

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

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA



**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA ADECUACIÓN DEL OLEODUCTO YACUIBA-
CAMIRI OCY-1, A FIN DE PERMITIR EL TRANSPORTE DE DIESEL DESDE
ARGENTINA**

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

MARKOS ANTONIO GARCIA CALLEJAS

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.

Markos Antonio Garcia Callejas

Sucre, 01 de diciembre de 2023

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a la mejor mamá del mundo, Maggie Callejas Daza, que es un pilar fundamental en mi vida ya que siempre me apoya, me incentiva a seguir adelante y a cumplir todas mis metas.

También lo dedico a José Luis Segovia ya que sin su ayuda y consejos a lo largo de mi vida, no podría haber realizado el trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por nunca abandonarme a pesar de todo y estar siempre dentro mío, guiándome y ayudando a superar las diferentes adversidades que nos presenta la vida.

A mi madre por brindarme siempre su apoyo incondicional, dándome ánimo para seguir adelante en todo momento.

A la Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, en especial a la Facultad de Tecnología por acogerme y formarme profesionalmente para ser un aporte a la sociedad.

A mis compañeros de facultad por la linda amistad formada y las anécdotas inolvidables a lo largo de los años de estudio.

Al ingeniero Cristian Martínez Rocha que me guió como tutor en la realización del trabajo.

RESUMEN

La presente monografía plantea reducir tiempo y costo en el transporte de diesel producto de las importaciones realizadas por el país, la monografía propone la adecuación del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 para poder transportar diesel, el cual fue construido en el año 1955 para transportar condensado desde las plantas adyacentes a la red del sistema sur de transporte por oleoductos. Actualmente la producción de condensado es muy baja por lo cual el oleoducto opera al 50% de su capacidad.

Debido a la declinación de producción de hidrocarburos líquidos en el país y el aumento de la demanda del mercado interno, las importaciones de diesel han incrementado, siendo necesario buscar alternativas para el correcto abastecimiento a la población se opta por reducir los costos de importación, mediante el cambio del tipo transporte.

Actualmente el transporte de diesel de importación se realiza mediante camiones cisterna. En el presente trabajo de investigación se ha demostrado que este medio de transporte genera mayor costo y tiempo para la obtención de diesel, por lo que se efectuó la adecuación del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 para darle un mejor uso como medio de transporte de diesel importado, neutralizando de esta manera el transporte de diesel a través de cisternas.

Se llevaron a cabo diferentes estudios, como: el análisis técnico actual del oleoducto, la descripción de todo su recorrido, los equipos que comprenden las estaciones intermedias y terminales, además de un análisis completo de hidráulica para determinar que las presiones requeridas no pasen la presión máxima admisible de operación y si las bombas con las que se cuentan tienen la suficiente potencia para transportar la columna de diesel o deberán implementarse nuevas unidades en las estaciones de bombeo con el fin de cumplir con éxito la operación, finalmente se realiza la evaluación de tiempo y costo del transporte de diesel a través del oleoducto OCY-1 para determinar la factibilidad de la propuesta.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3.1 Justificación práctica.....	3
1.3.2 Justificación teórica.....	3
1.4 METODOLOGÍA.....	3
1.4.1 Técnicas de investigación.....	3
1.4.2 Instrumentos de investigación.....	4
CAPITULO II: DESARROLLO.....	5
2.1 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1.1 Marco conceptual.....	5
2.1.1.1. Oleoducto.....	5
2.1.1.2. Tuberías.....	5
2.1.1.2.1. Características de las tuberías.....	6

2.1.1.3.	Estación de bombeo	7
2.1.1.3.1.	Bombas.....	8
2.1.1.3.2.	Válvulas.....	10
2.1.1.3.3.	Motores.....	11
2.1.1.4.	Estaciones de reducción de presión.....	12
2.1.1.5.	Terminales	12
2.1.1.5.1.	Tanques de almacenamiento	12
2.1.1.6.	Operaciones de mantenimiento	13
2.1.1.7.	Propiedades de los fluidos a transportar.....	13
2.1.1.7.1.	Caudal.....	13
2.1.1.7.2.	Densidad.....	13
2.1.1.7.3.	Gravedad específica	14
2.1.1.7.4.	Gravedad API.....	14
2.1.1.7.5.	Peso específico	14
2.1.1.7.6.	Temperatura	14
2.1.1.7.7.	Viscosidad	15
2.1.1.7.8.	Fluidos newtonianos y no newtonianos	16
2.1.1.7.9.	Número de Reynolds.....	16
2.1.1.7.10.	Presión de vapor	17
2.1.1.7.11.	Tensión superficial	18
2.1.1.7.12.	Compresibilidad	18
2.1.1.8.	Variables y parámetros en el diseño hidráulico de un oleoducto.....	18
2.1.1.8.1.	Código ASME B 31.4	19
2.1.1.8.2.	Presión de entrega en la Estación B	19
2.1.1.8.3.	Presión requerida o de salida en la Estación A	20

2.1.1.8.4.	Determinación de la caída de presión en oleoductos	20
2.1.1.8.5.	Pérdida de presión por fricción	21
2.1.1.8.6.	Determinación del factor de fricción.....	21
2.1.1.8.7.	Perdida de presión por fricción usando la ecuación de Darcy	22
2.1.1.8.8.	Máxima presión de operación admisible (MAOP)	23
2.1.1.8.9.	Gradiente de presión hidráulico y perfil de presiones.....	23
2.1.1.8.10.	Sistema hidrodinámico de un oleoducto.....	24
2.1.1.8.11.	Estado estable	24
2.1.1.8.11.1.	Ecuaciones para estado estable	25
2.1.1.8.12.	Altura equivalente de la potencia de una bomba.....	27
2.1.1.8.13.	Potencia de una bomba	28
2.1.1.9.	Reglamento para el transporte de carburantes a través de unidades de transporte y tanques cisterna (RAN-ANH-UN N°0024/2016)	28
2.1.1.9.1.	Tanque cisterna	29
2.1.1.9.2.	Recepción y despacho de carburantes	29
2.1.1.9.3.	Diesel oil	29
2.1.2	Marco contextual	30
2.1.2.1.	Recopilación de información del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1	30
2.1.2.2.	Red del Sistema Sur de transporte por oleoductos OCY-1	31
2.1.2.2.1.	Estación Pocitos	32
2.1.2.2.2.	Estación Tigüipa.....	32
2.1.2.2.3.	Estación Chorety	32
2.1.2.3.	Perfil de elevación del oleoducto OCY-1	33
2.1.2.4.	Propiedades del fluido a transportar.....	34
2.1.2.5.	Diagnóstico del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1	34

2.2	INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDOS	36
2.2.1	Diseño de hidráulica	36
2.2.1.1.	Cálculo de la presión máxima admisible de operación	37
2.2.1.2.	Cálculo de caudal y área.....	37
2.2.1.3.	Cálculo de la velocidad de flujo	37
2.2.1.4.	Cálculo del Número de Reynolds.....	37
2.2.1.5.	Determinación del factor de fricción.....	38
2.2.1.6.	Cálculo de presión requerida en la EPO y presión de llegada a la ETI.....	38
2.2.1.7.	Cálculo de presión requerida en la ETI y presión de llegada a la ECH	39
2.2.1.8.	Verificación de las presiones.....	40
2.2.1.9.	Cálculo de la altura equivalente de la bomba en la ETI.....	40
2.2.1.10.	Cálculo de potencia de la bomba en la ETI.....	41
2.2.2	Adecuaciones en el oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1	42
2.2.2.1.	Adecuaciones en la Estación Pocitos	42
2.2.2.2.	Adecuaciones en el puente de medición San Antonio	43
2.2.2.3.	Adecuaciones en la válvula sur	43
2.2.2.4.	Adecuaciones en la válvula norte	44
2.2.2.5.	Adecuación en la estación Tigüipa.....	44
2.2.2.6.	Adecuación en la estación Chorety	45
2.3	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	46
2.3.1	Evaluación del tiempo de transporte de diesel a través del OCY-1.....	46
2.3.1.1.	Tiempo de transporte mediante cisternas	46
2.3.1.2.	Tiempo de transporte mediante el oleoducto OCY-1.....	47
2.3.2	Evaluación del costo de transporte de diesel a través del OCY-1	47
	CAPÍTULO III: CONCLUSIONES	49

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	50
ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Características de las tuberías</i>	6
Figura 2: <i>Configuración de las bombas</i>	8
Figura 3: <i>Partes de una bomba centrífuga</i>	9
Figura 4: <i>Diagrama de fluidos newtonianos y no newtonianos</i>	16
Figura 5: <i>Tipos de flujo</i>	21
Figura 6: <i>Tiempo vs temperatura</i>	27
Figura 7: <i>Sistema Sur de oleoductos en Bolivia</i>	31
Figura 8: <i>Perfil de elevación del OCY-1</i>	33
Figura 9: <i>Ubicación oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1</i>	35
Figura 10: <i>Sistema de transporte de diesel</i>	36
Figura 11: <i>Adecuaciones en la estación Pocitos</i>	42
Figura 12: <i>Adecuaciones del puente de medición San Antonio</i>	43
Figura 13: <i>Adecuaciones en la válvula sur</i>	44
Figura 14: <i>Adecuaciones en la válvula norte</i>	44
Figura 15: <i>Adecuación en la estación Tigüipa</i>	45
Figura 16: <i>Adecuación en la estación Chorety</i>	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Relación rugosidad relativa y diámetro interno</i>	21
Tabla 2: <i>Propiedades del diesel</i>	34
Tabla 3: <i>Tiempo de transporte mediante cisterna</i>	46
Tabla 4: <i>Tiempo de transporte mediante el OCY-1</i>	47
Tabla 5: <i>Costo de transporte de diesel mediante cisterna</i>	47
Tabla 6: <i>Costo de transporte de diesel mediante cisterna</i>	48
Tabla 7: <i>Costo de transporte de diesel mediante cisterna</i>	48

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En el año 2018 se realizó un trabajo de grado sobre un diseño del poliducto Santa Cruz-Camiri para ampliar la capacidad de transporte de diesel oil y gasolina especial, para lo cual se realizó una proyección de consumo hasta el año 2038, se determinó el nuevo diámetro del poliducto, la presión de operación, el espesor nominal según especificaciones de la norma API 5L, la velocidad de flujo, la potencia real en el eje de la bomba, el número de válvulas de seccionamiento y el área del orificio de la válvula de alivio de presión. Con esta ampliación se buscó abastecer de Diesel oil y gasolina especial a la provincia Cordillera del departamento de Santa Cruz y los departamentos de Tarija, Chuquisaca y Potosí.

En el año 2019 se realizó un proyecto de reversión de flujo en el oleoducto Sica Sica-Arica para el transporte de Diesel, donde se demostró que el factor tiempo marca la diferencia entre el transporte mediante cisterna y oleoducto. Se evidenció que para trasladar 125 Bbl de diesel por cisterna se precisa de 570 min mientras que por oleoducto 20 min, además en términos económicos, transportar 15.000 BPD de acuerdo a la capacidad diaria del oleoducto equivale al servicio de 120 cisternas, por lo que de forma global la importación mediante cisternas demanda un gasto de 82.273,20 Bs.

El oleoducto OCY-1 tramo Yacuiba-Camiri fue construido en enero de 1955, extiende su recorrido a lo largo de la zona sur del país, inicia en la localidad de Yacuiba (Estación Pocitos), atraviesa Villamontes (Estación de Bombeo Tigüipa) y concluye su recorrido en Camiri (Estación Terminal Chorety). En la actualidad el oleoducto OCY-1 no trabaja en su máxima capacidad debido a la baja producción de hidrocarburos líquidos, es por ello que se plantea darle un mejor uso al oleoducto OCY-1 para poder realizar la importación de diesel desde Argentina y tener un ahorro significativo de tiempo y costo por su transporte.

1.1.1 Planteamiento del problema

Ante el crecimiento del parque automotor y las industrias la demanda de combustibles líquidos principalmente de diesel ha ido aumentando considerablemente con el pasar de los años y ante

la declinación de la producción de hidrocarburos líquidos en los principales campos petroleros del país, se ha tenido que recurrir a la importación de diesel del exterior para poder garantizar el abastecimiento del mercado interno. En los últimos años las importaciones de diesel sumaron más de 7.767 millones de dólares por la compra de un volumen cercano a 10 millones de toneladas, cabe destacar que el precio del mismo en Bolivia es más bajo gracias a la subvención que brinda el gobierno.

Actualmente la importación de diesel se la realiza mediante cisternas las cuales generan mayor costo y tiempo para la obtención del combustible, además de estar expuestas a diferentes imprevistos como bloqueos de carreteras, paros cívicos, movilizaciones sociales, accidentes de carretera, entre otros; cabe destacar la emisión de CO₂ que estas producen y su daño al medio ambiente.

El transporte de hidrocarburos por oleoductos en el sur del país trabaja al 50% de su capacidad debido a la declinación de la producción de hidrocarburos líquidos, por lo que se propone optimizar el uso del oleoducto OCY-1 para el transporte de diesel desde el vecino país de Argentina.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Realizar un estudio técnico para la adecuación del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1, a fin de permitir el transporte de diesel desde Argentina.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico del estado del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1.
- Diseñar la hidráulica del sistema de transporte de diesel a través del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1.
- Adecuar el oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 para su independencia y transporte de diesel.
- Evaluar el tiempo y costo del transporte de diesel a través del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Justificación práctica

La presente investigación logró demostrar que se pueden minimizar los gastos del transporte por la importación de diesel a través de cisternas, ya que estas son contratadas anualmente para realizar el transporte de dicho combustible. También se reducirán los prolongados tiempos que implica su transporte, además de la disminución en la contaminación del medio ambiente emitido por dicho transporte y el riesgo que corren de sufrir algún percance o accidente que impidan el abastecimiento al mercado interno. Esta adecuación repercutirá en grandes beneficios para el país, tales como: un ahorro significativo por el transporte de diesel, menores tiempos de transporte, reducción de la contaminación al medio ambiente y el correcto abastecimiento de diesel al mercado interno ante el aumento de la demanda.

1.3.2 Justificación teórica

En el presente trabajo se desarrolló lo aprendido en los módulos de postgrado: fundamentos del transporte y almacenamiento de hidrocarburos (1er modulo), ingeniería de ductos de transporte de hidrocarburos (2do modulo), sistemas de medición, distribución, y comercialización de hidrocarburos (4to modulo) y metodología de la investigación (5to modulo). Además de materias de pregrado como: almacenamiento, transporte y distribución de hidrocarburos (7mo semestre) y elaboración y evaluación de proyectos (8vo semestre). Los cuales facilitaron la realización de la investigación en sus diferentes capítulos.

1.4 METODOLOGÍA

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

1.4.1 Técnicas de investigación

Debido a que la investigación tiene un enfoque cuantitativo, se aplicó la observación como principal técnica de investigación, mediante la cual se obtuvieron diferentes datos para el desarrollo de la monografía. Estos datos fueron registrados a través de hojas de campo, planillas a mano alzada y elevación de planos.

También se recurrió a la revisión de fuentes secundarias como lo son las páginas de YPFB y YPFB transporte donde se encuentra información del sistema sur de oleoductos, estaciones de bombeo y los procesos de contratación de empresas que buscan realizar el transporte de diesel a través de cisternas. Además del informe de rendición de cuentas inicial 2023 y diferentes resoluciones administrativas de normas entre las que destaca el reglamento para transporte de carburantes a través de unidades de transporte y tanques cisterna, realizadas por la agencia nacional de hidrocarburos (ANH).

1.4.2 Instrumentos de investigación

La información se recopiló para su posterior análisis en informes técnicos, hojas de campo, planillas, planos, resoluciones ministeriales, tablas de puntos de entrega de líquidos a través de oleoductos, tablas de presión de puntos de recepción de líquidos en oleoductos y esquemas del recorrido del oleoducto OCY-1.

Las fuentes de información se basaron en bibliografía técnica referente al área, sitios web, artículos, además de consultas a profesionales relacionados con el área del transporte de hidrocarburos líquidos por oleoductos.

CAPITULO II: DESARROLLO

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Marco conceptual

2.1.1.1. Oleoducto

Se denomina oleoducto a la tubería e instalaciones conexas utilizadas para el transporte de petróleo y sus derivados a grandes distancias. La excepción es el gas natural, el cual a pesar de ser derivado del petróleo se lo transporta a través de gasoductos por encontrarse en estado gaseoso a temperatura ambiente y también cabe mencionar los poliductos que por lo general transportan hidrocarburos o productos terminados como gasolinas, diesel y gas licuado de petróleo.

Los oleoductos ofrecen el modo más eficiente de transporte de fluidos. El transporte ahorra tiempo con cero barreras físicas que afectan su tránsito. Otra ventaja del transporte por ductos es la seguridad, ya que las tuberías están bajo estricta vigilancia para identificar cualquier fuga en la tubería. Las tuberías también son rentables, especialmente en el transporte de grandes cantidades de líquidos.

Un oleoducto está compuesto básicamente por estaciones de bombeo, estaciones de reducción de presión y terminales.

2.1.1.2. Tuberías

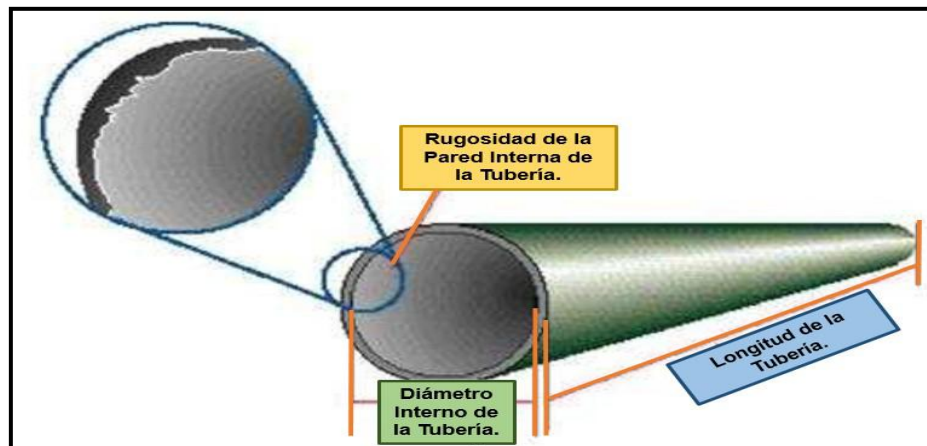
Las tuberías son un medio de transporte utilizado para transportar mercancías de un lugar a otro. El transporte por tuberías se utiliza principalmente para el transporte de líquidos y gases, incluido el transporte de petróleo y gas natural. Se pueden categorizar de acuerdo con el propósito al que sirven y se dividen en tres grupos: tuberías de transporte, tuberías de recolección y tuberías de distribución. Las tuberías de transporte se usan en el transporte de combustibles a largas distancias e involucran tuberías con diámetros enormes. Las tuberías de distribución se utilizan en el transporte de combustibles para el consumidor e implican el uso de tuberías pequeñas, generalmente con un diámetro de 24 pulgadas. Las tuberías de recolección se utilizan en el transporte del petróleo crudo y gas natural desde los pozos hasta las instalaciones de procesamiento cercanas.

Los oleoductos pueden cubrir largas distancias con tuberías de miles de kilómetros de longitud. Las tuberías que están hechas de acero y plástico generalmente están enterradas. Estas tuberías se colocan en zanjas excavadas previamente y luego se entierran con trabajos de restauración en la superficie. Antes de que comiencen las operaciones, se analiza la tubería en busca de fugas a través de la presión del agua o las pruebas de rayos X. El fluido que se transporta se bombea a la tubería con su impulso y presión estabilizados mediante bombas colocadas en numerosas estaciones de bombeo a lo largo de la línea de distribución. El mantenimiento se lleva a cabo en las tuberías periódicamente.

2.1.1.2.1. Características de las tuberías

Las características físicas de la tubería afectan la forma de como un fluido se comporta en un oleoducto. Específicamente, hay tres parámetros que se deben considerar en el diseño:

Figura 1: Características de las tuberías



Fuente: Extraído de Technology & Consulting Services inc.

Diámetro interno de la tubería (Di)

En un oleoducto, la pérdida de presión debido a la fricción está relacionada con el diámetro interno de la tubería. Cuando el diámetro interno de la tubería disminuye, la pérdida de presión debida a la fricción se incrementa drásticamente siempre y cuando el diámetro más pequeño al igual que el más grande estén manejando el mismo flujo. Esta es una importante consideración, no solo en el diseño sino también en el entendimiento de las características de operación de cualquier oleoducto.

Longitud de la tubería (L)

La longitud de un tramo de un oleoducto afecta la caída total de presión a lo largo de ese segmento. Entre mayor sea la longitud de un tramo en un oleoducto, mayor será la caída total de presión. En consecuencia, la pérdida de presión por fricción para una tasa de flujo dada varía directamente con la distancia.

Rugosidad relativa de la superficie interna de la pared de la tubería

El factor de fricción es determinado mediante la correlación del Número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería con la fricción del fluido dentro de la tubería. A medida que la rugosidad de la pared interna de la tubería se incrementa, el factor de fricción aumenta, para condiciones de flujo turbulento. Usualmente, los factores de fricción son seleccionados de la gráfica llamada Diagrama de Moody introducida por Lewis Ferry Moody, que relaciona el factor de fricción, con los dos parámetros adimensionales, el Número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa de la pared interna de la tubería (K/D_i). La rugosidad relativa de la pared interna de la tubería es la relación de la rugosidad absoluta (K) y el diámetro interno (D_i) de la tubería.

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{\varepsilon}{D_i}$$

Donde:

ε = Rugosidad absoluta de la superficie de la tubería
 D_i = Diámetro interno de la tubería

2.1.1.3. Estación de bombeo

Los líquidos que viajan desde su estación de origen a través del oleoducto o tubería pierden presión debido a la fricción que se genera entre el líquido y la pared del oleoducto. Cuanto más viscosidad y más flujo del líquido se tenga, más pérdida de presión se tendrá por la fricción más alta que se genera. Las estaciones de bombeo agregan energía a un líquido fluyendo a través de la tubería para compensar las pérdidas de presión por fricción. Esta energía es convertida en presión y es transferida al líquido por el dispositivo que es el corazón de la estación de bombeo.

Dependiendo de la configuración de la tubería, las estaciones de bombeo pueden tener una variedad de configuraciones de bombas. Pueden incluir diferentes tamaños de bombas para los diferentes requerimientos centrales. Los requerimientos de presión pueden ser alcanzados por una o más bombas del mismo tamaño en paralelo o en serie. La presión generada por una estación de bombeo es regulada por el operador, por un procedimiento de selección de bombas individuales o combinación de bombas que producirán la presión deseada o requerida.

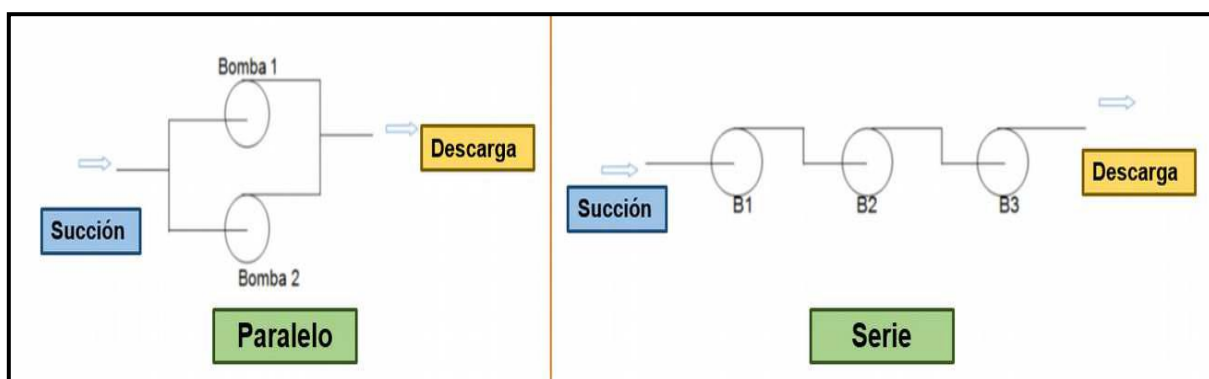
Los sistemas de bombeo están compuestos de diferentes dispositivos y condiciones que se presentan en determinados procesos, y que permiten transportar fluidos a través de tuberías o líneas de petróleo. Los dispositivos más significativos dentro del sistema de bombeo son las bombas, las cuales efectúan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

Los componentes principales de una unidad de bombeo típica son:

2.1.1.3.1. Bombas

Una bomba es considerada como un equipo de bombeo, la cual recibe energía mecánica y la convierte en energía cinética para que un fluido adquiera presión, posición o velocidad. Las bombas dan presión adicional al líquido para asegurar que el líquido viaje en la tubería a la adecuada tasa de flujo. Cuando una estación de bombeo tiene más de una bomba, se usan configuraciones en serie y/o paralelo.

Figura 2: Configuración de las bombas



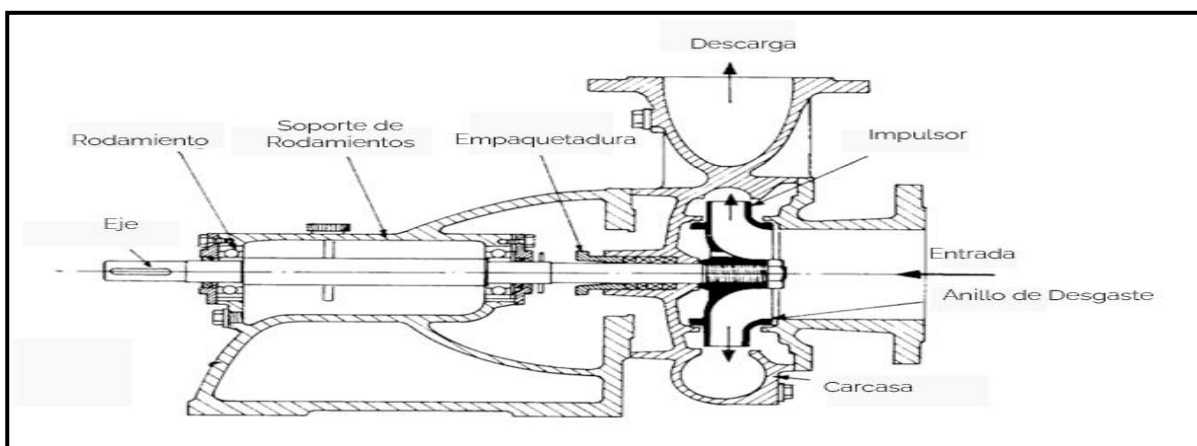
Fuente: Extraído de sistematización y automatización de un modelo digital hidrodinámico en estado estable de un oleoducto (Pablo Reyes)

- **Paralelo:** Más de una bomba tiene acceso a la succión desde la fuente, y la descarga de las bombas se la realiza a una línea común que lleva el fluido hasta su destino. Se utiliza para variar las condiciones de caudal de bombeo en la descarga, pero manteniendo la presión aproximadamente constante.
- **Serie:** La primera bomba tiene acceso a la succión desde la fuente y descarga el fluido en la succión de la segunda bomba, y así sucesivamente. Se utiliza para variar las condiciones en la descarga, manteniendo el caudal aproximadamente constante. La presión con que descarga es igual a la suma de las presiones de descarga de todas las bombas, menos la pérdida que se puedan dar en la conexión.

Bomba centrífuga

También denominada bomba rotodinámica, es actualmente la máquina más utilizada para bombear líquidos en general. Las bombas centrífugas son siempre rotativas y son un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor en energía cinética o de presión de un fluido incompresible. El fluido entra por el centro del rodete o impulsor, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba. Debido a la geometría del cuerpo, el fluido es conducido hacia las tuberías de salida o hacia el siguiente impulsor.

Figura 3: Partes de una bomba centrífuga



Fuente: Extraído de Boulton Pumps (2003)

Una bomba centrífuga está compuesta por un inductor, carcasa, cojinete, rotor, refrigeración, rodete o impulsor, difusor, ejes, juntas o anillos de desgaste, voluta y rodamientos.

2.1.1.3.2. Válvulas

Una válvula se puede definir como un elemento mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación de líquidos o gases mediante piezas móviles que abren o cierran, de forma parcial o total, el paso del flujo.

Válvulas de apertura y cierre

Existen tres válvulas, las cuales permiten el paso del fluido ya sea a través de la estación de bombeo o continuar sin pasar por la estación. Estas son las válvulas de succión de la estación, la válvula de descarga de la estación y la válvula de desviación (bypass) de la estación. Las tres válvulas trabajan juntas para dirigir el flujo dentro de la estación o para desviar el flujo alrededor de la estación.

Cuando la válvula de succión y la de descarga están abiertas y la de desviación (bypass) está cerrada, el flujo de fluido irá a través de la estación de bombeo. La otra operación es cuando la válvula de succión y la válvula de descarga de la estación están cerradas y la válvula de desviación (bypass) está abierta, el flujo pasará por fuera de la estación de bombeo. Cuando las válvulas de succión y descarga están cerradas y la válvula de desviación está abierta, el líquido no puede entrar a la estación de bombeo por lo que continuará fluyendo directamente por el oleoducto. Las estaciones normalmente se aíslan para reparación y mantenimiento.

Dos son las mayores razones para desviar el fluido de una estación de bombeo, para hacer el mantenimiento de la estación y en una situación de emergencia como la alarma por presencia de gas, alarma de fuego o el fluido dentro de la estación.

Las válvulas de succión y descarga como la válvula de desviación pueden o no estar controladas a control remoto por el operador. Cuando el control remoto está disponible, las válvulas de succión de la estación trabajan en conjunto con las válvulas de descarga de la estación, o sea que la válvula de descarga va abrir y cerrar con la válvula de succión.

Válvula de regulación de caudal

Están situadas a la salida de la estación y su objetivo es permitir bombear a distintos caudales.

Válvulas de seguridad

Están situadas a la salida de la estación, posterior a la válvula de regulación de caudal. Está calibrada a una presión máxima acorde con las características del tubo del oleoducto. El disparo de estas válvulas puede provocar la parada automática de alguna de las bombas.

2.1.1.3.3. Motores

Todas las bombas centrífugas son rotativas y transforman energía mecánica (en concreto energía cinética, movimiento circular del líquido) en presión. Para iniciar el movimiento del líquido se necesita de una energía generada por un motor. Si la bomba funciona utilizando un motor de explosión por combustible se denomina motobomba y si se trata de un motor eléctrico se denomina electrobomba.

Motobomba (motor de combustión interna)

Una motobomba puede llegar a ser una herramienta muy útil en determinadas situaciones en las que se necesita mover una gran cantidad de agua de forma efectiva y eficiente. El funcionamiento de una motobomba, consiste en transformar la energía mecánica en energía cinética gracias a un motor de combustión de gasolina o diesel.

A la hora de usar una motobomba siempre hay que tener en cuenta una serie de puntos claves, como por ejemplo el fluido que se desea mover, la altura de impulsión y la altura máxima de descarga o altura de elevación.

Electrobomba (motor eléctrico)

Las electrobombas presentan generalmente mayor vida útil y al igual que en cualquier bomba centrífuga, su funcionamiento se basa en la entrada del fluido por el centro del rodete o impulsor, a su vez el giro genera la fuerza centrífuga que hace que el fluido pase al cuerpo de la bomba donde la energía cinética del fluido se transforma en presión. Finalmente, desde el cuerpo el agua o líquido será dirigido hacia donde se pretende trasladar a través de tuberías o mangueras.

Los motores eléctricos producen energía mecánica sin contaminación y tienen relativamente bajo mantenimiento. En contraste, cuando se usan motores diesel para accionar bombas, se crea contaminación y se requiere más mantenimiento. Sin embargo, la fuerza diesel es la mejor alternativa donde la electricidad no está disponible.

2.1.1.4. Estaciones de reducción de presión

Son las instalaciones de un ducto que tienen como finalidad disminuir la presión del fluido por medio de un conjunto de válvulas reductoras de presión. Por condiciones operativas del sistema, se procede a realizar esta operación, especialmente en los casos en que el fluido, por su energía potencial de altura cambia su posición a una de energía de presión alta.

2.1.1.5. Terminales

El objetivo de un oleoducto es transportar combustibles desde los tanques de almacenamiento de una refinería hasta los tanques de los distintos puntos terminales, utilizando la energía suministrada por las estaciones de bombeo.

Los terminales de tanques son instalaciones en las que pueden almacenarse y manipularse productos derivados del petróleo, productos químicos, gases u otros productos líquidos, es decir, sustancias líquidas o gaseosas. Los terminales de tanques están formados por varios tanques individuales, generalmente en superficie, que suelen ser cilíndricos. En cada terminal existen varios tanques por cada producto, donde cada tanque tiene su propia válvula de acceso.

2.1.1.5.1. Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son estructuras de diversos materiales, por lo general de forma cilíndrica, que son usadas para guardar y/o preservar líquidos o gases a presión ambiente, por lo que en ciertos medios técnicos se les da el calificativo de tanques de almacenamiento atmosféricos.

Los tanques están hechos de diferentes materiales. Los más comunes son los de acero, hormigón combinado con plástico, plástico reforzado con fibra de vidrio, nailon o polietileno. El diesel oíl se suele almacenar en tanques cilíndricos verticales de acero.

2.1.1.6. Operaciones de mantenimiento

El mantenimiento de los oleoductos es un problema de carácter táctico muy importante y trascendental para la industria del petróleo; además de ser un procedimiento indispensable debido a su importancia económica, ya que una paralización inesperada del oleoducto, puede desembocar en pérdidas millonarias.

2.1.1.7. Propiedades de los fluidos a transportar

Al igual que las características de la tubería, las propiedades del fluido transportado a través de la tubería afectan el diseño del oleoducto. Estas propiedades son:

2.1.1.7.1. Caudal

Es el volumen del fluido por unidad de tiempo que pasa a través de una sección transversal a la corriente.

$$Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right) = \frac{V (\text{m}^3)}{T (\text{hr})}$$

A través del caudal también puede obtenerse la velocidad a la cual es transportado un fluido.

$$Q = v * A \quad v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q = Caudal	v = Velocidad
V = Volumen	A = Área
T = Tiempo	

2.1.1.7.2. Densidad

La densidad de un fluido se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de líquido. La presión no tiene efecto práctico sobre la densidad de un líquido. Sin embargo, el aumento de la temperatura causa que un fluido se dilate y en consecuencia disminuye su peso por unidad de volumen, en conclusión, disminuye su densidad.

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

Donde:

ρ = Densidad
m = Masa
v = Volumen

2.1.1.7.3. Gravedad especifica

La gravedad especifica se define como la relación del peso de un determinado volumen de liquido al peso de igual volumen de agua en condiciones estándar (T=60°F,P=atm). De esta forma la gravedad específica será siempre adimensional.

$$G.E.=\frac{\rho_{liq}}{\rho_{H_2O}}$$

Donde:

G.E. = Gravedad especifica

ρ_{liq} = Densidad de un líquido cualquiera

ρ_{H_2O} = Densidad del agua

2.1.1.7.4. Gravedad API

La gravedad o grados API, de sus siglas en ingles American Petroleum Institute es una medida de la densidad que en comparación con el agua nos dice que tan pesado o liviano es el petróleo.

$$API=\frac{141.5}{GE_{60^{\circ}F}}-131.5$$

Donde:

API = Densidad del petróleo

$GE_{60^{\circ}F}$ = Gravedad especifica del petróleo a 60°Fahrenheit

2.1.1.7.5. Peso especifico

Se define como peso especifico como la relación de la densidad de una sustancia con la del agua a una temperatura referencial de 4°C, con frecuencia se utiliza la gravedad específica para determinar el peso especifico o densidad de un fluido(en general un liquido).

Para el agua se utiliza el valor nominal de 9800 N / m³ o 62,4 lb / ft³.

2.1.1.7.6. Temperatura

La temperatura afecta la capacidad del oleoducto tanto directa como indirectamente y puede alterar el estado de los líquidos. Los cambios en la temperatura influyen el viscosidad y en la densidad de los líquidos en un oleoducto. Estos cambios afectan el desempeño de la línea como también el costo de operación. Poe ejemplo, cuando se diseña un oleoducto para un

crudo pesado, es necesario conocer exactamente las temperaturas de flujo para calcular la capacidad del oleoducto.

Cabe destacar que en este trabajo se analizara un sistema en estado estable lo que significa que se considera temperatura estable o constante en todo momento.

2.1.1.7.7. Viscosidad

La viscosidad se define como la propiedad de un fluido que ofrece resistencia al movimiento relativo de sus moléculas. La pérdida de energía debido a su fricción en un fluido que fluye se debe a su viscosidad.

Viscosidad absoluta o dinámica

La viscosidad absoluta es la resistencia interna entre las moléculas de un fluido en movimiento y determina las fuerzas que lo mueven y deforman, Isaac Newton (1643-1727) observa este comportamiento de los líquidos al situarlo entre dos placas paralelas, la placa base estática y la superior con un movimiento constante de un centímetro por segundo. De esta manera llega a la ley de Newton de la viscosidad.

Los líquidos se deslizan en capas o laminas, lo que significa que la velocidad del fluido es nula en la superficie de contacto y aumenta mientras se vuelve más distante creando una tangente que se denomina fuerza tangencial. Para el cálculo de la viscosidad dinámica se utiliza la unidad específica en el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS) Poise (P).

$$F_t = \mu * \frac{s * v}{y}$$

Donde:

F_t = Fuerza tangencial

μ = Viscosidad dinámica

s = Superficie

v = Velocidad de una placa respecto a la otra

y = Espesor de la lámina líquida

Viscosidad cinemática

Relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del líquido, teniendo el valor de la viscosidad dinámica se puede calcular la viscosidad cinemática de un fluido. Es importante

tener en cuenta que la viscosidad dinámica como la viscosidad cinemática depende de la naturaleza del líquido y la temperatura.

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

Donde:

σ = Viscosidad cinemática

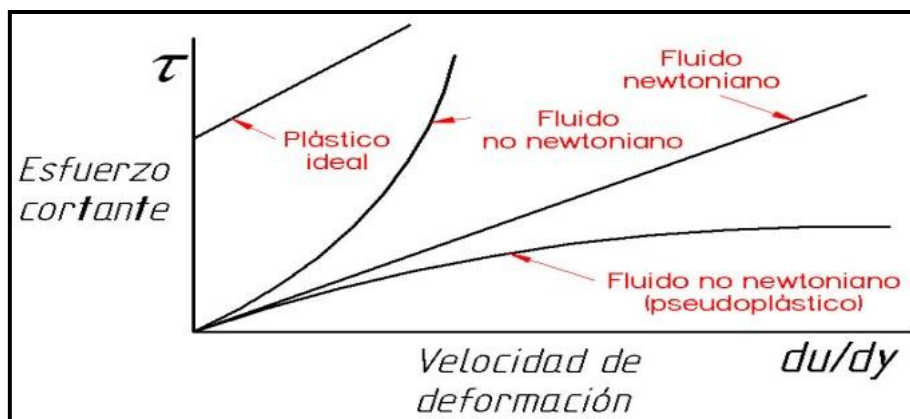
μ = Viscosidad dinámica

ρ = Densidad

2.1.1.7.8. Fluidos newtonianos y no newtonianos

El estudio de las características de la deformación y el flujo se conoce como reología, que es el campo del cual aprendemos acerca de la viscosidad de los fluidos. Una diferencia importante que se debe entender entre estos dos es que en los fluidos newtonianos su viscosidad absoluta es independiente del movimiento del mismo, es decir es constante. Además, se caracteriza por cumplir la ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

Figura 4: Diagrama de fluidos newtonianos y no newtonianos



Fuente: Extraído de Potter y Wiggert (2004). Mecánica de fluidos 3ra edición

En los fluidos no newtonianos la viscosidad depende del gradiente de velocidades, es decir que para que estos fluidos puedan fluir se necesitara aplicar una fuerza adicional.

2.1.1.7.9. Número de Reynolds

La interdependencia entre el diámetro interno de la tubería, la viscosidad del líquido y la velocidad del flujo está definida por una relación matemática llamada Número de Reynolds

(Re). Este numero adimensional es un parámetro fundamental, el cual juega un papel vital y frecuente en las ecuaciones de la hidráulica de transferencia de calor y en las del diseño de oleoductos. El número de Reynolds se usa para describir el tipo de fluido que muestra un líquido particular fluyendo a través de una tubería de una dimensión específica. El número de Reynolds incrementa a medida que el diámetro y la velocidad se incrementan, y disminuye cuando la viscosidad aumenta.

$$N_{re} = \frac{ID \cdot v}{\mu}$$

Donde:

N_{re} = Numero de Reynolds

ID = Diámetro interno de la tubería

v = Velocidad de flujo

μ = Viscosidad cinemática del fluido

2.1.1.7.10. Presión de vapor

Cuando se coloca una pequeña cantidad de líquido en un recipiente cerrado, una cierta fracción de él se evaporará. La evaporación termina cuando se alcanza el equilibrio entre los estados líquido y gaseoso de la sustancia contenida en el recipiente; en otras palabras, cuando el número de moléculas que escapan de la superficie del líquido es igual al número de moléculas que entran. La presión producida por las moléculas en el estado gaseoso es la presión del vapor.

La presión de vapor depende mucho de la presión y temperatura, sufre un cambio significativo cuando incrementa la temperatura.

En flujos en estado líquido, se pueden crear condiciones que conduzcan a una presión por debajo de la presión de vapor del líquido. Cuando esto sucede se forman burbujas localmente, este fenómeno llamado cavitación, puede ser muy dañino cuando estas burbujas son transportadas por el flujo a regiones de presión más alta. Lo que sucede es que las burbujas al entrar a la región de presión más alta, colapsan y producen picos de presión local que tienen el potencial de dañar la pared de una tubería.

2.1.1.7.11. Tensión superficial

La tensión superficial es una propiedad originada por las fuerzas de atracción entre las moléculas. Como tal, se manifiesta solo en líquidos en una interfaz, casi siempre una interfaz líquido-gas.

Las fuerzas entre las moléculas de un líquido son iguales en todas las direcciones y en consecuencia, ninguna fuerza neta es ejercida por las moléculas. Sin embargo, en una interfaz las moléculas ejercen una fuerza que tiene una resultante en la interfaz, esta fuerza mantiene una gota de agua suspendida en una varilla y limita el tamaño de la gota que puede ser sostenida. También provoca que las pequeñas gotas de un rociador o atomizador asuman formas esféricas, así como pueden desempeñar un papel significativo cuando dos líquidos inmiscibles (aceite y agua) se ponen en contacto.

2.1.1.7.12. Compresibilidad

La compresibilidad de los líquidos es el cambio de volumen debido a un cambio en la presión, es inversamente proporcional a su modulo de elasticidad volumétrico, también denominado coeficiente de compresibilidad.

$$E_v = -v \cdot \frac{dp}{dv} = -\left(\frac{v}{dv}\right) \cdot dp$$

Donde:

v = Volumen específico

p = Presión

Como $-\left(\frac{v}{dv}\right)$ es una razón adimensional, las unidades de E_v y p son idénticas.

El coeficiente de compresibilidad es análogo al modulo de elasticidad para sólidos. Sin embargo, para los fluidos se define en base al volumen y no en términos de la relación tensión-deformación unidimensional usual en cuerpos sólidos.

2.1.1.8. Variables y parámetros en el diseño hidráulico de un oleoducto

Los diseños hidráulicos pueden proponerse para un diseño base y ruta dados, el mejor diseño debe satisfacer los requerimientos actuales y los planes de capacidad a futuro del sistema.

2.1.1.8.1. Código ASME B 31.4

En el diseño de un oleoducto la principal responsabilidad de un ingeniero es la seguridad. Por lo cual las normas y estándares internacionales, se desarrollaron como ayuda para obtener la seguridad deseada en el diseño, construcción y operación, en este caso de un oleoducto. Para el diseño de un oleoducto la norma principal a ser usada, es el código ASME B 31.4, que cubre básicamente los siguientes tópicos:

- Sistemas de transporte por tubería de líquidos hidrocarburíferos y otros líquidos en cisternas tanto costa adentro, como costa afuera, pero no sistemas de transporte de gas.
- Aceptación y limitaciones de materiales.
- Requerimientos dimensionales para accesorios y componentes del ducto.
- Construcción, soldadura y ensamblaje de accesorios, equipos y facilidades.
- Inspección y pruebas, que incluyen reparación de defectos y pruebas de presión.
- Procedimientos de operación y mantenimiento de un ducto, equipamiento y facilidades, derecho de vida, comunicaciones, etc.
- Control y monitoreo de corrosión interna y externa.

2.1.1.8.2. Presión de entrega en la Estación B

La presión de entrega o descarga es aquella que se requiere al ingreso en el punto dos, presión que depende de los requerimientos de uso en dicho punto, uso tal como: refinación, almacenamiento, despacho, etc.

La presión de entrega está determinada por los equipos y facilidades del punto dos como tanques, intercambiadores de calor, bombas, booster, etc., así como el perfil topográfico, aguas arriba del terminal (punto b). Un pico de elevación puede dictar la presión requerida, lo que puede resultar en una mayor presión de entrega en el terminal.

La presión de entrega debe especificarse normalmente en el contrato.

2.1.1.8.3. Presión requerida o de salida en la Estación A

En un oleoducto que transporta líquido desde el punto uno hasta un punto dos, se requiere el empleo de una presión suministrada por un sistema de bombeo, presión necesaria para impulsar el mismo desde el punto uno hasta el punto dos.

La presión total requerida, se calcula sumando la presión de entrega y tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Pérdidas de presión por fricción debidas al caudal del fluido, propiedades del fluido y características de la tubería.
- Presión estática, debida a cambios de elevación.
- Pérdidas de presión por aceleración debidas a cambios en la geometría de la tubería, causando pérdidas menores de presión

2.1.1.8.4. Determinación de la caída de presión en oleoductos

A lo largo del trayecto de transporte de crudo por un oleoducto de distancia considerada larga, se producen pérdidas de presión debido a varios factores. Estas pérdidas pueden ser mayores o menores, dentro de las pérdidas mayores se tiene las provocadas por el cambio de elevación, también conocido como “cabeza estática” y las pérdidas debido a la fricción existente entre el fluido en movimiento y la pared interior del ducto.

Como pérdidas menores se tiene a las provocadas por el cambio de velocidad debido a un cambio en la geometría del ducto así como por la presencia de accesorios como válvulas, codos, cambios bruscos de diámetro, reductores de diámetro, entradas y salidas a tanques de almacenamiento, etc.

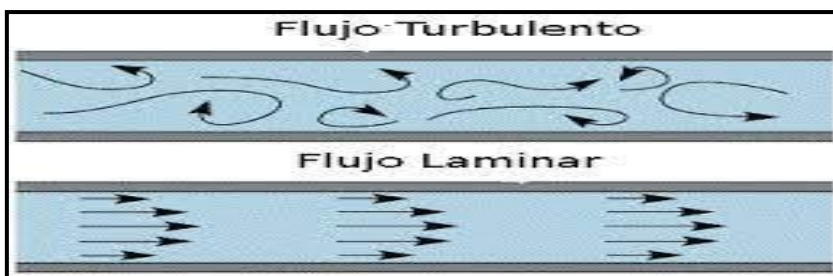
Dentro del diseño de un oleoducto las pérdidas menores son ignoradas o no tomadas en cuenta ya que son de valor tan pequeño que se puede realizar el diseño sin cometer un error significativo.

2.1.1.8.5. Pérdida de presión por fricción

Para el cálculo de las pérdidas de presión por fricción en un sistema de transporte por tubería es aconsejable seguir los siguientes pasos:

- Cálculo del número de Reynolds (Re)
- Determinación del factor de fricción (f)
- Cálculo de la pérdida de cabeza por fricción (hf)

Figura 5: Tipos de flujo



Fuente: Extraído de IPL Technology & Consulting Services, 1995.

El valor del número de Reynolds (Re) determina el tipo de flujo en una tubería, el cual puede ser laminar ($N_{re} < 2000$), crítico ($2000 > N_{re} < 4000$) o turbulento ($N_{re} > 4000$).

2.1.1.8.6. Determinación del factor de fricción

El factor de fricción está en función de la rugosidad de la tubería y del número de Reynolds.

$$f = \varphi(N_{re}, \epsilon)$$

Tabla 1: Relación rugosidad relativa y diámetro interno

Diámetro interno (plg)	Rugosidad relativa (ϵ)
3	0,00060
4	0,00042
6	0,00032
8	0,00022
10	0,00019
12	0,00016
16	0,00011

Fuente: Elaboración propia en base al factor de fricción

Si el flujo es turbulento, con ayuda de la rugosidad relativa, el factor de fricción puede ser leído del diagrama de Moody. Para flujo laminar hay una relación lineal entre el número de Reynolds y el factor de fricción.

$$f = \frac{64}{N_{re}}$$

En el flujo crítico existe una alteración entre el flujo turbulento y el flujo laminar. A causa de la inestabilidad de las condiciones de flujo, el factor de fricción no puede ser determinado de una manera confiable.

2.1.1.8.7. Pérdida de presión por fricción usando la ecuación de Darcy

La ecuación de Darcy se usa para calcular la cabeza convertida a energía térmica a causa de la fricción cuando el líquido fluye en una tubería, esta cabeza se llama pérdida por fricción o pérdida de cabeza por fricción. Es importante notar que esta energía no está perdida en realidad, pero tampoco contribuye a transportar el petróleo por el oleoducto.

En función de la velocidad:

$$hf = f * \frac{L * v^2}{2 * g * ID}$$

En función del caudal:

$$\text{Sistema Ingles: } hf = \frac{80,51 * f * L * v^2}{ID^5}$$

$$\text{Sistema Internacional: } hf = \frac{3185 * f * L * Q^2}{ID^5}$$

Donde:

hf = Pérdida de fricción
 f = Factor de fricción
 L = Longitud de tubería
 v = Velocidad de flujo
 ID = Diámetro interno
 g = Aceleración de la gravedad
 Q = Caudal de flujo

Existen cinco condiciones que se deben tener antes de utilizar la ecuación de Darcy:

- Continuidad o estado estable – la velocidad del fluido no cambia.

- Incompresibilidad – el fluido no cambia de volumen con un cambio en la presión.
- Isotérmico – el fluido esta a una temperatura constante.
- Tramo – la longitud de la tubería es considerablemente más grande que el diámetro.
- Diámetro constante – el diámetro del oleoducto no cambia.

La pérdida en la cabeza del líquido debido a la fricción produce una disminución en la presión a lo largo de la tubería en la dirección del flujo. La pérdida de presión a lo largo del oleoducto se usa para calcular la distancia entre estaciones de bombeo.

2.1.1.8.8. Máxima presión de operación admisible (MAOP)

La presión máxima admisible de operación (MAOP), es la presión máxima que la tubería puede resistir antes de sufrir deformación plástica o rotura, dependiendo de las características y clase de la misma.

$$MAOP = \frac{2 \cdot S_y \cdot e}{OD} \cdot F \cdot J \cdot T$$

Donde:

S_y = Esfuerzo mínimo de fluencia del material del oleoducto

e = Espesor de pared de tubería

OD = Diámetro externo

F = Factor de diseño

J = Factor de junta

T = Factor de temperatura

La presión de bombeo no debe ser mayor que el MAOP en ningún punto del recorrido, esto como requisito primordial.

2.1.1.8.9. Gradiente de presión hidráulico y perfil de presiones

El perfil de presiones es la curva que se obtiene al graficar la presión total existente (altura de columna del fluido) en cada punto del recorrido, la suma de la cabeza de altura y la cabeza estática en cualquier punto en el oleoducto, la presión se debe graficar en coordenadas distancia vs altura, obteniendo el perfil de presiones.

La pendiente del gradiente de presión hidráulico representa la tasa en la cual la cabeza del fluido se pierde debido a la fricción.

2.1.1.8.10. Sistema hidrodinámico de un oleoducto

El sistema hidrodinámico de un oleoducto depende de los siguientes parámetros:

- Características de la tubería tales como: tamaño, espesor de pared, grado de tubería y rugosidad.
- Distancia o longitud de tubería.
- Diferencial de elevación.
- Propiedades de fluido de los productos.
- Numero de productos en bache (si se considera transporte en baches).
- Presión y temperatura de descarga.
- Presión de entrega o de succión.
- Temperatura y conductividad térmica del suelo (en caso que sea necesario para tubería enterrada y que requiera precalentamiento como es el caso de transporte de crudo pesado).
- Potencia de bombeo requerida.

El fluido a ser transportado por un ducto puede encontrarse en estado estable o estado transitorio.

2.1.1.8.11. Estado estable

Es un sistema en el cual las condiciones iniciales se mantienen constantes con el transcurso del tiempo. Las ecuaciones de estado estable proveen de buenas aproximaciones del comportamiento del fluido en el diseño de un ducto, además de ser más simples y esto conlleva a obtener una solución más rápida para cada caso de diseño.

Probablemente no se disponga de datos completos dependientes del tiempo durante la fase de diseño por lo que las ecuaciones de transiente no son muy utilizadas.

Para el caso de este trabajo se define condiciones en estado estable para realizar el diseño hidrodinámico de un oleoducto, por lo que:

- La temperatura se considera estable.

- El caudal se mantiene estable.
- La densidad se mantiene estable.
- Viscosidad estable.
- Velocidad de flujo estable.

2.1.1.8.11.1. Ecuaciones para estado estable

Se parte del principio de conservación de la energía aplicada a la ecuación de energía de estado estable para determinar la ecuación de presión de flujo o presión máxima requerida o de salida de la estación “A”.

Esta ecuación combina la ecuación de Bernoulli con los factores de pérdida por fricción, el trabajo realizado por el fluido y la energía agregada al fluido.

Ecuación de Bernoulli para dos puntos:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2$$

Ecuación de la energía en estado estable:

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 \right) = g \cdot H_{PT}$$

$$H_{PT} = H_f + H_{Acc}$$

Donde:

H_{PT} = Pérdidas totales

H_f = Pérdidas por fricción (mayores pérdidas)

H_{Acc} = Pérdidas por accesorios (menores pérdidas)

El valor de las pérdidas menores es tan pequeño con respecto a las pérdidas mayores, que su influencia en el resultado no es significativa por lo que se consideran despreciables, por lo que:

$$H_{PT} = H_f$$

Se multiplica todo por ρ y se tiene:

$$\left(P_1 + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 \right) - \left(P_2 + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2 \right) = \rho \cdot g \cdot H_{PT}$$

Despejando'' P_2 '':

$$P_2 = P_1 + \rho * \frac{v_1^2}{2} + \rho * g * h_1 - \rho * \frac{v_1^2}{2} - \rho * g * h_2 - \rho * g * H_{PT}$$

Como se trata de un sistema en estado estable la velocidad se mantiene constante $v_1 = v_2$.

Además:

$$H_{PT} = H_f$$

$$P_2 = P_1 - \rho * g * (h_2 - h_1) - \rho * g * h_f$$

Y como:

$$h_f = f * \frac{L * v^2}{2 * g * ID}$$

Se tiene:

$$P_2 = P_1 - \rho * g * (h_2 - h_1) - \rho * \frac{(f * L * v^2)}{2 * ID}$$

Remplazando la distancia $L = L_2 - L_1$, tenemos:

$$P_2 = P_1 - \rho * g * (h_2 - h_1) - \frac{\rho * f * v^2 * (L_2 - L_1)}{2 * ID}$$

Donde:

P_1 = Presión máxima requerida en el punto 1

P_2 = Presión máxima requerida en el punto 2

ρ = Densidad

g = Aceleración de la gravedad

h_2 = Altura en la estación 2

h_1 = Altura en la estación 1

f = Factor de fricción

v = Velocidad de flujo

L_2 = Distancia en el punto 2

L_1 = Distancia en el punto 1

ID = Diámetro interno de tubería

Considerando:

$$\rho * g * (h_2 - h_1) = GP_e$$

$$\frac{\rho * f * v^2 * (L_2 - L_1)}{2 * ID} = GP_f$$

Remplazando se tiene:

$$P_1 = P_2 + GP_e + GP_f$$

Donde:

P_1 = Presión máxima requerida en el punto 1

P_2 = Presión máxima requerida en el punto 2

GP_e = Gradiente de presión estática

GP_f = Gradiente de presión por fricción

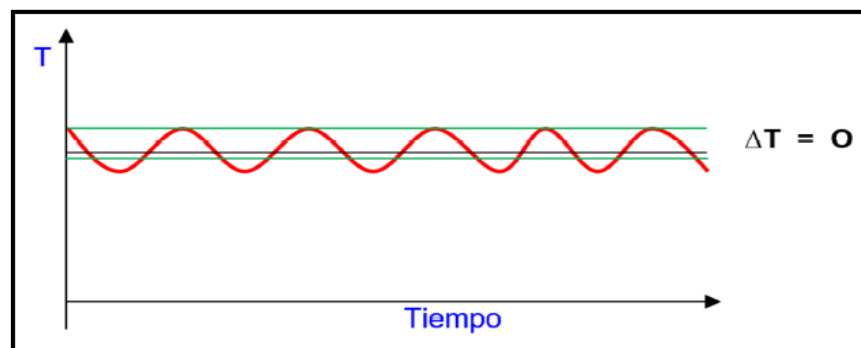
Se asume la densidad y velocidad constantes por condiciones de estado estables.

2.1.1.8.12. Altura equivalente de la potencia de una bomba

La siguiente interpretación o análisis solo es aplicado para el transporte de líquidos, por lo cual están sujetas a las siguientes condiciones:

- Solamente puede aplicarse a líquidos.
- Por lo general no hay variación de temperatura ($T=cte$), proceso isotérmico
- El transporte de hidrocarburos se da en la tubería que no se encuentra aislada.

Figura 6: *Tiempo vs temperatura*



Fuente: Elaboración propia en base a la altura equivalente de bombas

Donde el calor generado por la fricción se disipa hacia el exterior a través de las paredes de la tubería, también debemos considerar que los líquidos tienen una propiedad poco compresible, por lo que su volumen específico es constante ($V=cte$).

$$V \int dP = V(P_2 - P_1) = \frac{P_2 - P_1}{\gamma}$$

$$V = \frac{1}{\gamma}$$

Aplicando en la ecuación general:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + W_o + \frac{P_1}{\gamma} = h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_f$$

Despejando W_o , obtenemos:

$$W_o = (h_2 - h_1) + \frac{v^2}{2g} + \frac{P_b}{\gamma} + h_f$$

Donde:

W_o = Altura equivalente de la potencia de una bomba

h_2 = Altura 2

h_1 = Altura 1

v = Velocidad de flujo

g = Aceleración de la gravedad

P_b = Presión en el punto 2 o b

γ = Peso específico del fluido

h_f = Pérdida de presión por fricción

2.1.1.8.13. Potencia de una bomba

La potencia de una bomba se encuentra en función del caudal al cual desea ser transportado un fluido, la densidad del fluido y finalmente la altura equivalente de la misma. Existen dos tipos de potencias en una bomba, la teórica o técnica y la real.

Potencia teórica:

$$Pot_{teórica} = Q \cdot \rho \cdot W_o$$

Potencia real:

$$Pot_{real} = \frac{Pot_{teórica}}{Eficiencia}$$

La eficiencia estará definida en base al tipo de bomba a ser empleada, además del desgaste y el tiempo de uso.

2.1.1.9. Reglamento para el transporte de carburantes a través de unidades de transporte y tanques cisterna (RAN-ANH-UN N°0024/2016)

El reglamento tiene por objeto regular la actividad del servicio de transporte de carburantes a través de unidades de transporte y tanques cisterna mediante su registro y autorización ante la ANH. Se aplicará a las empresas que presten el servicio de transporte de carburantes, los propietarios de las unidades de transporte y tanques cisterna o personas que tuviesen algún derecho propietario en todo el territorio nacional.

2.1.1.9.1. Tanque cisterna

Tanque horizontal destinado a contener carburantes, montado sobre un chasis que se acopla a un medio de transporte o es parte de el y cuenta con todos los accesorios técnicos correspondientes.

Cualquier accesorio en el tanque cisterna debe ser instalado de forma que en caso de un siniestro se minimice la posibilidad de daño o falla adversa que afecte la integridad de retención del producto del tanque.

2.1.1.9.2. Recepción y despacho de carburantes

Las terminales de almacenaje de combustibles líquidos, plantas de proceso, refinerías, plantas de separación de líquidos y plantas de engarrafado de GLP, previa recepción y despacho de carburantes deberán verificar que la unidad de transporte y tanque cisterna se encuentren registradas y autorizadas por la ANH, en caso de verificarse que no se encuentran registradas y autorizadas, no se procederá a la recepción o despacho de carburantes.

2.1.1.9.3. Diesel oil

El diesel oil es un hidrocarburo en estado líquido que está compuesto básicamente por parafinas. Se obtiene de la destilación del petróleo entre los 200 y 380°C. Es un líquido denso, viscoso que tiene su origen en los gasóleos y antiguamente era considerado parte de los desperdicios de las refinerías.

Actualmente el diesel oil es utilizado en:

- Transporte, se emplea para los motores de vehículos de grandes cargas como camiones, trenes, maquinarias industriales, embarcaciones y vehículos del sector agrícola, forestal, minero y construcción.
- Generación de energía eléctrica, en las centrales termoeléctricas usan el diesel en turbinas y en grandes motores diesel. Además se utiliza en termoeléctricas de ciclo combinado que generan electricidad a partir de la combustión de gas natural diesel oil.
- Calefacción en residencias, edificios comerciales y calderas industriales.

La preferencia por los motores base diesel se debe a que este combustible es más barato que las gasolinas naturales. Otra ventaja de los motores que utilizan diesel es que comparándolos

con los motores de combustión interna, son más eficientes porque producen más trabajo mecánico por cada litro de combustible. En general los automóviles que usan gasolina aprovechan del 22 al 24% de la energía consumida, mientras que en los motores base diesel este aprovechamiento es del 35%.

2.1.2 Marco contextual

2.1.2.1. Recopilación de información del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1

El oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 inicio operación en el año 1955 con una capacidad de 12.000 barriles por día, un diámetro de 6 pulgadas y una longitud de 279 kilómetros. Actualmente se encuentra en funcionamiento y es operado por YPFB Transporte S.A.

La red de transporte de líquidos de YPFB Transporte S.A. cubre el centro y sur de Bolivia, esta red se divide en cuatro subsistemas: Norte, Sur, Central y Occidental. La red cuenta con 16 estaciones de bombeo con una potencia instalada total de 40.072 hp y una longitud de 3.035 km de ductos.

Sistema Norte

Se extiende desde la localidad de Carrasco hasta las ciudades de Santa Cruz y Cochabamba. Transporta petróleo crudo y condensado y tiene una longitud de 766 km.

Sistema Sur

Se extiende de Yacuiba hasta Santa Cruz transportando principalmente petróleo crudo y gas licuado de petróleo (GLP). Este sistema se extiende sobre el mismo derecho de vía del Sistema Sur de la Red de Gas y tiene una longitud de 1.160 km.

Sistema Centro

Se extiende desde Santa Cruz hasta Cochabamba transportando principalmente petróleo crudo, petróleo reconstituido, isomerado y GLP. Tiene una longitud de 531 km.

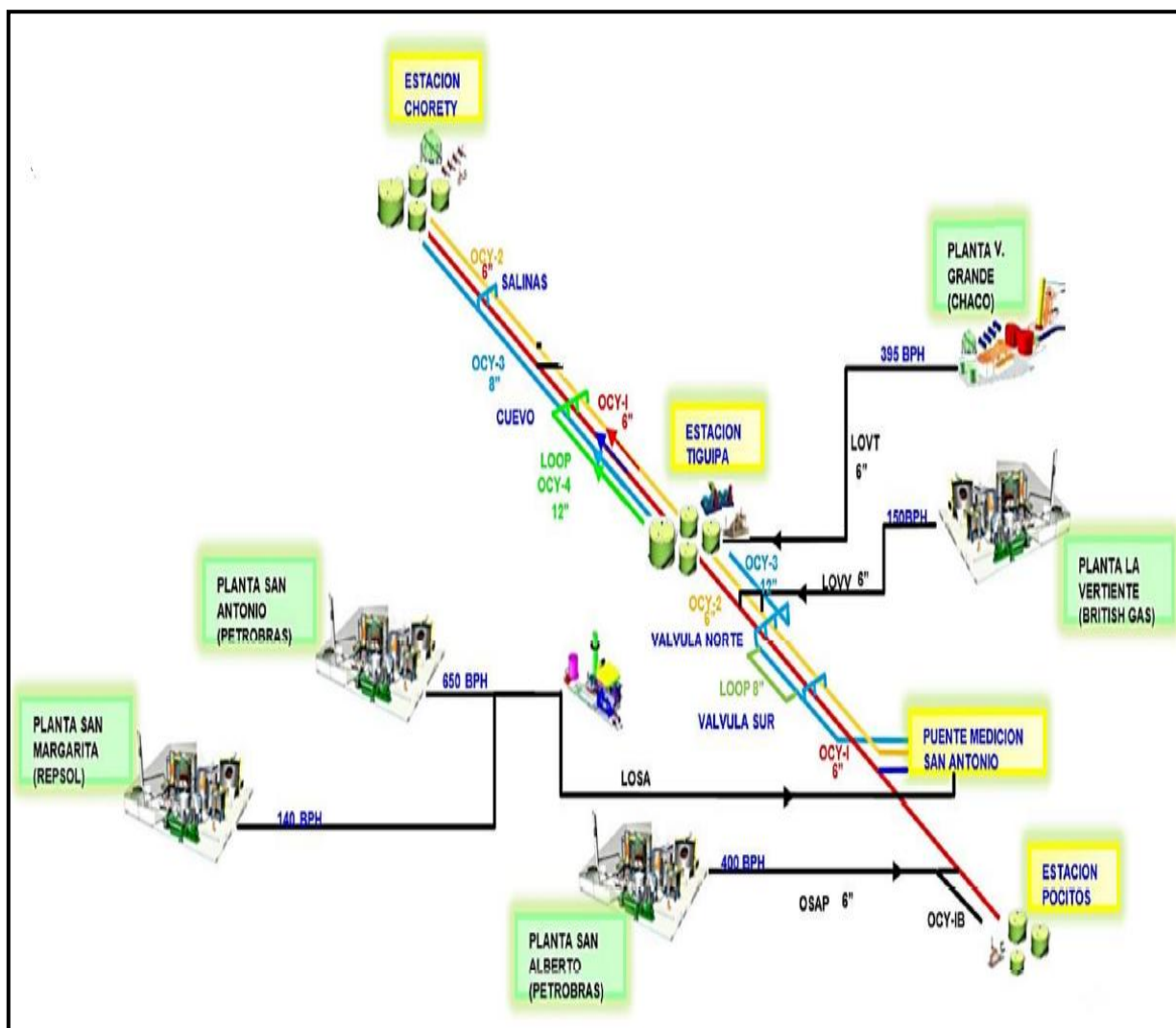
Sistema Occidente

Inicia en Cochabamba y se extiende hasta la Terminal Arica ubicada en la ciudad del mismo nombre en Chile. Transporta crudo reconstituido para exportación y tiene una longitud de 577 km.

2.1.2.2. Red del Sistema Sur de transporte por oleoductos OCY-1

Esta red está compuesta por cuatro oleoductos: Yacuiba-Camiri (OCY-1), Camiri-Villamontes (OCY-2), Tigüipa-Salinas (OCY-3), Camiri-Santa Cruz (OCSZ-2) y tres estaciones: Chorety, Tigüipa y Pocitos.

Figura 7: Sistema Sur de oleoductos en Bolivia



Fuente: Extraído de YPFB Transporte S.A.

El sistema de transporte por oleoductos en el sur del país es amplio y extenso ya que por el mismo se realiza el transporte de hidrocarburos desde las distintas plantas ubicadas a sus alrededores, tales como San Alberto, San Antonio, Margarita, La Vertiente, Vuelta Grande además cuentan con un puente de medición San Antonio y las estaciones de Pocitos, Tigüipa y Chorety donde son transferidas a poliductos para su posterior transporte hasta la refinería Guillermo Elder Bell para su refinación y extracción de productos terminados.

2.1.2.2.1. Estación Pocitos

- Inicio de operación: 1955.
- Vías de acceso terrestre: Carretera Yacuiba-Pocitos (Av. Bolivia).
- Producto que transporta: Petróleo crudo.
- Procedencia del producto: Campos San Alberto, Margarita y Bermejo.
- Destino del producto: Estación Tigüipa; exportación a REFINOR (Argentina).
- Capacidad de transporte (BPD): 22.800.
- N° de unidades de bombeo: 1.
- Potencia instalada: 591 HP.

2.1.2.2.2. Estación Tigüipa

- Inicio de operación: 1955.
- Vías de acceso terrestre: Carretera Santa Cruz-Villamontes.
- Producto que transporta: Petróleo crudo, GLP.
- Procedencia del producto: Campos Vuelta Grande, La Vertiente, San Antonio, Margarita, San Alberto e Itaú.
- Destino del producto: Terminal Chorety.
- Capacidad de transporte (BPD): 50.000.
- N° de unidades de bombeo: 4.
- Potencia instalada: 3.839 HP.

2.1.2.2.3. Estación Chorety

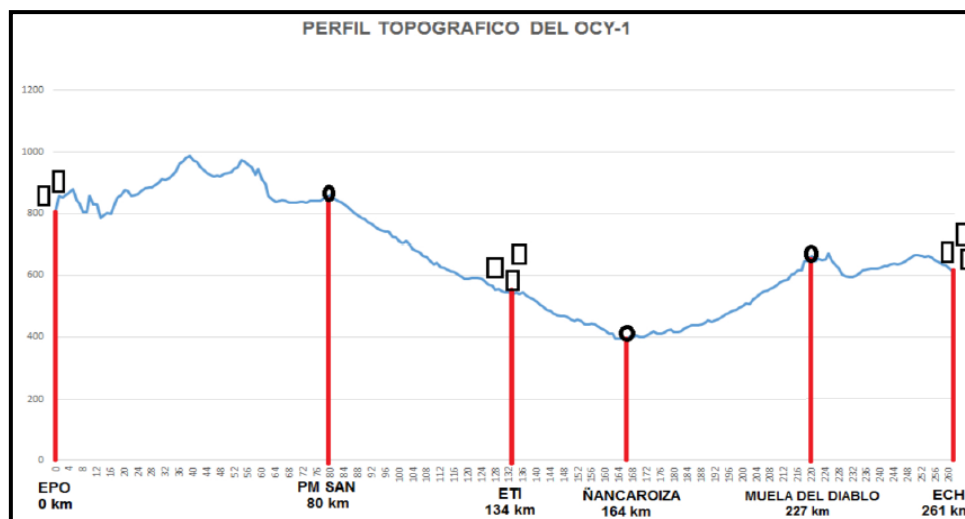
- Inicio de operación: 1995.
- Vías de acceso terrestre: Carretera Santa Cruz-Camiri.
- Producto que transporta: Petróleo crudo.

- Procedencia del producto: Estación Tigüipa, Estación Cerrillos, Campo Camiri (YPFB Andina).
- Destino del producto: OCSZ-2; Terminal Santa Cruz.
- Capacidad de transporte (BPD): 60.000.
- N° de unidades de bombeo: 4.
- Potencia instalada: 3.780 HP.

2.1.2.3. Perfil de elevación del oleoducto OCY-1

En el perfil de elevación del oleoducto se consideran los puntos más importantes como las elevaciones, longitudes de las estaciones de bombeo y recepción, punto más bajo y alto por donde atraviesa el oleoducto.

Figura 8: Perfil de elevación del OCY-1



Fuente: Elaboración propia en base al perfil topográfico del OCY-1

La figura 8 muestra el perfil de elevación del oleoducto OCY-1 sobre el nivel del mar, donde el punto más bajo se encuentra a una elevación de 395 msnm cerca de la localidad de Ñancaroiza, a 30 km de Tigüipa. El punto más alto del oleoducto está en la muela del diablo con una elevación de 650 msnm a una distancia de 227 km de la estación Pocitos.

2.1.2.4. Propiedades del fluido a transportar

Las propiedades de los fluidos a transportar son de vital importancia en el diseño de un oleoducto, ya que de estas depende el buen funcionamiento de los equipos instalados y la eficiencia del transporte.

Tabla 2: *Propiedades del diesel*

PROPIEDADES	UNIDAD	VALOR	MÍNIMA	MÁXIMA
Gravedad Específica a 60 °F		0,851	0,79	0,88
Punto de Escurrecimiento	°F		-10	30
Punto de Inflamación	°F		100	100
Viscosidad Cinemática	Cps		1,7	5,5
Agua y Sedimentos	% Peso		0	0,05
Índice de Cetanos			45	45
Número de Cetanos			42	42
Densidad	kg/m3	851		
Viscosidad Dinámica	m2/s	3,617		

Fuente: Elaboración propia en base al boletín de importaciones de la ANH

El diesel oil derivado del petróleo (gasóleo o gasoil) está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados, principalmente parafinas (incluyendo isoparafinas y ciclo parafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos (incluyendo naftalenos y alcalobencenos).

Su calidad de ignición se caracteriza por el índice de cetano, el cual es calculado a partir de algunas propiedades de destilación y debe ser como mínimo de 35. El diesel oil es un excelente combustible para motores que operan bajo condiciones de alta exigencia.

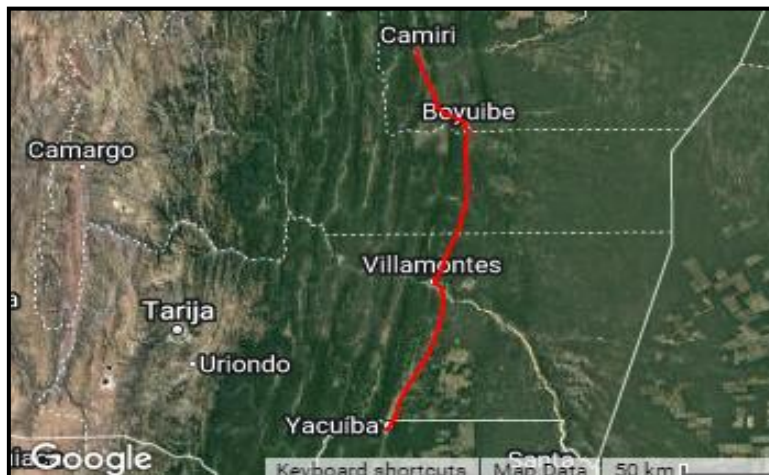
2.1.2.5. Diagnóstico del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1

El oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 fue construido y entró en operación en el año 1955 a cargo de Trans Redes, actualmente el oleoducto se encuentra operando 68 años y tiene como operador a YPF B Transporte S.A. Dada la antigüedad del oleoducto fue necesario diagnosticar su estado para analizar la factibilidad de su adecuación para el transporte de diesel. Se pudo evidenciar que el estado del oleoducto es bueno gracias al mantenimiento preventivo realizado por YPF B Transporte a lo largo de los años. También se pudo evidenciar que opera al 50% de

su capacidad debido a que los campos productores de hidrocarburos líquidos adyacentes tuvieron un decrecimiento considerable en su producción.

A través del análisis de todo el recorrido que comprende el oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 y sus interacciones con plantas, puentes de medición y estaciones, se pudo determinar las diferentes adecuaciones a realizar para la independencia del oleoducto y transporte de diesel.

Figura 9: *Ubicación oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1*



Fuente: Extraído de Google Earth

El oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 inicia en la localidad de Yacuiba, estación Pocitos (EPO), donde a pocos kilómetros recibe condensado de la planta San Alberto (PSAL) a través del OSAP (propiedad de Petrobras), continuando su recorrido llegamos al puente de medición de San Antonio donde se derivan las entregas de condensado de las plantas San Antonio (PSAN) y Margarita (PMG) ya sea al OCY-1, OCY-2 o OCY-3 para de esta forma continuar el transporte de condensado hacia la estación Tigüipa (Villamontes). Antes de llegar a la estación Tigüipa el oleoducto OCY-1 atraviesa las válvulas sur y norte que permiten la conexión con los oleoductos OCY-2 y OCY-3. Después de atravesar la estación Tigüipa el oleoducto OCY-1 concluye su recorrido en la estación Chorety ubicada en Camiri.

En la zona de Villamontes la planta La Vertiente (PLVT) entrega condensado por el lateral del oleoducto Villamontes-La Vertiente (LOVV), conectándose en el trillo norte al oleoducto OCY-2, llevando así su producto hacia la estación Tigüipa. La planta Vuelta Grande (PVG) entrega condensado, gasolina natural y GLP a través del lateral del oleoducto Vuelta Grande-

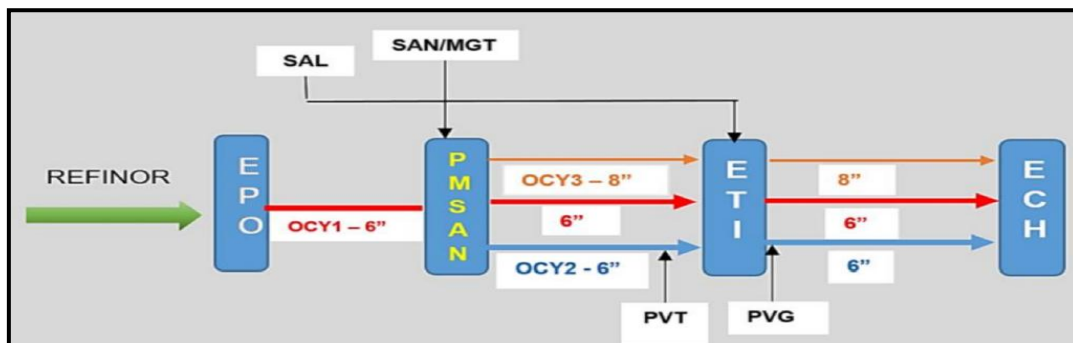
Tigüipa (LOVT) que se conecta al oleoducto OCY-2, este producto no ingresa a la estación Tigüipa, es transportado hacia la estación Chorety.

2.2 INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDOS

2.2.1 Diseño de hidráulica

De manera general, el transporte de diesel oil en los sistemas de oleoductos por bombeo está gobernado por las mismas leyes físicas que el transporte de agua potable presurizada. Dado a que las ecuaciones para el cálculo y diseño de sistemas hidráulicos son físicamente basadas, estas siguen siendo validas independientemente del fluido con el que se esté trabajando.

Figura 10: Sistema de transporte de diesel



Fuente: Elaboración propia en base al recorrido del oleoducto OCY-1

En este diseño se calcularon las principales condiciones para el transporte de diesel como ser las presiones requeridas en las estaciones de bombeo para cumplir con la presión de llegada necesaria a su destino y su posterior análisis con la presión máxima admisible de operación (MAOP). Además se analizó el perfil de elevación del oleoducto OCY-1 y se realizó el cálculo de la altura equivalente y potencia de la bomba.

Datos:

$$ID = 6'' = 0,1524 \text{ m}$$

$$e = 0.251 \text{ m}$$

$$GE_{\text{diesel}} = 0,851$$

$$\rho = 851 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 3,617 \text{ cst} = 3,617 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V = 10.000 \text{ Bbl}$$

$$T = 20 \text{ hrs}$$

$$S_y = 35.000 \text{ psi} = 240 \text{ Mpa}$$

$$F_{\text{diseño}} = 0,52$$

$$J_{\text{junta}} = 1$$

$$t = \text{N/A (estado aceptable)}$$

2.2.1.1. Cálculo de la presión máxima admisible de operación

Calculando el MAOP se obtiene el valor máximo de la presión de bombeo (descarga), tomando en cuenta un factor de diseño de 0,52, evitando de esta manera la deformación o rotura de la tubería.

$$\text{MAOP} = \frac{(2 * 35000 \text{ psi} * 0,250")}{6,625"} * 0,52 * 1$$
$$\text{MAOP} = 1374 \text{ PSI}$$

2.2.1.2. Cálculo de caudal y área

El caudal se determina para un tiempo operativo de 20 hrs, teniendo en cuenta que en las estaciones de bombeo las operaciones son constantes y continuas en turnos de 24 hrs.

$$Q = \frac{10.000 \text{ Bbl}}{20 \text{ hrs}} = 500 \text{ BPH} = 0,0221 \text{ m}^3/\text{s}$$

El área corresponde a la tubería de 6".

$$A = \frac{\pi}{4} * (\text{ID})^2$$
$$A = \frac{\pi}{4} * (0,1524 \text{ m})^2 = 0,01824 \text{ m}^2$$

2.2.1.3. Cálculo de la velocidad de flujo

La velocidad de flujo se encuentra en función del caudal y área previamente calculados.

$$v = \frac{0,0221 \text{ m}^3/\text{s}}{0,01824 \text{ m}^2}$$
$$v = 1,2116 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2.2.1.4. Cálculo del Número de Reynolds

El valor del número de Reynolds nos ayuda a determinar el tipo de flujo.

$$Nre = \frac{ID \cdot v}{\mu}$$

$$Nre = \frac{0,1524 \text{ m} \cdot 1,2116 \text{ m/s}}{3,617 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Nre = 5,1049 \times 10^4 \Rightarrow \text{Flujo turbulento}$$

2.2.1.5. Determinación del factor de fricción

El factor de fricción se obtiene a partir del número de Reynolds extraído del diagrama de Moody (figura 6).

$$F = 0,016 \Rightarrow \text{Diagrama de Moody}$$

2.2.1.6. Cálculo de presión requerida en la EPO y presión de llegada a la ETI

Presión de llegada a la ETI:

$$P_{b1} = P_{\text{llegada min}} \cdot 1,60$$

$$P_{b1} = 15 \text{ PSI} \cdot 1,60$$

$$P_{b1} = 24 \text{ PSI}$$

Se considera a P_{b1} como la presión de llegada a la ETI, tomando en cuenta la presión de llegada mínima más un 60%.

Presión necesaria en EPO para alcanzar la presión requerida en la ETI:

$$P_{a1} = P_{b1} + \rho \cdot g \cdot (H_{b1} - H_{a1}) + \frac{\rho \cdot f \cdot v^2 \cdot (L_{a1} - L_{b1})}{2 \cdot ID}$$

Desglosando la ecuación obtenemos:

Pérdida o Gradiente de presión estática.-

$$GP_e = 851 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (580 \text{ m} - 800 \text{ m})$$

$$GP_e = -1836628,2 \text{ kg/ms}^2 = -266,3804 \text{ PSI}$$

Pérdida o gradiente de presión por fricción.-

$$GP_f = \frac{0,016 \cdot 851 \text{ kg/m}^3 \cdot (1,2116 \text{ m/s})^2 \cdot 134000}{2 \cdot 0,1524 \text{ m}}$$

$$GP_f = 8787349,657 \text{ pa} = 1274,4973 \text{ PSI}$$

Reemplazando obtenemos:

$$P_{a1} = 24 \text{ PSI} - 266,3804 \text{ PSI} + 1274,4973 \text{ PSI}$$

$$P_{a1} = 1032,1169 \text{ PSI} = 7256,995 \text{ kg/m}^2$$

Se considera a P_{a1} como la presión de paso necesaria en la EPO para cumplir con la presión de llegada a la ETI.

2.2.1.7. Cálculo de presión requerida en la ETI y presión de llegada a la ECH

Presión de llegada a ECH:

$$P_{b2} = P_{\text{llegada min}} \cdot 1,60$$

$$P_{b2} = 15 \text{ PSI} \cdot 1,60$$

$$P_{b2} = 24 \text{ PSI}$$

Se considera a P_{b2} como la presión de llegada a la ECH, tomando en cuenta la presión de llegada mínima mas un 60%.

Presión necesaria en la ETI para alcanzar la presión requerida de llegada en la ECH:

$$P_{a2} = P_{b2} + \rho \cdot g \cdot (H_{b2} - H_{a2}) + \frac{\rho \cdot f \cdot v^2 \cdot (L_{a2} - L_{b2})}{2 \cdot ID}$$

Desglosando la ecuación obtenemos:

Perdida de presión estática.-

$$GP_e = 851 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (600 \text{ m} - 580 \text{ m})$$

$$GP_e = 166966,2 \text{ Pa} = 24,2164 \text{ PSI}$$

Perdida de presión por fricción.-

$$GP_f = \frac{0,016 \cdot 851 \text{ kg/m}^3 \cdot (1,2116 \text{ m/s})^2 \cdot (261000 \text{ m} - 134000 \text{ m})}{2 \cdot 0,1524 \text{ m}}$$

$$GP_f = 8328309,004 \text{ Pa} = 1207,9191 \text{ PSI}$$

Reemplazando obtenemos:

$$P_{a2} = 24 \text{ PSI} + 24,2164 \text{ PSI} + 1207,9191 \text{ PSI}$$

$$P_{a2} = 1256,13 \text{ PSI}$$

Se considera a P_{a2} como la presión de descarga o salida necesaria en la ETI para cumplir con la presión de llegada necesaria en la ECH.

2.2.1.8. Verificación de las presiones P_{a1} y P_{a2} con el MAOP

$$MAOP = 1374 \text{ PSI}$$

$$P_{a1} = 1032,1169 \text{ PSI}$$

$$P_{a2} = 1256,13 \text{ PSI}$$

La MAOP es mayor que ambas presiones (P_{a1} y P_{a2}), por lo tanto se cumple con la condición primordial en el diseño.

2.2.1.9. Cálculo de la altura equivalente de la bomba en la ETI

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + W_{o2} + \frac{P_1}{\gamma} = h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_f$$

Calculo de caída de presión por fricción:

$$N_{re} = 5,1049 \times 10^4$$

$$F = 0,016$$

$$hf_2 = \frac{F \cdot L_{eq} \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot ID}$$

Calculo de L_{eq} :

$$L_{eq} = L_{tub} + L_{acc}$$

Calculo de L_{acc} :

Válvula cortina de 6" = $8 \times 3 \text{ m} = 24 \text{ m}$

Válvula purga de 2" = $7 \times 0,325 \text{ m} = 2,275 \text{ m}$

$$L_{acc} = 24 \text{ m} + 2,275 \text{ m} = 26,275 \text{ m}$$

$$L_{tub} = 127000 \text{ m}$$

$$L_{eq} = 127000 \text{ m} + 26,275 \text{ m} = 127026,275 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$hf_2 = \frac{0,016 \times 127026,275 \times (1,2116 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,1524 \text{ m}}$$

$$hf_2 = 997,8105 \text{ m}$$

Despejando W_{o2} :

$$W_o = (h_2 - h_1) + \frac{v^2}{2 \times g} + \frac{P_{b2}}{\gamma} + hf_2$$

$$W_{o2} = (600 \text{ m} - 580 \text{ m}) + \frac{(1,216 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} + \frac{16873,670 \text{ kg/m}^2}{851 \text{ kg/m}^3} + 997,8105 \text{ m}$$

$$W_{o2} = 1037,7134 \text{ m}$$

2.2.1.10. Cálculo de potencia de la bomba en la ETI

$$Pot_{teórica} = Q \times \rho \times W_{o2}$$

$$Pot_{teórica} = 0,0221 \text{ m}^3/\text{s} \times 851 \text{ kg/m}^3 \times 1037,7134 \text{ m}$$

$$Pot_{teórica} = 19516,3796 \text{ kgm/s}$$

Convirtiendo:

$$Pot_{teórica} = 19516,3796 \text{ kgm/s} \times \frac{1 \text{ CV}}{75 \text{ kgm/s}} = 260,2183 \text{ CV}$$

$$Pot_{real} = \frac{Pot_{teórica}}{\text{Eficiencia}}, \quad Pot_{real} = \frac{260,2183 \text{ CV}}{0,75}$$

$$Pot_{real} = 346,9577 \text{ CV} \times \frac{0,986 \text{ HP}}{1 \text{ CV}}$$

$$Pot_{real} = 342,1002 \text{ HP}$$

En la estación Tigüipa se cuenta con cuatro unidades de bombeo con una capacidad total de potencia de 3.839 HP, de los cuales se pueden destinar dos unidades de bombeo con una potencia alrededor de 1000 HP para el desplazamiento de diesel hacia la estación Chorety.

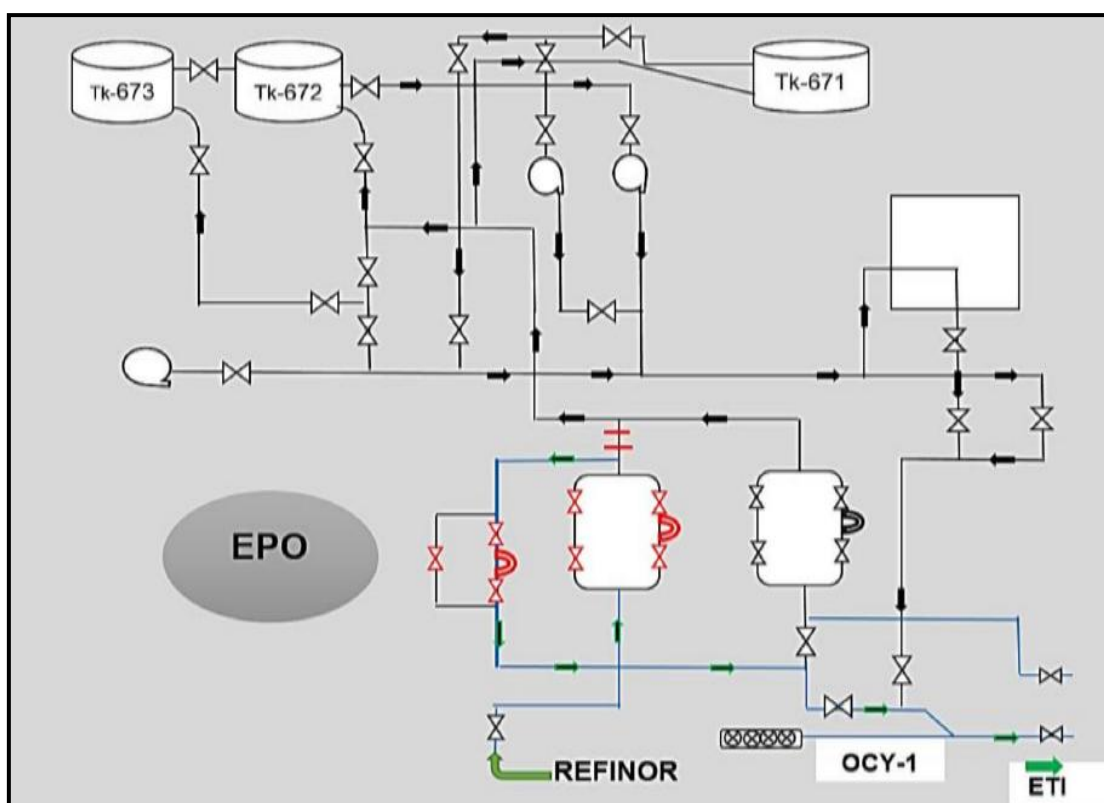
2.2.2 Adecuaciones en el oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1

Para llevar a cabo la independencia del OCY-1 es necesario realizar los siguientes trabajos detallados a continuación:

2.2.2.1. Adecuaciones en la Estación Pocitos

- Adecuar el puente de medición de exportación para flujo reverso y realizar contrastación.
- Verificación del sistema de control de válvulas actuadoras y cambio de set.
- Cambio de set del sistema de regulación de presión de salida al OCY-1.

Figura 11: Adecuaciones en la estación Pocitos



Fuente: Elaboración propia en base a planos de la estación Pocitos

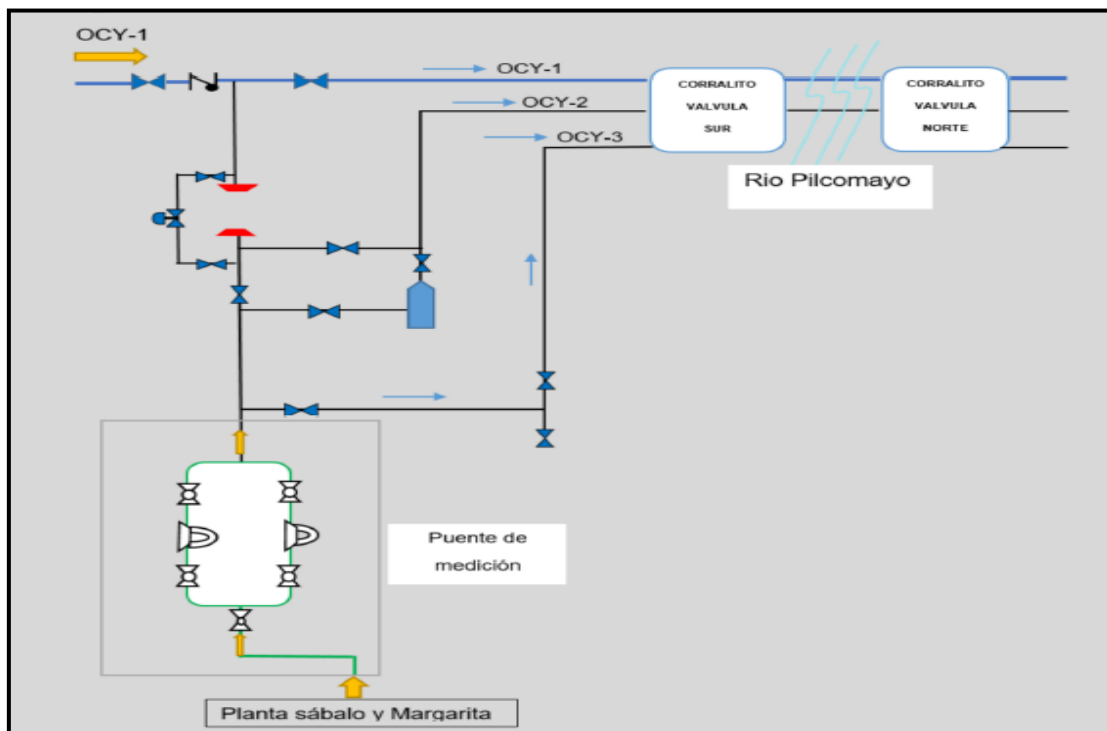
Para la adecuación del puente de medición se propone la implementación de un medidor de flujo másico tipo coriolis, en la verificación del sistema de control de válvulas actuadoras se propone la implementación de dos válvulas actuadoras ANSI 600 y para el cambio del sistema

de regulación de presión de salida al OCY-1 la implementación de dos válvulas reguladoras tipo globo ANSI 600 RF.

2.2.2.2. Adecuaciones en el puente de medición San Antonio

- Instalación de válvula check de 6" de diámetro ANSI 600.
- Retiro de válvula de 6" de diámetro ANSI 600 e instalación de dos bridas ciegas.

Figura 12: Adecuaciones del puente de medición San Antonio



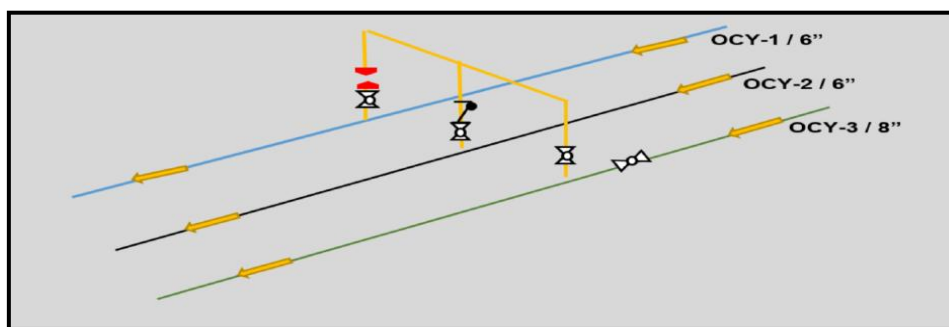
Fuente: Elaboración propia en base a planos del puente de medición San Antonio

Para la adecuación del oleoducto OCY-1 en el puente de medición San Antonio se propone la instalación de una válvula check de 6 pulgadas de diámetro ANSI 600 y el retiro de la válvula de 6 pulgadas de diámetro ANSI 600 y la instalación de dos bridas ciegas.

2.2.2.3. Adecuaciones en la válvula sur

- Retirar la válvula check de 6" de diámetro ANSI 600.
- Colocar dos bridas ciegas en su lugar para aislar correctamente el OCY-1.

Figura 13: Adecuaciones en la válvula sur



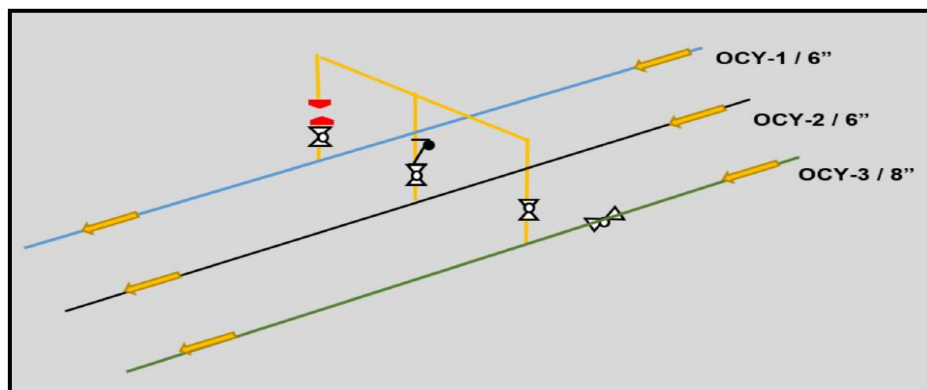
Fuente: Elaboración propia en base a planos de la válvula sur

Para la adecuación del oleoducto OCY-1 en la válvula sur se propone retirar la válvula check de 6 pulgadas de diámetro y colocar dos bridas ciegas de 6 pulgadas para no permitir la conexión con los oleoductos OCY-2 y OCY-3.

2.2.2.4. Adecuaciones en la válvula norte

- Retirar la válvula check de 6" de diámetro ANSI 600.
- Colocar dos bridas ciegas en su lugar para aislar correctamente el OCY-1.

Figura 14: Adecuaciones en la válvula norte



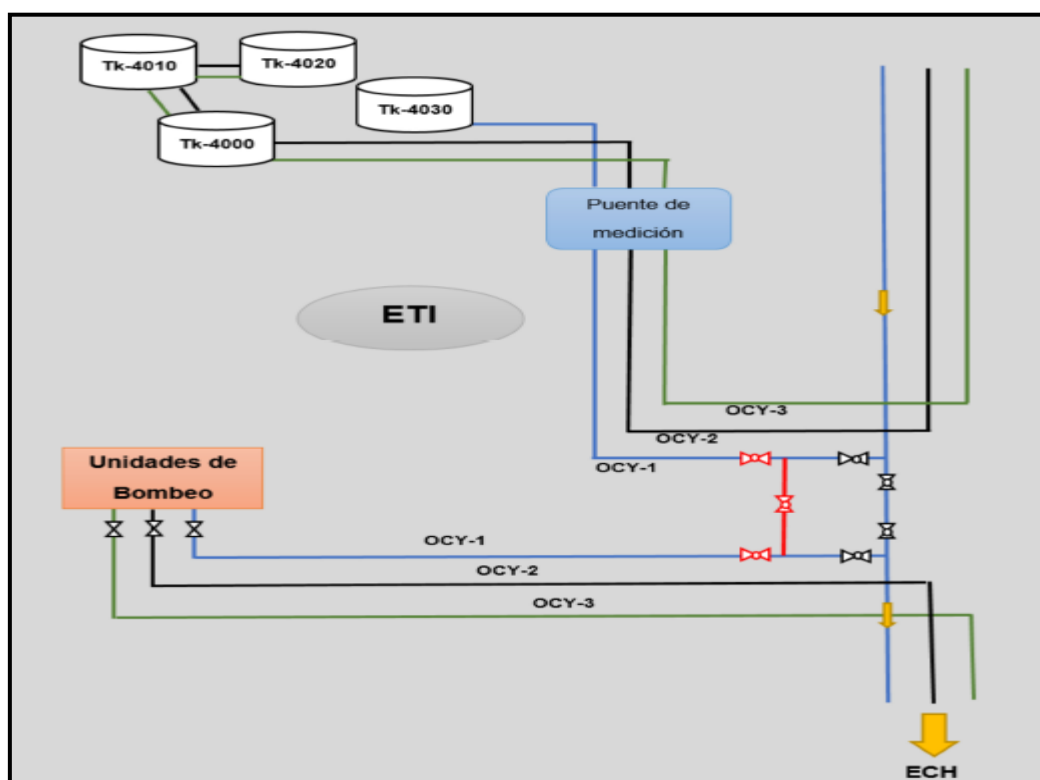
Fuente: Elaboración propia en base a planos de la válvula norte

Para la adecuación del oleoducto OCY-1 en la válvula norte se propone retirar la válvula check de 6 pulgadas de diámetro y colocar dos bridas ciegas de 6 pulgadas para no permitir la conexión con los oleoductos OCY-2 y OCY-3.

2.2.2.5. Adecuación en la estación Tigüipa

- Instalar un bypass con válvula de alivio de 6" de diámetro entre el OCY-1 de llegada y salida.

Figura 15: Adecuación en la estación Tigüipa



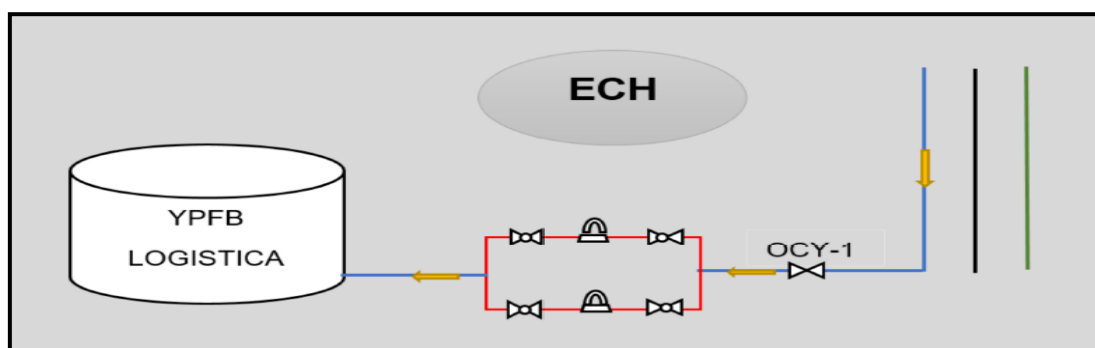
Fuente: Elaboración propia en base a planos de la estación Tigüipa

Para la adecuación del oleoducto OCY-1 en la estación Tigüipa se propone la instalación de un bypass y la inclusión de tres válvulas de alivio tipo globo de 6 pulgadas de diámetro ANSI 600 RF entre la llegada y salida del oleoducto OCY-1.

2.2.2.6. Adecuación en la estación Chorety

- Implementación de un sistema de medición de flujo para transferir el diesel a tanques de YPFB Logística.

Figura 16: Adecuación en la estación Chorety



Fuente: Elaboración propia en base a planos de la estación Chorety

Para la adecuación del oleoducto OCY-1 en la estación Chorety se propone la instalación de cuatro válvulas reguladoras neumáticas tipo Fisher y dos medidores de flujo másico tipo coriolis. Con estas instalaciones se tendría un sistema adecuado de medición de flujo para transferir el diesel a tanques de YPF Logística.

2.3 ANALISIS Y DISCUSION

2.3.1 Evaluación del tiempo de transporte de diesel a través del OCY-1

Esta evaluación consistió en la comparación del tiempo de transporte de diesel mediante camiones cisterna por carretera y el tiempo empleado para transportar el combustible mediante el oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1.

2.3.1.1. Tiempo de transporte mediante cisternas

Los camiones cisternas tienen que cumplir una serie de requisitos establecidos por normativa, según el reglamento para el transporte de carburantes por cisternas, del cual la agencia nacional de hidrocarburos (ANH) es como ente regulador.

La normativa establece que la velocidad en la que deben circular estos vehículos no deben superar los 40 kilómetros por hora en el área urbana y 65 kilómetros por hora en carretera. La distancia de carretera desde la estación Pocitos (Yacuiba) hasta la estación Chorety (Camiri) tiene una longitud de 256,3 kilómetros.

Los camiones cisternas tienen diferentes capacidades para el transporte de carburantes, los cuales están desde los 5.000 hasta los 35.000 litros. Por lo general los camiones cisternas que transportan diesel tienen una capacidad de 20.000 litros.

Tabla 3: *Tiempo de transporte mediante cisterna*

Capacidad (L)	Capacidad (Bbl)	Velocidad promedio (km/h)	Longitud carretera (km)	Tiempo de transporte (h)
20.000	125	52,5	256,3	5,28

Fuente: Elaboración propia en base al tiempo de transporte mediante cisterna

En base a la capacidad de cisterna, longitud de la carretera y la velocidad promedio, se determino que mediante un camión cisterna se transportan 125 barriles en 5 horas con 28 minutos.

2.3.1.2. Tiempo de transporte mediante el oleoducto OCY-1

El oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 tiene una capacidad de transporte de 12.000 barriles por día. Por tanto de acuerdo a la equivalencia de que 1 día tiene 24 horas, se tiene una capacidad de 500 barriles por hora.

De acuerdo a las capacidades y conociendo que un camión cisterna que transporta diesel tiene la capacidad de 125 barriles se tiene:

Tabla 4: *Tiempo de transporte mediante el OCY-1*

Capacidad (Bbl)	Tiempo de transporte (h)
500	1
125	0,25

Fuente: Elaboración propia en base al tiempo de transporte por OCY-1

Comparando los tiempos de transporte se puede evidenciar que mediante un camión cisterna se transportan 125 barriles en 5 horas con 28 minutos, mientras que por el oleoducto OCY-1 el mismo volumen se transporta en 25 minutos, demostrando así un ahorro significativo de tiempo de 5 horas con 3 minutos.

2.3.2 Evaluación del costo de transporte de diesel a través del OCY-1

Esta evaluación consistió en la determinación del costo del transporte de diesel mediante cisternas, dicho costo significara un ahorro significativo para el país con la adecuación del oleoducto OCY-1 para el transporte de diesel y la erradicación del uso de camiones cisternas.

Tabla 5: *Costo de transporte de diesel mediante cisterna*

Precio del combustible por litro (Diesel) (Bs/L)	Consumo de combustible de cisterna (km/L)	Recorrido diario de la cisterna (ida y vuelta) (km)	Combustible consumido por día (L)	Precio del combustible consumido por día (1 cisterna) (Bs)
3,72	7	512,6	73,23	272,41

Fuente: Elaboración propia en base al transporte de diesel por cisterna

Conociendo el precio del diesel por litro (3,72 Bs/L), el consumo de combustible de cisterna (7 km por litro) y el recorrido diario de la cisterna considerando un viaje de ida y vuelta desde la estación Pocitos hasta la estación Choretz (512,6 km), se pudo obtener mediante una regla de tres el combustible consumido por día con un valor de 73,23, el cual se multiplica por el precio del diesel por litro y se obtuvo el precio del combustible consumido por día para una cisterna el cual fue de 272,41 Bs..

Tabla 6: Costo de transporte de diesel mediante cisterna

Volumen transportado por oleoducto (Bbl)	Volumen transportado por cisterna (Bbl)	Numero de cisternas requeridas	Precio del combustible consumido por día (96 cisternas) (Bs)
12.000	125	96	26.151,36

Fuente: Elaboración propia en base al transporte de diesel por cisterna

Conociendo las capacidades de transporte por cisterna (125 Bbl) y oleoducto (12.000 Bbl), se obtuvo mediante una división el número de 96 cisternas requeridas para transportar el mismo volumen del oleoducto. Al multiplicar la cantidad de cisternas requeridas por el precio del combustible consumido en un día se obtuvo el precio del combustible consumido por día para 96 cisternas el cual es de 26.154,36 Bs.

Tabla 7: Costo de transporte de diesel mediante cisterna

Sueldo mensual estimado del conductor (Bs)	Sueldo diario estimado del conductor (Bs)	Sueldos por día (96 conductores) (Bs)	Gasto total por día en el transporte por camiones cisternas (Bs)
5.000	166,67	16.000	42.151,36

Fuente: Elaboración propia en base al transporte de diesel por cisterna

El sueldo mensual estimado de un conductor de cisterna es 5.000 Bs al mes y por día 166,67 Bs, al multiplicar este valor por las 96 cisternas requeridas, se obtuvo los sueldos por día para 96 conductores de cisterna el cual es de 16.000 Bs. Sumando el precio del combustible consumido por día (96 cisternas) y los sueldos por día (96 cisternas), se obtuvo el gasto por día para el transporte por camiones cisternas el cual es 42.151,36 Bs.

CAPITULO III: CONCLUSIONES

- En el diagnóstico se evidencio que el estado del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 es bueno tomando en cuenta su antigüedad de 68 años, resultado del mantenimiento preventivo y constante realizado por YPFB Transporte S.A., siendo un indicador representativo y valido para la adecuación del oleoducto y el transporte de diesel. Además se identificaron diferentes características a lo largo de su recorrido que nos sirvieron para el diseño de la adecuación.
- Con el diseño hidráulico pudimos determinar las principales condiciones de operación como las presiones requeridas en las estaciones de bombeo de Pocitos y Tiguiipa las cuales fueron de 1.032,1 PSI y 1.256,1 PSI para su posterior comparación con la presión máxima admisible de operación (MAOP) que fue de 1.374 PSI, se pudo evidenciar que ambas presiones no superan la MAOP por lo que cumple una de las principales condiciones de operación.
- La adecuación del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 se realizó en base a independizar el mismo, ya que a lo largo de su recorrido interactúa con estaciones de bombeo, diferentes tipos de válvula y puentes de medición. Se propuso la implementación de diferentes tipos válvulas, bridas ciegas y medidores de flujo, además del retiro y sustitución de algunas válvulas que ya no son necesarias. Con la implementación de los equipos propuestos se logro la correcta adecuación del oleoducto Yacuiba-Camiri OCY-1 para el transporte de diesel.
- En la evaluación se logró demostrar la gran diferencia de tiempo entre el transporte a través de cisterna y por el oleoducto OCY-1. Transportar 125 barriles de diesel por cisterna precisa de 5 horas con 28 minutos, mientras que por el oleoducto OCY-1 el mismo volumen de 125 barriles en 25 minutos, lo que asegura y garantiza el abastecimiento oportuno al mercado interno. En términos económicos transportar 12.000 barriles por día de acuerdo a la capacidad diaria del oleoducto OCY-1 equivale al servicio de 96 cisternas, por lo que de forma total el transporte mediante cisterna demanda un gasto de 42.151 bolivianos, monto significativo que el Estado se ahorraría de manera directa.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ÁLVARO AGUINAGA B. (2008). *CURSO DE VÁLVULAS Y BOMBAS*. Carmos. Obtenido de scribd.com
- FOX ROBERT W. (2002). *INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS*.
- HAROLD ALCONZ I. (2012). *CURSO DE BOMBAS CENTRIFUGAS Y PFB TRANSPORTE S.A.* Obtenido de la intranet YPFB Transporte S.A.
- IVER BARJA T. (2018). *DISEÑO DE POLIDUCTO SANTA CRUZ-CAMIRI PARA AMPLIAR LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE DIESEL OIL Y GASOLINA ESPECIAL*. Santa Cruz: UAGRM
- IPL TECHNOLOGY & CONSULTING SERVICES INC. (1995). *CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE OLEODUCTOS*. Canadá.
- JORGE RODRÍGUEZ A. (2009). *MOTORES ELÉCTRICOS*. ShareAlike
- MARKOS G. C. (2017) *Transporte de fluidos*. Recuperado de los apuntes de la materia de Transporte y Almacenaje de hidrocarburos. UMRPSFXCH.
- FERNANDES. G R. (2019). *REVERSIÓN DEL FLUJO EN EL OLEODUCTO SICA SICA-ARICA PARA EL TRANSPORTE DE DIESEL OIL*. Transporte de hidrocarburos. Universidad Privada Domingo Savio.
- TANQUES DE ALMACENAMIENTO (2012). Repsol.
- YPFB TRANSPORTE S.A. (2012) *GERENCIA SECTORIAL DE TRANSPORTE POR OLEODUCTOS*. Obtenido de la intranet de YPFB Transporte S.A.
- B31.4, A. (2023). *SISTEMAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS LÍQUIDOS Y OTROS LÍQUIDOS POR DUCTOS DE TUBERÍA*. TEXAS: ASME B31.4.
- PALACIOS, M. G. (2020). *RECOLECCION, TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE GAS NATURAL Y EL CRUDO*. PEMEX: Virtual Centro de Excelencia.
- YPFB TRANSPORTE S. A. (2012). *PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES DE OLEODUCTOS*. Obtenido de la intranet de YPFB Transporte S. A.
- IPL TECHNOLOGY & CONSULTING SERVICES INC. (1995). *ESTACIONES DE BOMBEO – COMPORTAMIENTO BASICO DE LOS FLUIDOS*. Canadá.
- GUSTAVO C. (2008). *TIPOS DE VALVULAS, TABLAS DE RENDIMIENTO DE MANO DE OBRA*.
- JORGE S. H. (2015). *ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCION Y COMERCIALIZACION DE HIDROCARBUROS*. Recuperado de la materia de Transporte de hidrocarburos. UMRPSFXCH.

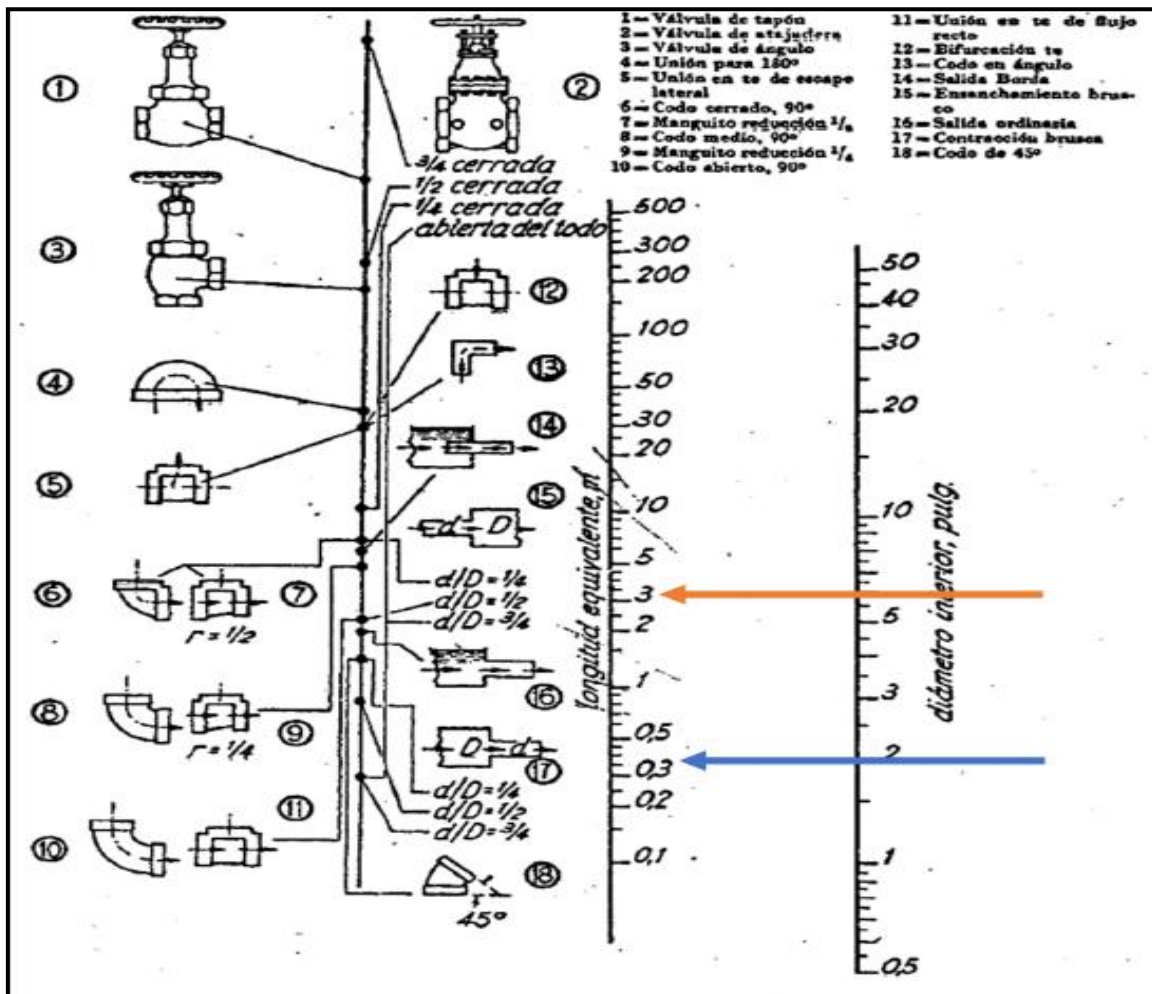
ANEXOS

Anexo 1: *Detalle de válvulas, punto de purgas y monitoreo del oleoducto OCY-1*

Progresiva (km+mt)	Diámetro nominal (plg/ANSI)	Tipo	Localización
0+100	6"/600	Bola	Salida de EPO (cámara dentro)
0+300	6"/600	Cortina	Salida de EPO (cámara fuera)
7+700	6"/600	Cortina	Zona ENDE (en cámara, frente ENDE)
31+910	6"/600	Cortina	Población de Caiza
46+470	6"/600	Cortina	Zona Suchal
66+068	6"/600	Cortina	Palmar grande
91+938	6"/600	Retención	Frente al PMSAN, con accionamiento para invertir flujo
91+950	6"/600	Cortina	Frente al PMSAN
94+600	6"/600	Bola	Válvula sur río Pilcomayo, con actuador neumático.
97+800	6"/600	Cortina	Lado norte del río Pilcomayo, en cámara
98+535	6"/600	Bola	El trillo, con actuador neumático
98+545	6"/600	Bola	El trillo, lanzadora de chanchos
121+864	2"/600	Purga	Por la senda a 10km de Tigüipa
121+867	6"/600	Cortina	Por la senda a 10km de Tigüipa
121+869	2"/600	Purga	Por la senda a 10km de Tigüipa
131+678	6"/600	Bola	Estación Tigüipa
131+980	6"/600	Bola	Estación Tigüipa
149+168	6"/600	Cortina	Río Macharety, lado sur
149+994	6"/600	Cortina	Río Macharety, lado norte
184+070	6"/600	Cortina	Cerca a la población Boyuibe
184+070	2"/600	Purga	Cerca a la población Boyuibe
196+200	6"/600	Cortina	Población de Boyuibe
196+200	2"/600	Purga	Población de Boyuibe
211+732	6"/600	Cortina	A 100mt del puente Cuevo
211+740	2"/600	Purga	A 100mt del puente Cuevo
245+941	2"/600	Purga	Camino a Yuti, frente a la escuela
245+950	6"/600	Cortina	Camino a Yuti, frente a la escuela
245+970	2"/600	Purga	Camino a Yuti, frente a la escuela
256+691	2"/600	Purga	Barrio San José
260+648	2"/600	Purga	Bypass, llegada a ECH
260+766	6"/600	Cortina	ECH, con actuador de ESD
260+980	6"/600	Cortina	ECH

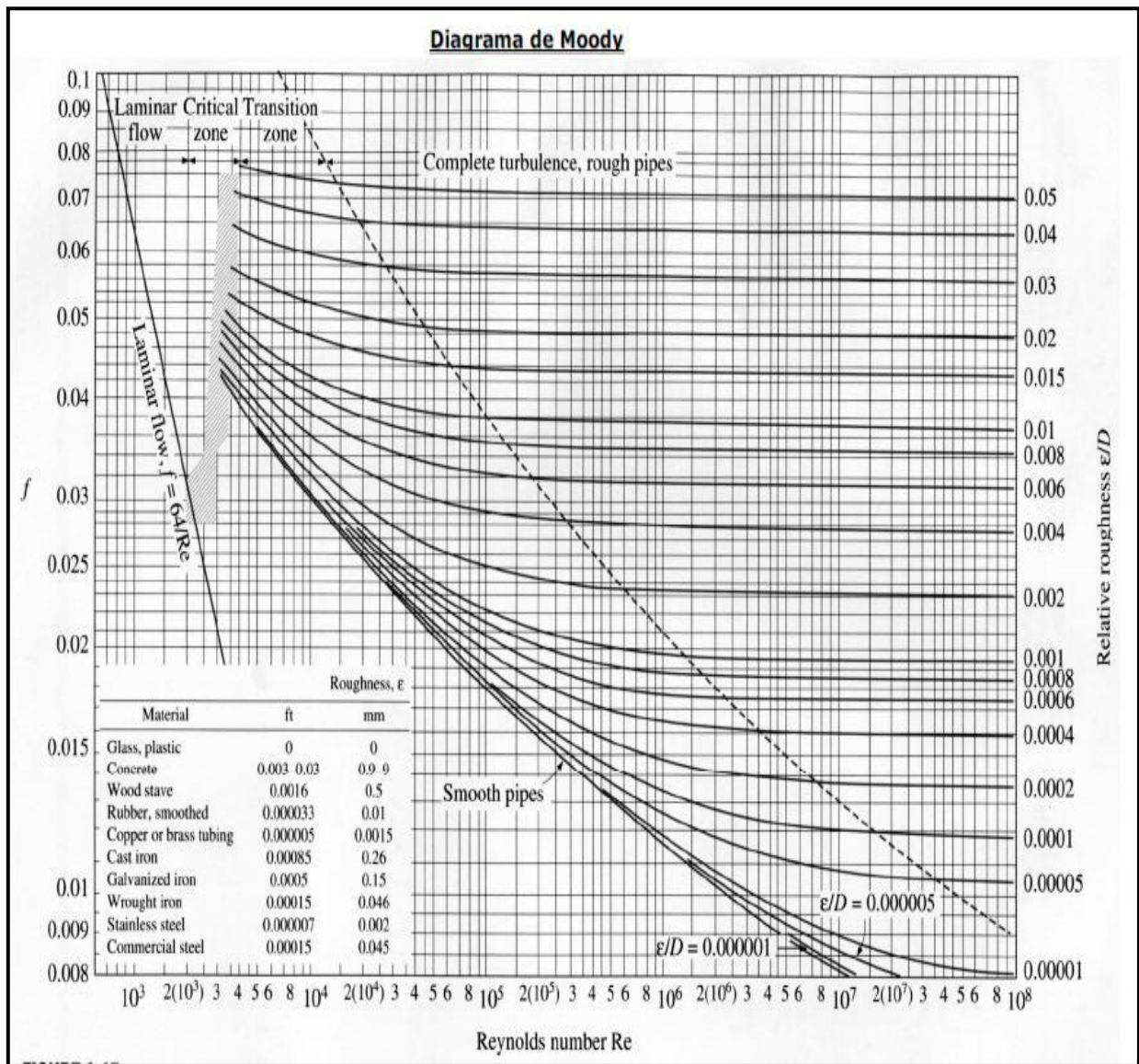
Fuente: Extraído de YPFB Transporte S.A.

Anexo 2: Resistencia de válvulas y accesorios



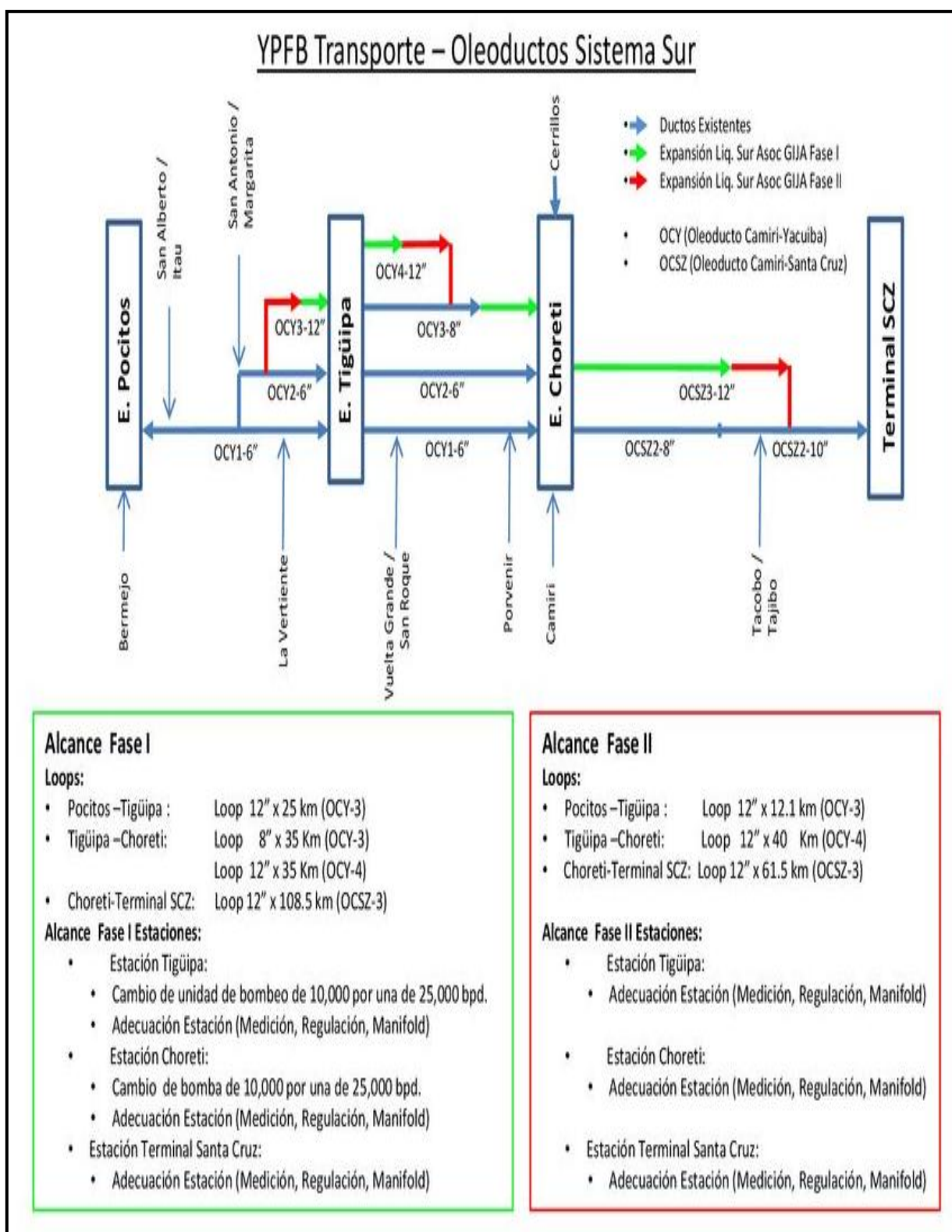
Fuente: Extraído de Vilbrandt: Chem. Eng. Plant. Design

Anexo 3: Diagrama de Moody



Fuente: Mónica Gonzales (2011). La guía física

Anexo 4: Oleoductos del Sistema Sur de transporte de hidrocarburos líquidos.



Fuente: Extraído de la página de YPFB Transporte S. A.