIDEC	Marca: GOULDS PUMP – Model 3910 MX
	Fase/Frec/Voltaje 3-50-380	Tipo: Centrifuga - Head 300 ft
	Amperaje: 69	Size: 3 X 6 -13N Succión x Descarga – 300
	Potencia: 50 HP	Caudal: 450 GPM – (122.7 m ³ /hr)
	Clase I Di v I Grupo C y D Velocidad: 2900 RPM	Max Presión 500 psi a 86 F

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos

2.2.3 Propiedades del fluido

Se presenta las propiedades del Diesel Oil en la ficha tecnica la cual proporciona datos importantes para el diseno hidraulico como ser: la densidad, viscosidad, punto de congelacion y estabilidad a la oxidacion y almacenamiento.

Tabla 9: Especificaciones técnicas del Diésel Oil

PRUEBA	EPECIFICACION				UNIDA D	METODO ASTM	
	ORIENTE (*)		OCCIDENTE			Alter. 1	Alter. 2
	Min.	Max.	Min.	Max.			
Gravedad Especifica a 15,6/15.6 °C	0,79	0,88	0,8	0,88		D 1298	D 4052
Viscosidad cinemática a 40 °C	1,7	5,5	1,7	5,5	cSt	D 445	D 7042

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos

2.2.4 Numero de Reynolds

Una vez conocida las propiedades del Diésel Oíl y las condiciones de flujo como el caudal se determinó el régimen de flujo (laminar o turbulento) de acuerdo al número de Reynolds según la ecuación 27 (en marco teórico).

$$N_{RE} = \frac{92.1(SG)Q_L}{d_u}$$

Por lo tanto, se determinó el Numero de Reynolds para los diámetros de tubería de 3,4 y 6 pulgadas, mostrando los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 10: *Numero de Reynolds de tuberías*

Diámetro (pulg)	Gravedad especifica (adm)	Caudal (BPD)	Numero de Reynolds (adm)
3	0,88	12.000	153.645
4	0,88	12.000	115.234
6	0,88	12.000	76.823

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se aprecia que el número de Reynolds en todos los casos esta encima de 4.000, por lo tanto, corresponden a flujos turbulentos.

2.2.5 Rugosidad absoluta

La rugosidad absoluta de la tubería se determinó a partir del tipo de material, el cual es el acero al carbono según la tabla 9:

De tabla se obtuvo que la rugosidad absoluta de la tubería de acero al carbono es igual a 0,0018 pulgadas.

2.2.6 Rugosidad relativa

Posterior a obtener la rugosidad relativa, se determinó la rugosidad relativa de acuerdo a distintos diámetros de tubería según ecuación 33:

Tabla 12: Factores de fricción determinados

Diámetro (pulg)	Rugosidad relativa (adm)	Numero de Reynolds (adm)	Factor de fricción (adm)
3	0,00060	153.645	0,029
4	0,00045	115.234	0,034
6	0,00030	76.823	0,040

Fuente: Elaboración propia

2.2.8 Caída de presión

Se determinó la caída de presión del Diésel Oíl dentro de la tubería, tomando en cuenta el factor de fricción de Moody, la geometría y longitud de la tubería, la gravedad específica y el caudal del fluido, según la siguiente formula:

$$\Delta P = (11.5 \times 10^{-6}) * \frac{f * L * Q_L^2 * (SG)}{d^5}$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13: Caída de presión dentro de la tubería

Diámetro (plg)	Factor de fricción (adm)	Longitud de tubería (pies)	ΔP ($\frac{psi}{100ft}$)
3	0,029	492	17,39
4	0,034	492	4,84
6	0,040	492	0,75

Fuente: Elaboración propia

2.2.9 Velocidad del fluido

La velocidad del flujo se determinó utilizando la ecuación de continuidad, que establece que el caudal de un fluido incompresible a través de una sección transversal es constante tomando en consideración el área interna de la tubería a través de la siguiente formula:

$$V = \frac{Q_L}{A}$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 14: *Velocidades del fluido*

Diámetro (pulg)	Caudal (BPD)	Velocidad (ft/s)
3	12.000	15,89
4	12.000	8,94
6	12.000	3,97

Fuente: Elaboración propia

2.2.10 Diámetro optimo de tubería

La normativa API 14E establece estándares y prácticas recomendadas para el diseño de sistemas de tuberías para la industria de petróleo y gas. En el caso específico de los líquidos establece que la velocidad del líquido debe ser mayor a 3 ft/s para evitar que el agua se deposite en puntos bajos y genere puntos de corrosión y debe ser mayor a 15 ft/s para minimizar la erosión por posibles sólidos y el golpe de ariete al cerrar rápido una válvula y de acuerdo a prácticas recomendadas de ingeniería la caída de presión no debe sobrepasar los 4 psi/100ft.

Se seleccionó el diámetro optimo en la siguiente tabla:

Tabla 15: *Selección de diámetro optimo*

Diámetro (pulg)	Caída de presión (psi/100ft)	Velocidad del fluido (ft/s)	Estado
3	17,39	15,89	Rechazado
4	4,84	8,94	Rechazado
6	0,75	3,97	Aprobado

Fuente: Elaboración propia

El diámetro optimo según tabla corresponde 6 pulgadas cumpliendo con lo establecido en la norma API 14E.

2.2.11 Espesor de tubería

Se determinó el espesor de la tubería conforme a la norma ASME B31.4.

2.2.11.1 Selección de materiales “S”

El material seleccionado para la construcción es API 5L-X52 con una tensión a la fluencia mínima especificada de 52.000 psi.

2.2.11.2 Presion de diseño “P”

La presion de diseño de la linea de descarga de la bomba es de 2160 psi a una temperatura de 150 grados fahrenheit.

2.2.11.3 Factor de diseño “F”

El factor de diseño tiene un valor de 0,72 para todas los casos.

2.2.11.4 Factor de Calidad “E”

Para tuberia API 5L sin costura, soldado por resistencia electrica el factor de calidad es igual a uno.

2.2.11.4 Espesor calculado

Se determino el espesor calculado reemplazando los valores anteriormente obtenidos, en la ecuación 29:

$$t = \frac{P * d_{ext}}{2 * F * E * S}$$

Obteniendo un espesor de 0,191 pulgadas, pero no es una medida comercial, por lo tanto, se debe seleccionar el espesor inmediatamente superior según tabla API, correspondiendo a un espesor nominal de 0,219 pulgadas.

2.3 ANALISIS Y DISCUSION

- En la presente monografía se determinó el diámetro de la tubería de descarga de la bomba de Diésel Oíl tomando en cuenta principalmente las pérdidas de cargas. M.A. Chaudhry (1979) publicó el libro *Turbulent Flow in Pipes*, que proporciona una descripción detallada de la teoría de la pérdida de carga en tuberías turbulentas. Por otro lado, existen autores que además toman en consideración la vibración como un factor importante. J.P. Mabon (1998) publicó el libro *Vibration of Pipes and Ducts*, que proporciona una descripción detallada de la teoría de la vibración de las tuberías.
- Se determinó el espesor de la tubería de acuerdo a la normativa ASME B31.4, la cual toma diferentes factores de seguridad. Sin embargo, algunas empresas optan por establecer más factores de seguridad para tener una mayor vida útil de la tubería. Dado que piensa que la norma ASME B31.4 no contempla todos los factores que afectan al desgaste interior de la tubería.

CAPITULO III CONCLUSIONES

3.1 CONCLUSIONES

- Se describió las propiedades del Diésel Oíl obtenido de las especificaciones técnicas y se caracterizó el régimen de flujo como turbulento.
- Se realizó los cálculos para 3 diferentes medidas de diámetros comerciales de tuberías para el diámetro óptimo de la línea de descarga de acuerdo a la Normativa API 14E, y se determinó obteniendo un diámetro nominal de 6 pulgadas para la línea planteada.
- Se realizó los cálculos correspondientes donde salió como resultado un espesor de 0,191 pulgadas, pero no es una medida comercial, por lo tanto, se debe seleccionar el inmediatamente superior según la tabla tomando en cuenta los espesores disponibles por los fabricantes (API), obteniendo un espesor nominal de 0,219 pulgadas. normativa ASME B31.4.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aerojet-General Corp., Sacramento, Calif. (USA). (2011). Performance/design and qualification requirements for pump discharge line. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). Recuperado de [http://dx. doi. org/10. 2172/4228867](http://dx.doi.org/10.2172/4228867)
- Brown, C., & Miller, S. (2019). Integrating Advanced Technologies in Oil and Gas Operations. *Industrial Technology Review*, 14(4), 202-210.
- Brown, H. (2022). Practical Applications of Fluid Mechanics in Pipeline Design. *Engineering and Technology Review*, 18(4), 58-64.
- Cambridge University Press. (2009). Centrifugal pump principles. Recuperado de [http://dx. doi. org/10. 1017/cbo9780511529573. 004](http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511529573.004)
- Davis, H. (2021). Case Studies in Oil Industry Modernization. *Energy and Technology Review*, 17(5), 54-60.
- Delgado, H., Kurz, R., & Brun, K. (2013). Common Practice for Verification of Integrity of New Emerging Technologies for Heavy Crude Oil Pumping Applications. American Society of Mechanical Engineers. Recuperado de [http://dx. doi. org/10. 1115/gt2013- 94643](http://dx.doi.org/10.1115/gt2013-94643)
- Dutta, N. C. (2007). Pressure prediction from seismic data: implications for seal distribution and hydrocarbon exploration and exploitation in the deepwater Gulf of Mexico. Elsevier. Recuperado de [http://dx. doi. org/10. 1016/s0928-8937\(97\)80016-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0928-8937(97)80016-1)
- Environmental Protection Agency. (2020). EPA Regulations and Standards. Recuperado de [https://www. epa. gov/laws-regulations](https://www.epa.gov/laws-regulations)
- Gallardo Echenique, E. E. (2017). *Metodología de la Investigación*. Huancayo - Peru : Universidad continental.

- Green, F., & Harris, L. (2019). Environmental Compliance in the Oil Industry. *Environmental Management Review*, 23(2), 89-97.
- International Organization for Standardization. (2015). ISO 14001:2015 - Environmental management systems. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 45001: Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use.
- Iwasaki, S., Nunami, K., Yoshida, M., Masuhisa, T., Kondo, S, Abekura, T., & Nishizawa, H. (2019). Model-Based Development Design for a Continuously Variable Discharge Oil Pump Design. SAE International. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4271/2019-01-0764>
- Johnson, R. (2021). Change Management in Industrial Operations. *Industrial Management Review*, 14(2), 89-97.
- Johnson, R., & Lee, K. (2018). Risk Management in Oil and Gas Operations. *Safety and Health in Industry*, 19(1), 34-42.
- Jones, D. (2018). Safety strategies in the design of diesel oil pumping systems. *Safety Engineering Review*, 22(4), 201-210.
- Nishizawa, K., Ishiwata, M., & Okamoto, K. (2010). Electronic Control of Diesel In-Line Injection Pump-Analysis and Design. SAE International. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4271/860144>
- Nelson, R. A. (2005). Distribution and character of fractures in sedimentary basins and their importance for hydrocarbon reservoirs. Society of Exploration Geophysicists. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1190/1.1891935>
- Pantalos, G. (2006). Current and emerging blood pumping systems: opportunities for modeling techniques. Elsevier BV. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9290\(06\)83949-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9290(06)83949-7)

- Polat, O., & Ebrinc, A. A. (2010). Oil Pump Drive Design on a Diesel Engine. SAE International. Recuperado de [http://dx. doi. org/10. 4271/2009-01-0563](http://dx.doi.org/10.4271/2009-01-0563)
- Seetharaman, S., & Lakshminarayanan, P. A. (2019). Cooling, Coolants, and Water Pump and Oil Pump. Springer Singapore. Recuperado de [http://dx. doi. org/10. 1007/978-981-15-0970-4_21](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0970-4_21)
- Smith, L., & Jones, M. (2020). Effective Project Management for Pipeline Design. Journal of Pipeline Systems Engineering, 11(3), 45-53.
- Smith, R. (2015). Risk analysis in the handling of diesel oil. Journal of Risk Management, 17 (3), 123-135.
- Taylor, J. (2020). Project Management for Oil and Gas Upgrades. Project Management Journal, 51(3), 28-36.
- United Nations Environment Programme. (2021). Global Environmental Outlook. Recuperado de [https://www. unep. org/resources/global-environment-outlook-6](https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6)
- Williams, T. (2019). Case Study: Implementing Variable Speed Pumping Systems. Pumping Technology Journal, 22(1), 34-40.
- Williams, T. (2021). Advanced Engineering in Pipeline Systems. Engineering Journal, 88 (2), 159-167.
- World Bank. (2019). Environmental Regulations in the Oil and Gas Industry. Recuperado de [https://www. worldbank. org/](https://www.worldbank.org/)

ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones técnicas del Diésel Oíl

Tabla de especificaciones								
Nombre del producto: DIESEL OIL								
Prueba	ESPECIFICACIÓN				Unidad	Método ASTM		
	ORIENTE(*)		OCCIDENTE			Altern.1	Altern.2	Altern.3
	Min.	Max.	Min.	Max.				
Gravedad especifica a 15,6/15,6°C	0,79	0,88	0,8	0,88		D 1298	D 4052	
Corrosión lámina de cobre (3h/100°C)		3		3		D 130		
Azufre Total		0,5		0,5	% peso	D 1266	D 4294	D 2622
Punto de escurrimiento		(*)		-1.1 (30)	°C (°F)	D 97		
Punto de inflamación	38 (100,4)		38 (100,4)		°C (°F)	D 93		
Apariencia	Cristalina		Cristalina			Visual		

Viscosidad cinemática a 40°C	1,7	5,5	1,7	5,5	cSt	D 445	D 7042	
Índice de Cetano (**)	45		45			D 976	D 4737	
Número de Cetano	42		42			D 613		
Residuo Carbonoso Remasbottom del 10% de residuo destilado		0,3		0,3	% peso	D 524	D 189	D 4530
Cenizas		0,02		0,02	% peso	D 482		
Agua y sedimentos		0,05		0,05	% vol.	D 1796	D 2709	
Destilación Engler (760 mmHg)						D 86		
90% vol.	282(540)	382(720)	282(540)	382(720)	°C (°F)			
Poder calorífico	Informar		Informar		BTU/lb	D 4868	D 240	
Color ASTM	Informar		Informar			D 1500		
Contenido de Aromáticos Totales	Informar		Informar		% vol.	D 1319		

ZONA ORIENTE (*)	Ene Feb Mar	Abr	May Jun Jul Ago	Sep	Oct Nov	Dic
PUNTO DE ESCURRIMIENTO	12 (53,6)	7(44,6)	3 (37,4)	7(44,6)	9(48,2)	12(53,6)

(*) Se considera Oriente a los departamentos de Santa Cruz, Beni, Pando y las zonas tropicales de La Paz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, y Occidente el resto de departamentos

(**) Se deberá cumplir la especificación de Índice de Cetano Número de Cetano"

V. Se sustituye el Anexo G del Reglamento de Calidad de Carburantes, aprobado por Decreto Supremo N° 1499, de 20 de febrero de 2013, con la siguiente tabla:

Fuente: Agencia Nacional de hidrocarburos

Anexo 2: Se selección del espesor comercial de la tubería

API 5L / ASTM A53							ASTM A53		API 5L Grado B		
NPS Designacio n	DN Designacio n	Diametro exterior, pulgadas [mm]	Espesor pared nominal, pulgadas [mm]	Peso Nominal [Masa] por unidad longitud, lb/ft [kg/m]	Weight Class	Schedul e No.	Presiones de prueba, psi [kPa] Grado A	Presiones de prueba, psi [kPa] Grado B	Presiones minimas de prueba		
									psi	kPa	Kg/cm2
5	125	5.563 [141.3] 5-9/16"	0.156 [3.96]	9.02 [13.41]	...	...	1010 [7000]	1180 [8100]	1180	8,100	82.60
			0.188 [4.78]	10.80 [16.09]	...	...	1220 [8400]	1420 [9800]	1,420	9,800	99.93
			0.219 [5.56]	12.51 [18.61]	...	...	1420 [9800]	1650 [11 400]	1,650	11,400	116.25
			0.258 [6.55]	14.63 [21.77]	STD	40	1670 [11 500]	1950 [13 400]	1,950	13,400	136.64
			0.281 [7.14]	15.87 [23.62]	...	...	1820 [12 500]	2120 [14 600]	2,120	14,600	148.88
			0.312 [7.92]	17.51 [26.05]	...	...	2020 [13 900]	2360 [16 300]	2,360	16,300	166.21
			0.344 [8.74]	19.19 [28.57]	...	...	2230 [15 400]	2600 [17 900]	2,600	17,900	182.53
			0.375 [9.52]	20.80 [30.94]	XS	80	2430 [16 800]	2800 [19 300]	2,800	19,300	196.81
			0.500 [12.70]	27.06 [40.28]	...	120	2800 [19 300]	2800 [19 300]	2,800	19,300	196.81
			0.625 [15.88]	32.99 [49.11]	...	160	2800 [19 300]	2800 [19 300]	2,800	19,300	196.81
6	150	6.625 [168.3] 6-5/8"	0.750 [19.05]	38.59 [57.43]	XXS	...	2800 [19 300]	2800 [19 300]	2,800	19,300	196.81
			0.188 [4.78]	12.94 [19.27]	...	...	1020 [7000]	1190 [8200]	1,190	8,200	83.62
			0.219 [5.56]	15.00 [22.31]	...	...	1190 [8200]	1390 [9600]	1,390	9,600	97.89
			0.250 [6.35]	17.04 [25.36]	...	...	1360 [9400]	1580 [10 900]	1,580	10,900	111.15
			0.280 [7.11]	18.99 [28.26]	STD	40	1520 [10 500]	1780 [12 300]	1,780	12,300	125.43
			0.312 [7.92]	21.06 [31.32]	...	...	1700 [11 700]	1980 [13 700]	1,980	13,700	139.70
			0.344 [8.74]	23.10 [34.39]	...	...	1870 [12 900]	2180 [15 000]	2,180	15,000	152.96
			0.375 [9.52]	25.05 [37.28]	...	...	2040 [14 100]	2380 [16 400]	2,380	16,400	167.23
			0.432 [10.97]	28.60 [42.56]	XS	80	2350 [16 200]	2740 [18 900]	2,740	18,900	192.73
			0.562 [14.27]	36.43 [54.20]	...	120	2800 [19 300]	2800 [19 300]	2,800	19,300	196.81
			0.719 [18.26]	45.39 [67.56]	...	160	2800 [19 300]	2800 [19 300]	2,800	19,300	196.81
			0.864 [21.95]	53.21 [79.22]	XXS	...	2800 [19 300]	2800 [19 300]	2,800	19,300	196.81

Fuente: ASTM A53

Anexo 3: Vista previa del lugar a instalar UBP



Fuente YPFB. Transporte S.A.