

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

**CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**



**SELECCIÓN DE UN AGENTE REDUCTOR DE FRICCIÓN  
PARA EL INCREMENTO DEL CAUDAL DE COMBUSTIBLES  
LÍQUIDOS A TRAVÉS DEL POLIDUCTO SUCRE-POTOSÍ.**

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

**LUZ FERNANDA CUBA CORTEZ**

**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.

**Luz Fernanda Cuba Cortez**

**Sucre, 26 octubre de 2023**

## **DEDICATORIA**

**Este Trabajo está dedicado a:**

A mi estrellita en el cielo papito Freddy que sin él esto no hubiera sido posible.

A mi mama Rosa y mi hermana Frida que siempre me brindaron su confianza, motivación y comprensión.

A mi familia que siempre está pendiente de mí, mi educación y mi salud.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a Dios, por bendecirme de salud y dicha día a día y por haber mandado personas maravillosas que me ayudaron y animaron en mi camino desde un principio.

A mi papito Freddy que gracias a él pude acabar esta meta y otras sin complicaciones eres el motivo de siempre dar lo mejor de mí, no tengo palabras que describan tu apoyo que es de gran importancia en mi vida.

A mi mamá Rosa y a mi hermana Frida que estuvieron viendo mis pasos día a día gracias por haber creído en mí hasta el último momento.

Gracias a mi familia y amigos resaltando a Madeleine y a Alex gracias por estar pendiente dándome ánimos y esperanza cuando soltaba la toalla.

A mi Universidad Mayor, Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca por abrirme las puertas y brindarme oportunidad de avanzar en mi vida profesional.

A mis docentes de la carrera agradecerles por todos sus conocimientos compartidos conmigo.

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un diagnóstico al poliducto PSP y se pudo evidenciar que necesita de un mantenimiento e incremento de capacidad y gracias a una serie de investigaciones se determinó que una de las mejores opciones para mantenimiento, incremento y eficiencia es la inyección de agentes reductores de fricción.

Se tiene como objetivo seleccionar un agente reductor para incremento de caudal en el poliducto PSP tramo Sucre-Potosí, al incrementar el caudal del poliducto se garantiza el abastecimiento de combustible líquidos para cubrir la demanda interna ofreciendo mayor cobertura y respondiendo a las necesidades de la población.

En el mercado se encuentran muchos y distintos agentes reductores de fricción se seleccionó el LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver debido a que cumple con las características necesarias para el poliducto.

Los conceptos teóricos de flujo por tuberías, las ecuaciones de mecánica de fluidos y las variables de los fluidos a utilizar nos ayudaran a entender, calcular y comparar la presión de carga por fricción y caudal sin y con la inyección del agente reductor de fricción.

Por medio del desarrollo de los cálculos se obtuvo disminución de perdidas por fricción en un 30.08% y 38.41% en un aumento de caudal del 33%, tal porcentaje logra disminución de costos en operación de transporte virtual.

Finalmente se realizó la estimación de costos para la inversión de la inyección del poliducto obteniendo Bs204000 y así cumpliendo con los objetivos del proyecto.

## INDICE DE CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>1.1. ANTECEDENTES</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>1.3. JUSTIFICACIÓN</b> .....  | <b>3</b>  |
| 1.3.1. Justificación técnica .....   | 3         |
| 1.3.2. Justificación económica .....   | 3         |
| 1.3.3. Justificación social .....  | 3         |
| <b>1.4. METODOLOGÍA</b> .....  | <b>4</b>  |
| 1.4.1. Tipo de investigación .....   | 4         |
| 1.4.2. Técnicas de investigación.....  | 4         |
| 1.4.3. Instrumentos de investigación .....   | 4         |
| <b>1.5. OBJETIVOS</b> .....  | <b>4</b>  |
| 1.5.1. Objetivo General .....  | 4         |
| 1.5.2. Objetivos Específicos.....  | 4         |
| <b>CAPÍTULO II: DESARROLLO</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>2.1. MARCO CONCEPTUAL</b> .....   | <b>6</b>  |
| 2.1.1. Generalidades de hidrocarburos líquidos.....  | 6         |
| 2.1.1.1. Transporte de combustibles líquidos por poliductos .....  | 6         |
| 2.1.2. Agentes reductores de fricción .....  | 8         |
| 2.1.2.1. Agentes reductores de fricción de polímeros .....   | 8         |
| 2.1.2.2. Uso de Agentes reductores de fricción de polímeros en transporte de<br>hidrocarburos líquidos ..... | 9         |
| 2.1.3. Régimen de flujo de fluidos en tubería .....  | 11        |
| 2.1.4. Velocidad media flujo .....   | 11        |
| 2.1.5. Número de Reynolds .....  | 12        |
| 2.1.6. Ecuación general de energía .....   | 12        |
| 2.1.7. Formula Darcy.....  | 13        |
| 2.1.8. Cálculo del factor de fricción en tuberías .....  | 14        |
| 2.1.9. Cuantificación de agentes reductores de fricción.....   | 14        |
| 2.1.9.1. Cálculo de reducción de fricción.....   | 15        |
| 2.1.9.2. Rendimiento de reductores de fricción .....   | 16        |
| <b>2.2. MARCO CONTEXTUAL</b> .....   | <b>17</b> |
| 2.2.1. Descripción general del poliducto Sucre-Potosí .....  | 17        |
| 2.2.2. Ubicación .....   | 18        |
| 2.2.3. Estaciones de bombeo del poliducto PSP .....  | 19        |
| 2.2.3.1. Estación Qhora Qhora.....   | 19        |
| 2.2.3.2. Estación de Mariaca .....   | 19        |
| 2.2.3.3. Planta Potosí .....   | 20        |
| 2.2.4. Diagnóstico del poliducto.....  | 20        |
| <b>2.3. INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS</b> .....  | <b>21</b> |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| 2.3.1.      | Curva característica de la bomba a máxima rpm .....                                    | 21        |
| 2.3.2.      | Cálculo de pérdidas de carga por fricción.....   | 22        |
| 2.3.2.1.    | Análisis para la gasolina especial .....   | 22        |
| 2.3.2.2.    | Análisis para Diesel Oil .....   | 24        |
| 2.3.3.      | Cálculo de pérdidas de carga por fricción con LP <sup>TM</sup> 100 Flow Improver ..... | 26        |
| 2.3.3.1.    | Análisis para la gasolina especial con LP <sup>TM</sup> 100 Flow Improver .....        | 27        |
| 2.3.3.2.    | Análisis para Diesel Oil con LP <sup>TM</sup> 100 Flow Improver .....                  | 29        |
| 2.3.4.      | Concentración de LP <sup>TM</sup> 100 Flow Improver .....                              | 31        |
| 2.3.4.1.    | Concentración de LP <sup>TM</sup> 100 Flow Improver en gasolina especial .....         | 32        |
| 2.3.4.2.    | Concentración de LP <sup>TM</sup> Flow Improver en diesel oil.....                     | 32        |
| 2.3.5.      | Tabla de resultados .....  | 33        |
| 2.3.6.      | Estimación de costos.....  | 34        |
| 2.3.6.1.    | Costos de inversión .....  | 34        |
| 2.3.6.2.    | Costos de operación.....   | 35        |
| <b>2.4.</b> | <b>ANALISIS Y DISCUSIÓN.....</b>   | <b>36</b> |
| <b>2.5.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>   | <b>37</b> |
|             | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>38</b> |
|             | <b>ANEXOS.....</b>   | <b>40</b> |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| <b>Gráfico 1:</b> Poliducto .....                                      | 7  |
| <b>Gráfico 2:</b> Costo unitario del transporte de hidrocarburos.....  | 10 |
| <b>Gráfico 3:</b> Régimen de flujo.....                                | 11 |
| <b>Gráfico 4:</b> Balance de energía en tuberías .....                 | 12 |
| <b>Gráfico 5:</b> Puntos de medición de presiones .....                | 13 |
| <b>Gráfico 6:</b> Esquema de fluido a través de una tubería .....      | 15 |
| <b>Gráfico 7:</b> Ubicación de estaciones de bombeo .....              | 18 |
| <b>Gráfico 8:</b> Ubicación del poliducto.....                         | 18 |
| <b>Gráfico 9:</b> Estación qhora qhora .....                           | 19 |
| <b>Gráfico 10:</b> Estación de mariaca .....                           | 19 |
| <b>Gráfico 11:</b> Planta potosí.....                                  | 20 |
| <b>Gráfico 12:</b> Curva característica de la bomba a máxima rpm ..... | 21 |
| <b>Gráfico 13:</b> Concentración $Ip^{tm}100$ flow improver .....      | 32 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1:</b> Descripción de dra's .....                                     | 9  |
| <b>Tabla 2:</b> Descripción general del poliducto.....                         | 17 |
| <b>Tabla 3:</b> Característica de la bomba a máxima rpm .....                  | 21 |
| <b>Tabla 4:</b> Datos de las ubicaciones y alturas de las estaciones.....      | 22 |
| <b>Tabla 5:</b> Propiedades de la GE.....                                      | 22 |
| <b>Tabla 6:</b> Propiedades de DO .....  | 24 |
| <b>Tabla 7:</b> Propiedades de GE con dra .....                                | 27 |
| <b>Tabla 8:</b> Propiedades de DO con dra .....                                | 29 |
| <b>Tabla 9:</b> Rendimiento de reductor de fricción.....                       | 31 |
| <b>Tabla 10:</b> Resultados .....  | 33 |
| <b>Tabla 11:</b> Costos de inversión .....                                     | 34 |
| <b>Tabla 12:</b> Análisis económico antes de la ejecución del proyecto.....    | 35 |
| <b>Tabla 13:</b> Análisis económico despues de la ejecución del proyecto ..... | 35 |

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. ANTECEDENTES**

La empresa YPFB Logística SA actualmente administra los tramos nacionales de ductos verificando un crecimiento en el consumo de combustibles en la población por ello se están buscando alternativas para poder cumplir con los requerimientos de transporte que día a día están creciendo. (Y.P.F.B. logística, 2017)

José Antonio Riveros Luna en su tesis “Mejoramiento volumétrico en el poliducto OCOLP, tramo Cochabamba-Oruro, por medio de agentes reductores de fricción (DRA’s)” Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. (2022)

Estudió la implementación de bombas y la inyección de DRA’s para la solución de pérdida de carga en el poliducto OCOLP.

En la implementación de bombas obtuvo resultados elevados de pérdidas de carga y presión de succión, que indican gastos mecánicos, en la inyección de DRA (Turboflo™SV), se obtuvo un incremento de 32% en el caudal, reducción de viscosidad y aumento de velocidad; siendo este último la mejor opción para el mejoramiento volumétrico.

Delrio S.A.S. en su publicación “Reductores de fricción” (2012).

Manifiesta que los agentes reductores de fricción y mejoradores de flujo, son cualquier material que reduce la pérdida de presión por fricción durante el flujo de fluidos en un oleoducto, poliductos y líneas de flujo, los mejoradores de flujo han demostrado ser efectivos en varias gravedades de petróleo o incluso en derivados multifásicos. Estos pueden ofrecer más de 50 por ciento de reducción de fricción en oleoductos que operan en condiciones de flujo turbulento.

Jerson Rodas Alarcón en su tesis “Optimización energética en la ampliación de capacidad de un sistema de transporte de líquidos de gas natural” Pontificia Universidad Católica del Perú (2015).

Su objetivo al describir las principales opciones de incremento de capacidad para un sistema de transporte de líquidos era seleccionar el más óptimo en el Sistema de Transporte X3.

Obteniendo como la mejor opción la implementación de DRA's debido a su fácil implementación y costo, además reduciendo el consumo de energía hasta un 40%.

Félix Gómez Cuenca en su publicación "Interés del uso de aditivos en la reducción del consumo energético en el transporte" (España, 2004).

Demostó mediante ensayos reales en poliductos la reducción de fricción que se obtiene con dos DRA's de última generación, obteniendo una mejor capacidad con costos no elevados.

ENAP la empresa estatal de Petróleo y Gas de Chile implemento con éxito el uso de DRA's en su red de tuberías para mejorar la eficiencia en el transporte de productos refinados entre sus plantas. Gracias a su uso logro aumentar el flujo de productos en un impresionante de 74% lo que les permitió satisfacer sus necesidades de transporte de más eficiente y rentable. El Mercurio (Julio, 2012).

Food and Agriculture Organization of the United Nations una empresa de alimentos utilizo un agente reductor de fricción poliacrilamida para el riego por goteo de vinaza de caña de azúcar obteniendo un aumento considerable en el sistema de riego por goteo. LG Meloca, Al justí (2021)

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El poliducto Sucre-Potosí, fue construido entre los años 1974 y 1975, tiene 48 años de operación, una longitud de 108,7 Km y un diámetro 0.0762 m siendo el menor en comparación de otros poliductos y no ha sido actualizado para satisfacer la demanda de combustibles líquidos.

El poliducto trabaja con el 30% de su capacidad y la demanda excede esa capacidad, la cual es cubierta con transporte virtual que se realiza por cisternas que recorren 154,9 Km, pero esta puede ser demorada o incluso no llegar a su destino debido a manifestaciones, bloqueos, daños en la cisterna, etc. lo que ocasiona el retraso en la distribución, afectando en la economía.

Una de las causas que afecta la capacidad del transporte del poliducto es la disminución de la presión del fluido y pérdida de energía por fricción, ya que esta ocurre debido a la interacción entre el fluido que se transporta y las paredes del poliducto. A medida que el fluido fluye a

través del poliducto, se genera una resistencia debido a la fricción con las superficies internas del conducto.

Por esta razón es crucial buscar alternativas para reducir la fricción, así brindar una mejor eficiencia y a su vez optimizar el índice de consumo de la población de Potosí.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

#### **1.3.1. Justificación técnica**

Con la selección del agente reductor de fricción para el poliducto Sucre-Potosí se aumentará la capacidad de volúmenes de hidrocarburos líquidos enviados al departamento de Potosí que abastece a las ciudades de Potosí, Tupiza, Uyuni y áreas de influencia, por lo cual permitirá un transporte seguro evitando de esta manera el transporte por cisterna.

Con el DRA se resolverá el problema de la pérdida de presión por fricción, obteniendo una serie de beneficios como: el incremento del caudal, reducción de la potencia de bombeo, la mejora de la eficiencia del sistema, reducción de corrosión, etc. Que actualmente se presentan por la falta de mantenimiento e inspección.

#### **1.3.2. Justificación económica**

Al utilizar el DRA se tendrá un ahorro de costos operativos como el de energía, ya que reducirá la potencia para bombear.

Al incrementar la capacidad del poliducto se podrá evitar el gasto en el transporte por cisterna; además los DRA´s ayudan a proteger las tuberías contra la corrosión y el desgaste reduciendo los costos de mantenimiento.

Los ahorros que se generarían con el DRA ayudarían a YPFB a promover el desarrollo económico de Bolivia.

#### **1.3.3. Justificación social**

Al cubrir la demanda de transporte de hidrocarburos líquidos se evitará descontentos y reclamos de la población. De igual manera al evitar el transporte por cisterna se evita riesgos a los trabajadores, materiales y población.

Además, se demostraría eficiencia y solidez ante los desafíos actuales y futuros.

## **1.4. METODOLOGÍA**

### **1.4.1. Tipo de investigación**

Aplicada: porque se centra en atender una necesidad en Potosí, a través de una alternativa para el incremento de caudal.

Descriptiva: debido a que se realizara una descripción de la situación actual.

Evaluativa: ya que se analizará los resultados actuales con los resultados con la inyección de agente reductor en Potosí.

### **1.4.2. Técnicas de investigación**

Consultas bibliográficas: la revisión de bibliografía coadyuvara en la obtención de información relevante y necesaria para los propósitos del estudio, además la información estadística de la demanda actual es involucrada en el cálculo de la proyección.

Cuestionario: para obtener la información y conocimientos acerca de la operación del poliducto.

### **1.4.3. Instrumentos de investigación**

Datos estadísticos, libros, manuales, registros, material relacionado a las temáticas del proyecto, los cuales brindaran todo el apoyo teórico a la investigación, además de reforzar y establecer los criterios teóricos que sustentan la evaluación.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo General**

Seleccionar un agente reductor de fricción para el incremento del caudal de combustibles líquidos a través del poliducto Sucre-Potosí.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Realizar el diagnóstico actual del poliducto PSP.
- Evaluar los diferentes agentes reductores de fricción para la selección del agente más factible.

- Demostrar el incremento del poliducto PSP con la inyección del agente reductor de fricción.
- Estimar costos para la inversión de la inyección del agente reductor de fricción seleccionado.

## CAPÍTULO II: DESARROLLO

### 2.1. MARCO CONCEPTUAL

#### 2.1.1. Generalidades de hidrocarburos líquidos

Los hidrocarburos líquidos son compuestos orgánicos formados por átomos de carbono e hidrógeno. Se encuentran en la naturaleza en forma de petróleo crudo, gas natural y carbón.

Se clasifican en las siguientes categorías:

- **Petróleo crudo:** Mezcla compleja de hidrocarburos que se extrae del subsuelo. El petróleo crudo se puede utilizar como combustible o como materia prima para la producción de productos refinados, como gasolina, diésel, combustible para aviones y asfalto.
- **Productos refinados:** Son productos derivados del petróleo crudo que se obtienen mediante procesos de refinación. Los productos refinados se utilizan principalmente como combustibles, pero también se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales.

#### 2.1.1.1. Transporte de combustibles líquidos por poliductos

Los poliductos de combustible líquido son sistemas de tuberías que se utilizan para transportar combustibles líquidos, como petróleo crudo, productos refinados y biocombustibles. Los poliductos son el método de transporte de combustibles líquidos más eficiente y económico.

##### a) Componentes de los poliductos

Los principales componentes de un poliducto son:

- **Tuberías:** Las tuberías son el componente principal de un poliducto. Están fabricadas con materiales resistentes a la corrosión y a las altas presiones, y están diseñadas para transportar grandes volúmenes de fluidos.
- **Accesorios:** Los accesorios son piezas que se utilizan para conectar las tuberías, controlar el flujo de los fluidos y realizar reparaciones.
- **Estaciones de bombeo:** Las estaciones de bombeo se utilizan para aumentar la presión del fluido y mantenerlo en movimiento.

- **Sistemas de control:** Los sistemas de control se utilizan para monitorizar el funcionamiento del poliducto y detectar posibles problemas.

## b) Características de los poliductos

Los poliductos de combustibles líquidos se caracterizan por las siguientes características:

- **Material:** Los poliductos están fabricados con materiales resistentes a la corrosión y a la abrasión, como el acero, el PVC y el HDPE.
- **Diámetro:** El diámetro de los poliductos varía según el volumen de combustibles líquidos que se transporta.
- **Longitud:** Los poliductos pueden tener una longitud de varios cientos de kilómetros.
- **Presión:** Los poliductos operan a presiones elevadas para garantizar el flujo de combustibles líquidos.

**Gráfico 1. Poliducto**



*Fuente: ANH 2017*

## c) Funcionamiento de los poliductos

Los poliductos de combustibles líquidos funcionan de la siguiente manera:

1. Los combustibles líquidos se bombean a un extremo del poliducto.
2. Los combustibles líquidos fluyen a través del poliducto a presión.
3. Los combustibles líquidos se descargan en el otro extremo del poliducto.

### 2.1.2. Agentes reductores de fricción

Los agentes reductores de fricción son aditivos químicos que se agregan a los fluidos para reducir la fricción entre las superficies en contacto. Se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluidas la industria del petróleo y el gas, la fabricación, la construcción y el transporte.

Los agentes reductores de fricción se pueden clasificar en dos categorías principales:

- **Agentes reductores de fricción de polímeros:** Estos agentes forman una capa delgada sobre las superficies en contacto, lo que reduce el contacto directo entre ellas. Los agentes reductores de fricción de polímeros son los más comunes y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones.
- **Agentes reductores de fricción de surfactantes:** Estos agentes cambian la tensión superficial del fluido, lo que hace que sea más fácil que las partículas se deslicen entre sí. Los agentes reductores de fricción de surfactantes se utilizan a menudo en aplicaciones donde se requiere una lubricación superior.

Los agentes reductores de fricción más utilizados en poliductos son los de polímero.

#### 2.1.2.1. Agentes reductores de fricción de polímeros

Los DRA's polímeros se pueden clasificar según el tipo de polímero utilizado en las siguientes categorías:

- a) **Polímeros de cadena larga:** Los polímeros de cadena larga forman una capa más gruesa y continua que proporciona una mejor protección contra la fricción. Los polímeros de cadena larga más comunes utilizados como DRA's son:
  - Poliestireno sulfonado (PSS)
  - Poliacrilato de sodio (PAM)
  - Polietileno (PE)
  - Polipropileno (PP)
- b) **Polímeros de cadena corta:** Los polímeros de cadena corta forman una capa más delgada y dispersa que puede ser más efectiva en fluidos viscosos. Los polímeros de cadena corta más comunes utilizados como DRA's son:

- Poliglicol (PEG)
- Poliacrilamida (PAM)
- Poliacrilamida de alto peso molecular (HPAM)
- Poliacrilamida de bajo peso molecular (LPAM)

**Tabla 1: Descripción de DRA's**

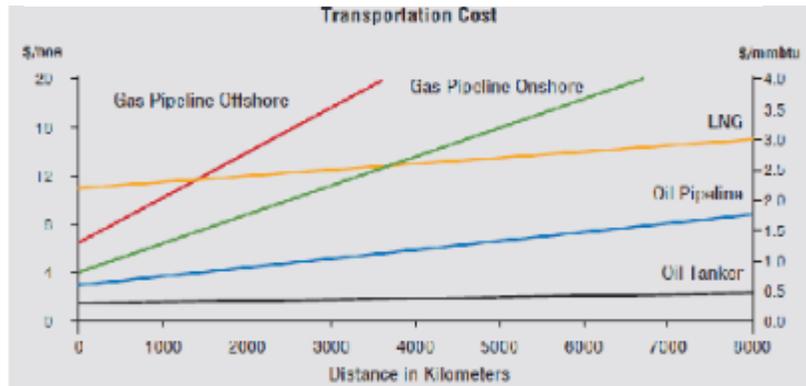
| QUIMICOS   | DESCRIPCION  |
|--|--|
| Polietileno lineal de baja densidad<br>Copolímero de $\alpha$ -olefina lineal con reticuladores 10 | $\alpha$ -olefinas hasta 10 moles%<br>Las $\alpha$ -olefinas son 1-hexeno, 1-octen, 1deceno y 1-dodeceno<br>Los reticuladores son divinilbenceno o organosiloxanos con vinilo colgante |
| Poliacrilamidas, oxido de polialquileno, polímeros y sus copolímeros                               | Reductor de arrastre soluble en agua para emulsiones   |
| Fluorocarbonos   | Para aceites crudos asfálticos   |
| Polialquilmetacrilatos   | Esteres con C-10 a C-18 e iónicos<br>Los monómeros reducen la fricción en el flujo de hidrocarburos por un factor de 5 en concentraciones de 25 ppm                                    |
| Terpolímero de estireno, alquilacrilato y (ácido acrílico o ácido metacrilato)                     | El estireno incluye también t-butil estireno (reductor de arrastre para fluidos de hidrocarburos)  |

*Fuente: Marawan, Pipeline Drag Reducer 2014*

### 2.1.2.2. Uso de Agentes reductores de fricción de polímeros en transporte de hidrocarburos líquidos

En el transporte de hidrocarburos líquidos es muy común el uso de agentes reductores de fricción en sus operaciones, pues es una de las opciones más importantes de incremento de capacidad de un sistema de transporte debido a su fácil implementación a un sistema ya existente y a su apreciada capacidad de reducir las pérdidas por fricción. Sin embargo, se debe tener en cuenta que existe una relación entre el consumo de este reductor de fricción con el consumo energético del sistema, así como también con la forma de operación del mismo, esto implica que siempre hay una oportunidad de optimización energética si lo que se busca es ser más eficiente en la operación. (Jerson,2015)

**Gráfico 2: Costo unitario del transporte de hidrocarburos**



*Fuente: Jerson, 2015*

En la ilustración 2 se muestra como el costo de transporte de hidrocarburos se incrementa significativamente con la distancia debido a que los requerimientos de energía de bombeo se hacen más grandes pues se tienen mayores pérdidas de fricción. (Jerson, 2015)

La operación de ductos de líquidos en general es muy cara. Los costos de energía eléctrica, otros combustibles y agentes reductores de fricción (químicos asociados a la operación de ductos) están dentro de los mayores gastos para la empresa transportista. En algunos casos puede ser mayor al costo del personal. (Jerson, 2015)

Algún ahorro en los costos operativos puede repercutir directamente en los balances económicos de la compañía. Pero la habilidad para reducir los costos en muchos casos depende de varios factores como:

- Complejos contratos de suministro energía eléctrica o combustible.
- Variación de precio de la energía con el tiempo y locación.
- Modulación del precio de la energía en tiempo real en algunas áreas.
- Programación de despacho de hidrocarburos.
- Transporte de diferentes productos por un mismo sistema.
- Restricciones de máximas concentraciones de reductores de fricción que son compuestos por un material que reduce las pérdidas de presión por fricción en el flujo de líquidos por tuberías.

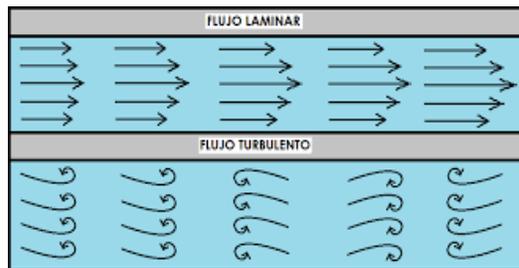
### 2.1.3. Régimen de flujo de fluidos en tubería

El régimen de flujo de fluidos en tubería es la forma en que se mueve el fluido a través de una tubería. Los diferentes regímenes de flujo se caracterizan por la forma en que las partículas del fluido se mueven. (Fernández, 2002)

Los principales regímenes de flujo de fluidos en tubería son:

- Laminar: En el régimen laminar, las partículas del fluido se mueven en capas paralelas. Este régimen de flujo se produce a velocidades bajas y se caracteriza por un flujo suave y uniforme.
- Turbulento: En el régimen turbulento, las partículas del fluido se mueven de forma caótica. Este régimen de flujo se produce a velocidades altas y se caracteriza por un flujo irregular y turbulento.

Gráfico 3: Régimen de flujo



Fuente: Informe Fernández 2002

### 2.1.4. Velocidad media flujo

La velocidad media promedio de cierta sección transversal dada por la ecuación de continuidad para un flujo estacionario:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{\dot{w}}{A\rho} = \frac{wv}{A} \quad (1)$$

Donde:

$\bar{v}$  = Velocidad media

$Q$  = Caudal

$A$  = Area transversal

$\dot{w}$  = Flujo masico

$\rho$  = Densidad

$v = \text{Volumen específico}$

### 2.1.5. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional que se utiliza para caracterizar el régimen de flujo de un fluido en tubería. El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido.

Régimen de flujo según el número de Reynolds:

- $Re < 2100$ : Régimen laminar
- $Re > 4000$ : Régimen turbulento

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu_L} \quad (2)$$

Donde:

$Re = \text{Numero de Reynolds}$

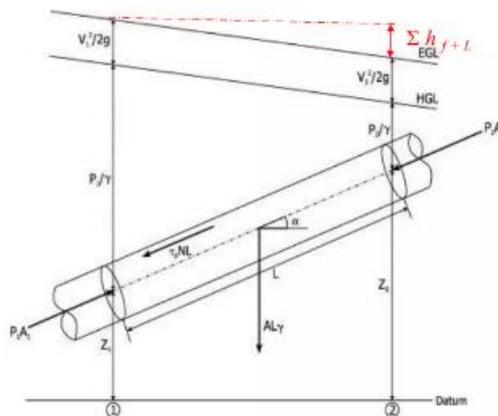
$D = \text{Diametro interno}$

$v = \text{Velocidad del fluido}$

$\mu_L = \text{Viscocidad dinamica del fluido}$

### 2.1.6. Ecuación general de energía

**Gráfico 4: Balance de energía en tuberías**



Fuente: Ing. Hernández 2014

La ley de la conservación de la energía aplicada al flujo de fluidos en una tubería sostiene que la energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como

referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión, la altura debida a la velocidad y a la energía pérdida debido al rozamiento con las paredes de las tuberías y fricción interna del fluido. (Jerson, 2015)

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (3)$$

Donde:

$z_1, z_2$ : Altura en los puntos 1 y 2

$P_1, P_2$ : Presión del fluido en los puntos 1 y 2

$v_1, v_2$ : Velocidad del fluido en los puntos 1 y 2

$\rho_1, \rho_2$ : Densidad del fluido en los puntos 1 y 2

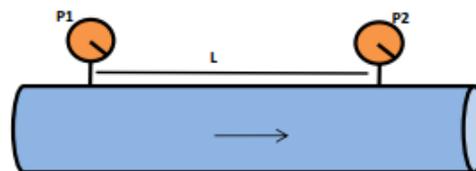
$h_L$ : Pérdida de energía desde el punto 1 al punto 2.

$g$ : Aceleración de la gravedad

### 2.1.7. Fórmula Darcy

El flujo de los fluidos en tuberías está siempre acompañado de rozamiento de las partículas del fluido entre sí y, consecuentemente, por la pérdida de energía disponible; en otras palabras, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo. Si se conectan dos manómetros Bourdon a una tubería por la que pasa un fluido, el manómetro P1, indicaría una presión estática mayor que el manómetro P2. (Jerson, 2015)

Gráfico 5: Puntos de medición de presiones



Fuente: Jerson 2015

La ecuación general de la pérdida de presión, conocida como la fórmula de Darcy y que se expresa:

$$\Delta P = \frac{\rho f L v^2}{2D} \quad (4)$$

Donde:

$\Delta P$  : Caída de presión entre los puntos 1 y 2

$f$ : Factor de fricción

### 2.1.8. Cálculo del factor de fricción en tuberías

Para régimen laminar ( $Re < 2100$ ), el factor de fricción ( $f$ ) se calcula a partir de la ecuación de Poiseville:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{vD\rho} \quad (5)$$

Para régimen turbulento, la estimación del factor de fricción se realiza mediante la ecuación desarrollada por Colebrook y White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log \left( \frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.71} + \frac{2.52}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Donde:

$\frac{\varepsilon}{D}$ : Rugosidad relativa

$\varepsilon$ : Rugosidad absoluta

D: Diámetro interno

La ecuación de Colebrook-White es válida para  $Re$  comprendidos entre 4000 y  $10^8$ , y valores de rugosidad relativa comprendidos entre 0 y 0.05.

En el Anexo "A" se muestra el diagrama de Moody en donde se puede calcular gráficamente el valor del factor de fricción ( $f$ ) a diferentes números de Reynolds, diámetro y rugosidad absoluta de la tubería.

### 2.1.9. Cuantificación de agentes reductores de fricción

Para cuantificar el efecto de los DRA, se utiliza el factor de reducción de fricción:

$$F = \frac{(h_{sinDRA} - h_{conDRA})}{h_{sinDRA}} \quad (7)$$

Donde:

$h_{sinDRA}$ : Pérdida de carga por fricción sin uso de DRA

$h_{conDRA}$ : Pérdida de carga por fricción con uso de DRA

Dado que  $h_{sinDRA}$  es más grande que  $h_{conDRA}$ , entonces F es siempre menor que la unidad y se expresa con frecuencia en porcentaje.

Para modelar un sistema de transporte, el factor de reducción fricción multiplica directamente al factor de fricción.

$$f = f_m(1 - F) \quad (8)$$

Donde:

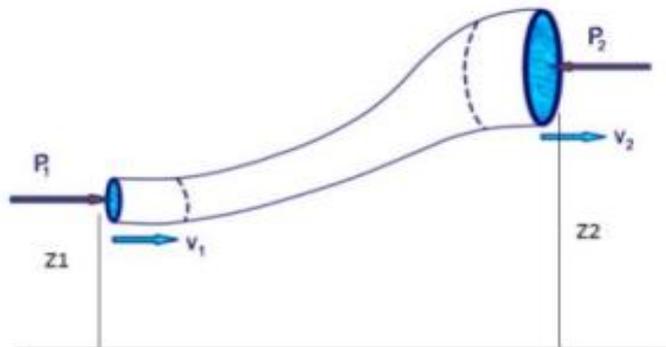
F = Factor de reducción de fricción

$f_m$  = Factor de fricción sin DRA

### 2.1.9.1. Cálculo de reducción de fricción

Para calcular la reducción de fricción que genera un DRA se deberá conocer cual son los valores y  $h_{sinDRA}$ ,  $h_{conDRA}$ , considerando el siguiente sistema de flujo de líquidos entre dos puntos (1) y (2):

Gráfico 6: Esquema de fluido a través de una tubería



Fuente: Jerson 2015

Aplicando la Ley de conservación de la energía entre los puntos (1) y (2)

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{con/sinDRA} \quad (9)$$

Para un ducto de líquidos ya instalado, y para un estado estable por lo general se conocen los valores de caudales y presiones en puntos clave del sistema, además de conocerse las

propiedades del fluido transportado y las características físicas del sistema (diámetro, rugosidad, altimetría). Por lo que la pérdida de carga con DRA se podría calcular reemplazando datos en la siguiente ecuación:

$$h_{conDRA} = \left( \frac{P_1}{\rho G} - \frac{P_2}{\rho G} \right) + \left( \frac{v_1^2}{\rho G} - \frac{v_2^2}{\rho G} \right) + (z_1 + z_2) \quad (10)$$

Al ser los reductores de fricción una de las principales opciones de aumento de capacidad, los caudales que se manejan no podrían ser posibles sin la adición de DRA es por eso que no se puede obtener  $h_{sin DRA}$  directamente de datos medidos. (Jerson, 2015)

En este caso se obtiene la pérdida de carga por fricción sin DRA mediante la utilización de la ecuación teórica de Darcy-Weisbach. Esta ecuación relaciona la pérdida de presión debido a la fricción a lo largo de una tubería con la velocidad media del flujo del fluido. (Jerson, 2015)

$$h_{sinDRA} = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (11)$$

Donde:

L: Longitud de la tubería (m)

v: Velocidad media del fluido (m/s)

D: Diámetro de tubería (m)

El factor de fricción debe se puede calcular mediante la siguiente correlación de Colebrook.

Una vez conocido los valores de pérdida de carga con y sin DRA, la reducción de fricción se puede calcular mediante la ecuación Ec. (7)

En la actualidad se han desarrollado varias correlaciones para calcular el factor de reducción de fricción. En la industria de hidrocarburos los más usados son las correlaciones Burger y Cónoco.

#### **2.1.9.2. Rendimiento de reductores de fricción**

Cuando se decide usar un tipo de reductor de fricción el fabricante debe proporcionar la reducción de fricción esperada para el sistema en el que se va a inyectar.

El rendimiento de los reductores de fricción se determina comparando el % de fricción esperado (línea base) y el % de reducción real calculado a partir de los datos medidos a una condición de transporte definida.

## 2.2. MARCO CONTEXTUAL

### 2.2.1. Descripción general del poliducto Sucre-Potosí

El poliducto PSP cumple la finalidad de transportar productos terminados de hidrocarburos como: Gas Licuado de Petróleo, Gasolina Especial y Diesel Oíl para abastecer la ciudad de Potosí y sus provincias (Uyuni, Betanzos, Atochas, etc.) cuenta con instalaciones previstas de equipos de bombeo que permiten vencer la diferencia de alturas.

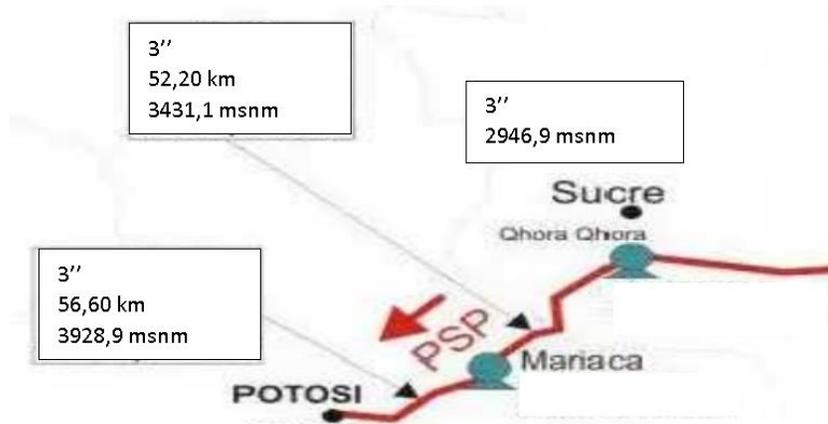
**Tabla 2: Descripción general del poliducto**

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| INICIO DE OPERACIÓN            | 1975                  |
| LONGITUD                       | 108,8 km              |
| NUMERO DE ESTACIONES DE BOMBEO | 2                     |
| DIAMETRO NOMINAL               | 0.0762 m              |
| DIAMETRO EXTERNO               | 0.0889 m              |
| ESPEJOR DE TUBERIA             | 0.0041 m              |
| PRESION DE OPERACIÓN           | 9411344 Pa            |
| CAPACIDAD NOMINAL              | 476 m <sup>3</sup> /d |
| DESPACHO DE PRODUCTOS PROMEDIO | 143 m <sup>3</sup> /d |
| CAPACIDAD OCUPADA              | 30%                   |
| ESPECIFICACION TUBERIA         | API-STD 5L            |

*Fuente: YPFB, Logística 2023*

Debido a la topografía, elevación, distancia y en general el trazo ascendente del PSP, además de la potencia instalada de los equipos de bombeo de la estación cabecera Qhora Qhora es que se cuenta con una estación intermedia de refuerzo, denominada Estación Mariaca.

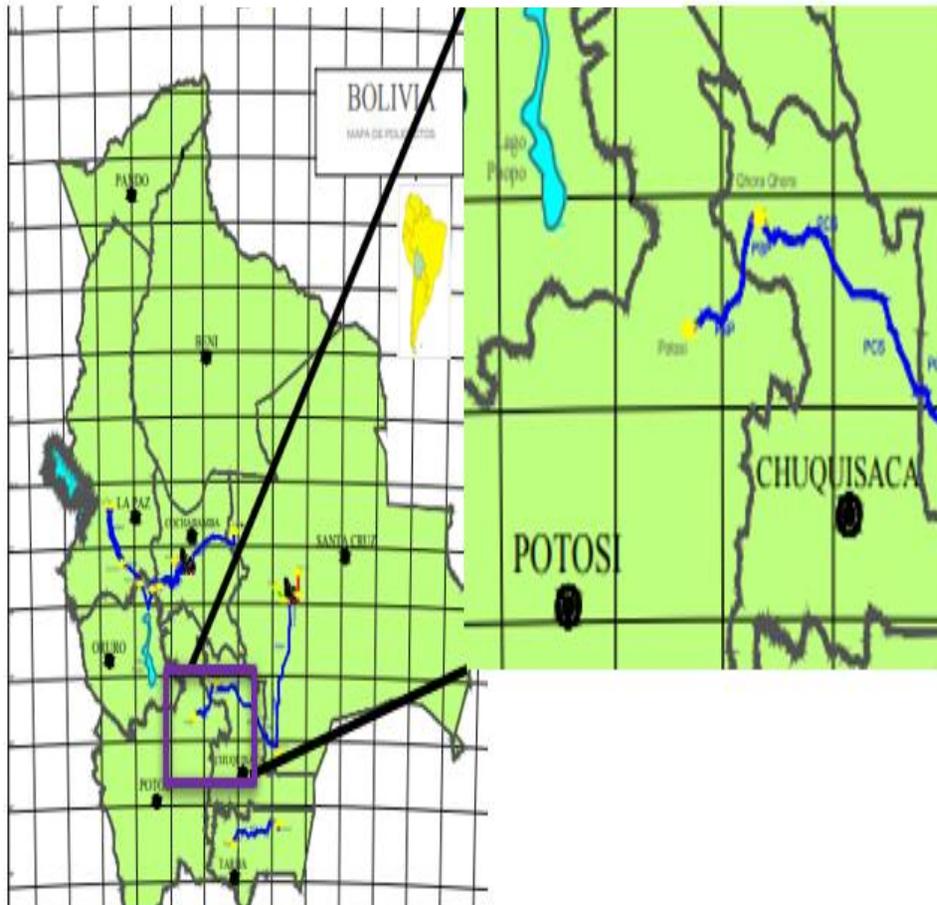
Gráfico 7: Ubicación de estaciones de bombeo



Fuente: Informe Hugo Toco 2014

## 2.2.2. Ubicación

Gráfico 8: Ubicación del poliducto



Fuente: ANH 2008

### 2.2.3. Estaciones de bombeo del poliducto PSP

#### 2.2.3.1. Estación Qhora Qhora

Originalmente se tenía como estación cabecera la Refinería Carlos Montenegro de Sucre. Actualmente la estación cabecera del poliducto es la Estación de Qhora Qhora, distancia a 7 km. de Sucre.

Gráfico 9: Estación Qhora Qhora



Fuente: Google Earth 2023

Una estación cabecera es una instalación industrial que se utiliza para almacenamiento y bombeo de hidrocarburos líquidos a través de un poliducto, están diseñadas para recibir, almacenar y bombear grandes volúmenes de hidrocarburos.

#### 2.2.3.2. Estación de Mariaca

Se encuentra ubicada aproximadamente a 15 km. al norte de Quivincha, primera sección de Betanzos, Esta estación no tiene tanques para consumo de Diesel Oíl. La operación es totalmente manual en coordinación operativa con la estación cabecera y terminal.

Gráfico 10: Estación de Mariaca



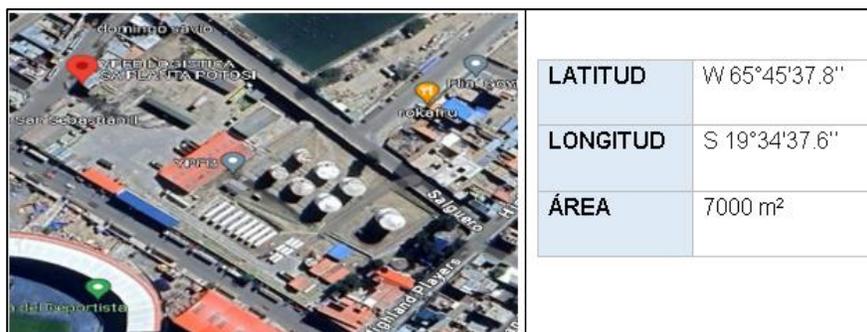
Fuente: Google Earth 2023

### 2.2.3.3. Planta Potosí

Se encuentra frente al Estadio Municipal de Potosí, Sección Capital, Provincia Tomas Frías, en el departamento de Potosí, es terminal del Poliducto PSP que recibe y almacena los diferentes productos en tanques de la Planta Potosí.

La operación de llegada de productos a Potosí como el control de presión del Poliducto, se hace en forma manual con una válvula de compuerta de 0.0762m.

Gráfico 11: Planta Potosí



Fuente: Google Earth 2023

### 2.2.4. Diagnóstico del poliducto

Potosí es una región importante para la economía boliviana, la necesidad de hidrocarburos líquidos para el desarrollo industrial es evidente ya que permite la producción de electricidad, transporte y maquinaria.

El desarrollo industrial de Potosí se verá limitado sin el acceso suficiente de hidrocarburo, por ello es importante implementar estrategias para la mejora del poliducto.

El poliducto PSP al tener tantos años de operación sin ninguna mejora y mantenimientos mínimos, se enfrenta a desafíos relacionados con la fricción, corrosión e incrustaciones, lo cual provoca:

- Aumento de presión
- Perdida de eficiencia
- Fallas estructurales

## 2.3. INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS

Se realizo el análisis para la Gasolina Especial y Diesel Oíl debido a que son los productos con más demanda en el transporte del poliducto PSP.

### 2.3.1. Curva característica de la bomba a máxima rpm

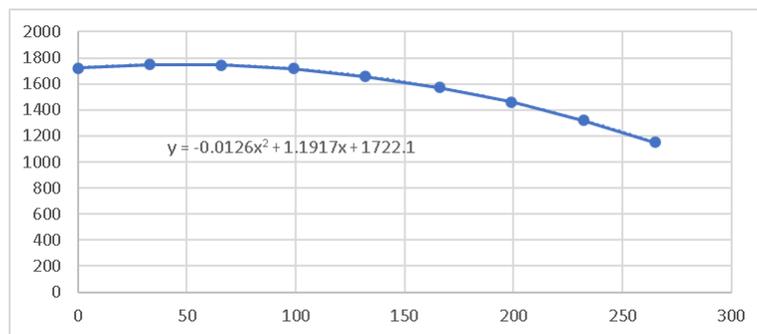
Las bombas en las dos estaciones de bombeo (EB1 y EB2) son idénticas, se muestra a continuación la curva característica:

**Tabla 3: Característica de la bomba a máxima rpm**

| Q(m <sup>3</sup> /hr) | H(m) |
|-----------------------|------|
| 0                     | 1722 |
| 33                    | 1748 |
| 66                    | 1746 |
| 99                    | 1716 |
| 132                   | 1658 |
| 166                   | 1573 |
| 199                   | 1460 |
| 232                   | 1319 |
| 265                   | 1151 |

*Fuente: YPFB, Logística 2017*

**Gráfico 12: Curva Característica de la bomba a máxima rpm**



*Fuente: Propia 2023*

Se realizo los ajustes de dicha curva con polinomios de segundo grado.

$$H = -0,0126Q^2 + 1,1917Q + 1722,1 \quad (12)$$

Donde:

H: Cabeza Hidráulica de bomba.

Q: Caudal de bombeo.

### 2.3.2. Cálculo de pérdidas de carga por fricción

Primero se analizará la situación actual del poliducto para poder realizar una comparación al implementar el agente reductor de fricción. Para ello se debe tener en cuenta que los reductores de fricción pierden la totalidad de su efecto al pasar por bombas centrifugas, por tanto, se tendrán dos puntos de inyección del DRA, cada uno a la salida de cada estación de bombeo.

**Tabla 4: Datos de las ubicaciones y alturas de las estaciones**

| ESTACION DE BOMBEO | UBICACIÓN (Km) | UBICACIÓN (m) | ALTURAS (m) |
|--------------------|----------------|---------------|-------------|
| EB1                | 0              | 0             | 395         |
| EB2                | 52.2           | 52200         | 1420        |
| POTOSI             | 56.6           | 56600         | 1850        |

Fuente: YPFB, Transporte 2008

Tramo 1: (EB1-EB2) Estación Qhora Qhora- Estación Mariaca

Tramo 2: (EB2-POTOSI) Estación Mariaca- Estación Potosí

#### 2.3.2.1. Análisis para la gasolina especial

**Tabla 5: Propiedades de la GE**

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| Q (m <sup>3</sup> /hr)      | 4.306  |
| Q (m <sup>3</sup> /s)       | 0.0012 |
| D (m)                       | 0.0762 |
| P <sub>SUCCION</sub> (Pa)   | 689476 |
| Vel (m/s)                   | 0.3352 |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 679.98 |
| $\mu$ (kg/m*s)              | 0.0018 |
| g (m/s <sup>2</sup> )       | 9.8    |

Fuente: YPFB, Logística 2017

La energía de presión inicial corresponde a la energía asociada a la presión de descarga de la estación EB1, se calcula usando la curva característica de la bomba y dato del caudal

$$H = -0.0126 * Q^2 + 1.1917 * Q + 1722.1 \quad (13)$$

$$H = -0.0126 * 4.306^2 + 1.1917 * 4.306 + 1722.1$$

$$H = 1726.99 \text{ m}$$

- Tramo 0: EB1-EB1

Realizamos el balance de energía para calcular la presión de descarga de la Gasolina Especial de la estación EB1

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{GE} \quad (14)$$

Las velocidades son las mismas por lo tanto se cancelan y las alturas están a un mismo nivel también se cancelan.

$$\frac{P_{dEB1}}{679.98 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} = \frac{689476 \text{ Pa}}{679.98 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} + 1726.99 \text{ m}$$

$$P_{dEB1} = 12197798.87 \text{ Pa}$$

La densidad, viscosidad, velocidad y diámetro interno serán constantes a lo largo de todo el tramo para el análisis de bombas se procede a calcular el número de Reynolds y Factor de Fricción valores que serán constantes:

$$Re_{GE} = \frac{Dv\rho}{\mu_L} \quad (15)$$

$$Re_{GE} = \frac{0.0762 \text{ m} * 0.3352 \frac{m}{s} * \frac{679.98kg}{m^3}}{0.0018 \frac{kg}{m} * s}$$

$$Re_{GE} = 9649.01$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_{GE}}} = -2\log \left( \frac{\frac{\epsilon}{D}}{3.71} + \frac{2.52}{Re\sqrt{f_{GE}}} \right) \quad (16)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_{GE}}} = -2\log \left( \frac{\frac{0,00001}{0,0762}}{3.71} + \frac{2.52}{9649.007 * \sqrt{f_{GE}}} \right)$$

$$f_{GE} = 0.03141$$

- Tramo 1: EB1-EB2

$$h_{sinDRA} = f_{GE} \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (17)$$

$$h_{sinDRA} = 0.0314 \frac{52200 \text{ m} * \left(0.3352 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 0.0762 \text{ m} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$h_{sinDRA} = 123.30 \text{ m}$$

Ahora procedemos a calcular la presión de succión con la que llegara EB2, con la presión de descarga de EB1 y la presión por fricción y conocidas las alturas z1 y z2.

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB2}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{sinDRA} \quad (18)$$

Debido a que el diámetro y espesor de la tubería no cambia, el termino de energía cinética se puede eliminar en ambos lados

$$\frac{12197798.87 \text{ Pa}}{679,98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 395 \text{ m} = \frac{P_{SEB2}}{679,98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1420 \text{ m} + 123,30 \text{ m}$$

$$P_{SEB2} = 4545752.74 \text{ Pa}$$

### 2.3.2.2. Análisis para Diesel Oil

**Tabla 6: Propiedades de DO**

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| Q (m <sup>3</sup> /hr)    | 5.789    |
| Q (m <sup>3</sup> /s)     | 0.001608 |
| D (m)                     | 0.0762   |
| P <sub>SUCCION</sub> (Pa) | 689476   |
| Vel (m/s)                 | 0.4359   |
| ρ (kg/m <sup>3</sup> )    | 831.99   |
| μ (kg/m*s)                | 0.0019   |
| g (m/s <sup>2</sup> )     | 9.8      |

Fuente: YPFB, Logística 2017

La presión de descarga de la estación EB1, se calcula usando la curva característica de la bomba y caudal de Dese

$$H = -0.0126 * Q^2 + 1.1917 * Q + 1722.1 \quad (19)$$

$$H = -0.0126 * 5.789^2 + 1.1917 * 5.789 + 1722.1$$

$$H = 1728.58 \text{ m}$$

- Tramo 0: EB1-EB1

Realizamos el balance de energía para calcular la presión de descarga de la estación EB1

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Do}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB1}}{\rho_{Do}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H \quad (20)$$

Las velocidades son las mismas por lo tanto se cancelan y las alturas están a un mismo nivel también se cancelan.

$$\frac{P_{dEB1}}{831.99 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} = \frac{689476 \text{ Pa}}{831.99 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} + 1728.58 \text{ m}$$

$$P_{dEB1} = 14797838.1 \text{ Pa}$$

Cálculo del número de Reynolds y Factor de fricción en Diesel Oíl

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu_L} \quad (21)$$

$$Re = \frac{0.0762 \text{ m} * 0.4359 \frac{m}{s} * 831.99 \frac{kg}{m^3}}{0.0019 \frac{kg}{m} * s}$$

$$Re = 14544.75$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.71D} + \frac{2.52}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (22)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{0.00001}{3.71 * 0.0762} + \frac{2.52}{14544.7528 * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0.02829$$

- Tramo 1: EB1-EB2

Calculamos la perdida de fricción del Diesel Oíl con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_{sinDRA} = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (23)$$

$$h_{sinDRA} = 0.02829 \frac{52200 \text{ m} * \left(0.4359 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 0.0762 \text{ m} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$h_{sinDRA} = 187.87 \text{ m}$$

Ahora procedemos a calcular la presión de succión con la que llegara EB2, con la presión de descarga de EB1 y la presión por fricción y conocidas las alturas z1y z2.

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB2}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{sinDRA} \quad (24)$$

Debido a que el diámetro y espesor de la tubería no cambia, el termino de energía cinética se puede eliminar en ambos lados

$$\frac{14797838.1 \text{ Pa}}{831.99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 395 \text{ m} = \frac{P_{SEB2}}{831.99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1420 \text{ m} + 187.87 \text{ m}$$

$$P_{SEB2} = 4908669.15 \text{ Pa}$$

### 2.3.3. Cálculo de pérdidas de carga por fricción con LP™100 Flow Improver

Se selecciono el agente reductor LP™100 Flow Improver debido a que cumple con las especificaciones necesarias para no dañar el poliducto ni alterar el hidrocarburo esto se ve en la ficha técnica del LP™100 Flow Improver que se ve en el Anexo “B”, es fácil de encontrar en el mercado y además que el sitio Petroleum Processing and Technology otorgó al agente reductor Liquid Power una calificación de 5 estrellas de 5.

Partiendo de la definición de que el efecto de los mejoradores de flujo en una tubería es la reducción de fricción entre la pared de la tubería y el flujo turbulento del hidrocarburo: para realizar cálculos que logren determinar en forma numérica la capacidad incremental de transporte en el ducto se considerara variable viscosidad que está directamente relacionada a la fricción, reduciendo la misma a un valor muy bajo cercano a cero.

Basándonos en la experiencia de pruebas empíricas con el agente se obtuvo:

- Un incremento de caudal que oscilaba entre un 25% a 40%.

- Un incremento de velocidad proporcional al caudal aumentado sin haber efectos secundarios en las propiedades de los fluidos.
- Una reducción notable de los valores de viscosidad.

Se realizará un aumento porcentual del caudal del 33% y una disminución de la viscosidad a valores cercanos a cero, basados a pruebas pasadas, que lograron eficacia en el incremento de caudales habiendo un mantenimiento en la energía de los equipos de operación.

### 2.3.3.1. Análisis para la gasolina especial con LP™100 Flow Improver

**Tabla 7: Propiedades de GE con DRA**

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| Q (m <sup>3</sup> /hr)    | 5.684     |
| Q (m <sup>3</sup> /s)     | 0.0015789 |
| D (m)                     | 0.0762    |
| P <sub>SUCCION</sub> (Pa) | 689476    |
| Vel (m/s)                 | 0.4425    |
| ρ (kg/m <sup>3</sup> )    | 679.98    |
| μ (kg/m*s)                | 9E-8      |
| g (m/s <sup>2</sup> )     | 9.81      |

*Fuente: Elaboración propia 2023*

Se procede a calcular el nuevo valor de la carga de cabeza hidráulica H, ya que se tiene un nuevo caudal.

$$H = -0.0126 * Q^2 + 1.1917 * Q + 1722.1 \quad (25)$$

$$H = -0.0126 * 5.684^2 + 1.1917 * 5.684 + 1722.1$$

$$H = 1728.47 \text{ m}$$

- Tramo 0: EB1-EB1

Realizamos el balance de energía con el DRA para calcular la presión de descarga de la estación EB1

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H \quad (26)$$

Las velocidades son las mismas por lo tanto se cancelan y las alturas están a un mismo nivel también se cancelan.

$$\frac{P_{dEB1}}{679.98 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} = \frac{689476 Pa}{679.98 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} + 1728.47 m$$

$$P_{dEB1} = 12207661.29 Pa$$

Para el análisis con DRA se procede a calcular Numero de Reynolds y Factor de Fricción con las constantes de densidad, viscosidad, velocidad y diámetro interno.

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu_L} \quad (27)$$

$$Re = \frac{0.0762 m * 0.4425 \frac{m}{s} * 679.98 \frac{kg}{m^3}}{0.00000009 \frac{kg}{m} * s}$$

$$Re = 254731478,34$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log \left( \frac{\frac{\epsilon}{D}}{3.71} + \frac{2.52}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (28)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log \left( \frac{\frac{0.00001}{0.0762}}{3.71} + \frac{2.52}{254731478.34 * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0.01262$$

- Tramo 1: EB1-EB2

$$h_{DRA} = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (29)$$

$$h_{DRA} = 0.0126 \frac{52200 m * \left(0.44246 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 0.0762 m * 9.8 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{DRA} = 86.21 m$$

Ahora procedemos a calcular la presión de succión con la que llegara EB2, con la presión de descarga de EB1 y la presión por fricción y conocidas las alturas z1y z2.

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB2}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{DRA} \quad (30)$$

Debido a que el diámetro y espesor de la tubería no cambia, el término de energía cinética se puede eliminar en ambos lados.

$$\frac{12207661.29 \text{ Pa}}{679.98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 395 \text{ m} = \frac{P_{SEB2}}{679.98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1420 \text{ m} + 86.21 \text{ m}$$

$$P_{SEB2} = 4802775.65 \text{ Pa}$$

### 2.3.3.2. Análisis para Diesel Óil con LP™100 Flow Improver

**Tabla 8: Propiedades de DO con DRA**

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| Q (m <sup>3</sup> /hr)               | 7.641    |
| Q (m <sup>3</sup> /s)                | 0,002122 |
| D (m)                                | 0.0762   |
| P <sub>SUCCION</sub> (Pa)            | 689476   |
| Vel (m/s)                            | 0.5754   |
| ρ <sub>Ge</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) | 831.99   |
| μ (kg/m*s)                           | 9E-8     |
| g (m/s <sup>2</sup> )                | 9.81     |

*Fuente: Elaboración propia 2023*

La energía de presión inicial corresponde a la energía asociada a la presión de descarga del Diesel Óil de la estación EB1, se calcula usando la curva característica de la bomba y caudal

$$H = -0.0126 * Q^2 + 1.1917 * Q + 1722.1 \quad (31)$$

$$H = -0.0126 * 7.641^2 + 1.1917 * 7.641 + 1722.1$$

$$H = 1730.47 \text{ m}$$

- Tramo 0: EB1-EB1

Realizamos el balance de energía para calcular la presión de descarga de Diesel Óil con DRA de la estación EB1

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Do}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB1}}{\rho_{Do}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H \quad (32)$$

Las velocidades son las mismas por lo tanto se cancelan y las alturas están a un mismo nivel también se cancelan.

$$\frac{P_{dEB1}}{831.99 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} = \frac{689476 Pa}{831.99 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}} + 1730.47 m$$

$$P_{dEB1} = 14813263.94 Pa$$

Como el nuevo valor de viscosidad, velocidad y valores ya conocidos de densidad y diámetro interno serán constantes en el análisis de DRA, se procede calcular Número de Reynold y Factor de Fricción

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu_L} \quad (33)$$

$$Re = \frac{0.0762m * 0.5754 \frac{m}{s} * 831.99 \frac{kg}{m^3}}{0.00000009 \frac{kg}{m} * s}$$

$$Re = 405315188.098$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\frac{\epsilon}{D}}{3.71} + \frac{2.52}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (34)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\frac{0,00001}{0,0762}}{3.71} + \frac{2.52}{405315188,098 * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0.01$$

- Tramo 1: EB1-EB2

$$h_{DRA} = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (35)$$

$$h_{DRA} = 0,01 \frac{52200 m * \left(0,5754 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 0,0762 m * 9,8 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{DRA} = 115.71 m$$

Ahora procedemos a calcular la presión de succión con la que llegara EB2, con la presión de descarga de EB1 y la presión por fricción y conocidas las alturas z1y z2.

$$\frac{P_{dEB1}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{SEB2}}{\rho_{Ge}g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{DRA} \quad (36)$$

Debido a que el diámetro y espesor de la tubería no cambia, el termino de energía cinética se puede eliminar en ambos lados

$$\frac{14813263.94 \text{ Pa}}{831.99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 395 \text{ m} = \frac{P_{SEB2}}{831.99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1420 \text{ m} + 115.71 \text{ m}$$

$$P_{SEB2} = 5512482.67 \text{ Pa}$$

#### 2.3.4. Concentración de LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver

Para realizar el cálculo de las concentraciones, se determinará el porcentaje de reducción de fricción:

$$F = \left[ \frac{(h_{sinDRA} - h_{DRA})}{h_{sinDRA}} \right] * 100 \quad (37)$$

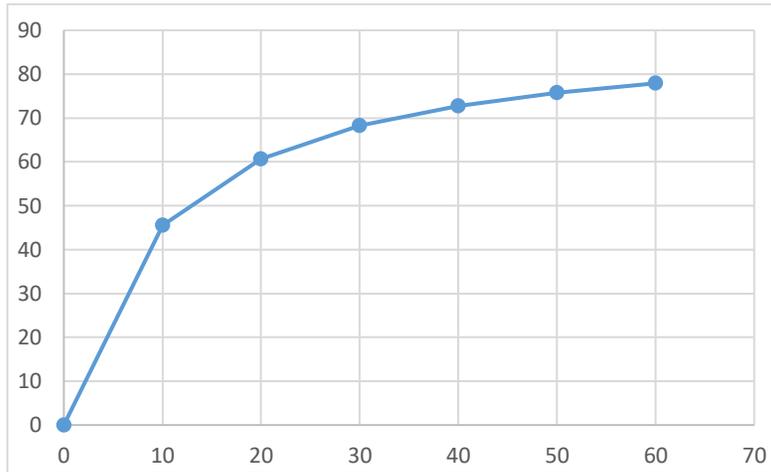
También se necesita calcular el rendimiento del agente reductor LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver, los datos se sacarán de la gráfica de rendimiento de reductor LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver Anexo "C".

**Tabla 9: Rendimiento de reductor de fricción**

| DRA (ppm) | REDUCCION DE FRICCION (%) |
|-----------|---------------------------|
| 0         | 0                         |
| 10        | 45.5                      |
| 20        | 60.6                      |
| 30        | 68.2                      |
| 40        | 72.7                      |
| 50        | 75.8                      |
| 60        | 77.9                      |

*Fuente: Elaborado con la gráfica de rendimiento de LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver*

**Gráfico 13: Concentración LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver**



Fuente: Elaboración propia 2023

$$\%F = 0.2203 + 6.4858 * ppm - 0.2451 * ppm^2 + 0.0043 * ppm^3 - 3E - 05 * ppm^4 \quad (38)$$

#### 2.3.4.1. Concentración de LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver en gasolina especial

$$\%F = \left[ \frac{(h_{sinDRA} - h_{DRA})}{h_{sinDRA}} \right] * 100 \quad (39)$$

$$\%F = \left[ \frac{(123.3 - 86.21)}{123.3} \right] * 100$$

$$F = 30.08$$

$$\%F = 0.2203 + 6.4858 * Ppm - 0.2451 * Ppm^2 + 0.0043 * Ppm^3 - 3E - 05 * Ppm^4 \quad (40)$$

$$30.08 = 0.2203 + 6.4858 * Ppm - 0.2451 * Ppm^2 + 0.0043 * Ppm^3 - 3E - 05 * Ppm^4$$

$$Ppm = 5.72 \frac{mg}{lt}$$

Se necesita 5.72 ppm para aumentar el caudal de Gasolina Especial en 33% y tener una reducción de fricción de un 30.07% en ambos tramos.

#### 2.3.4.2. Concentración de LP<sup>TM</sup> Flow Improver en Diesel Oíl

$$\%F = \left[ \frac{(h_{sinDRA} - h_{DRA})}{h_{sinDRA}} \right] * 100 \quad (41)$$

$$\%F = \left[ \frac{(187.87 - 115.71)}{187.87} \right] * 100$$

$$F = 38.41$$

$$\%F = 0.2203 + 6.4858 * Ppm - 0.2451 * Ppm^2 + 0.0043 * Ppm^3 - 3E - 05 * Ppm^4 \quad (42)$$

$$38.41 = 0.2203 + 6.4858 * Ppm - 0.2451 * Ppm^2 + 0.0043 * Ppm^3 - 3E - 05 * Ppm^4$$

$$Ppm = 7.97 \frac{mg}{lt}$$

Se necesita 7.97 ppm para aumentar el caudal de Diesel Óil en 33% y tener una reducción de fricción de un 38.41 % en ambos tramos.

### 2.3.5. Tabla de resultados

**Tabla 10: Resultados**

|                              |       | Q (m <sup>3</sup> /hr) | H (m)  | Q (m <sup>3</sup> /hr) | H (m)  |
|------------------------------|-------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| SIN<br>INYECCION<br>DE DRA's | EB1   | 4,306                  | 123.30 | 5.789                  | 187.87 |
|                              | EB2   | 4,306                  | 133.7  | 5.789                  | 203.71 |
|                              | TOTAL | 4,306                  | 257    | 5.789                  | 391.58 |
| CON<br>INYECCION<br>DE DRA's | EB1   | 5.684                  | 86.21  | 7.641                  | 115.71 |
|                              | EB2   | 5.684                  | 93.48  | 7.641                  | 125.47 |
|                              | TOTAL | 5.684                  | 179.69 | 7.641                  | 241.18 |

*Fuente: Elaboración propia 2023*

Se realizo los cálculos de la Gasolina Especial y Diesel Óil para la comparación actual con la inyección de LP<sup>tm</sup>100 Flow Improver para los dos tramos y se observa que existe perdidas de fricción menores las cuales permiten que los fluidos transportados lleguen a la siguiente estación sin dilema alguno lo que tiene un impacto significativo en el rendimiento.

## 2.3.6. Estimación de costos

### 2.3.6.1. Costos de inversión

La inversión estimada para la realización de la inyección del aditivo reductor LP<sup>tm</sup>100 Flow Improver para el incremento de caudal en el poliducto PSP comprende:

**Tabla 11: Costos de inversión**

| N° | DESCRIPCION  | UNIDAD | CANTIDAD | IMPORTE<br>(Bs) | TOTAL<br>(Bs) |
|----|--|--------|----------|-----------------|---------------|
| 1  | Movilización de equipo, herramientas y personal        | Global | 2        | 20000           | 40000         |
| 2  | Instalación de faenas                                  |        | 2        | 7000            | 14000         |
| 3  | Calibración de equipos y válvulas                      | Global | 2        | 17000           | 34000         |
| 4  | Accesorios de mangueras flexibles                      | Global | 2        | 13940           | 27880         |
| 5  | Bomba de engranajes                                    | Global | 2        | 55760           | 111520        |
| 6  | Bomba de pistón de caudal variable                     | Global | 2        | 41820           | 83640         |
| 7  | Medidor Coriolis                                       | Global | 2        | 20910           | 41820         |
| 8  | Ingeniería a detalle, seguridad industrial y licencias | Global | 2        | 35000           | 70000         |
|    |  |        |          |                 | 322860        |

*Fuente: YPFB, Logística 2017*

### 2.3.6.2. Costos de operación

#### a) Análisis económico antes de la ejecución del proyecto

Son los gastos que están relacionados con la operación, como se puede observar estos costos de operación fueron estimados para un periodo de 22 días de trabajo por mes.

**Tabla 12: Análisis económico antes de la ejecución del proyecto**

| N° | CONCEPTO   | INVERSION<br>(Bs) |
|----|--|-------------------|
| 1  | Sueldos y mano de obra (beneficios sociales e impuestos al valor agregado) | 35000             |
| 2  | EPP  | 1000              |
| 3  | Mantenimiento y operación de las estaciones de bombeo                      | 7000              |
| 4  | Seguridad Industrial y pólizas   | 2100              |
| 5  | Impuestos (3.00% de (1+3+4))   | 1325              |
|    |  | 46425             |

*Fuente: YPFB, Logística 2017*

#### b) Análisis económico después de la ejecución del proyecto

Luego de la inyección del agente reductor de fricción LP<sup>TM</sup>100 Flow Improver se reestructura el costo.

**Tabla 13: Análisis económico después de la ejecución del proyecto**

| N° | CONCEPTO   | INVERSION<br>(Bs) |
|----|--|-------------------|
| 1  | Sueldos y mano de obra (beneficios sociales e impuestos al valor agregado) | 35000             |
| 2  | EPP  | 1000              |
| 3  | Suministro de DRA (67Bs/lt)  | 17286             |
| 4  | Mantenimiento y operación de las estaciones de bombeo                      | 7000              |
| 5  | Seguridad Industrial y pólizas   | 2100              |
| 6  | Impuestos (3.00% de (1+3+4+5))   | 1325              |
|    |  | 63711             |

*Fuente: YPFB, Logística 2017*

## **2.4. ANALISIS Y DISCUSIÓN**

### **Análisis**

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede ver que gracias al agente reductor existe perdidas de fricción en el poliducto de 30.08% en GE y de 38.41% en DO, lo cual permite el incremento de caudal y así poder cumplir la demanda en Potosí.

Obtener un incremento de más de 30 % ayuda a los operadores a cumplir con los plazos de entrega, este porcentaje representa un ahorro de transporte debido a que no se necesitara el uso de transporte virtual.

Debemos tener en cuenta que con la inyección del agente reductor ayuda a prevenir obstrucciones, corrosión y de ese modo tener menos interrupciones en el transporte, esta alternativa de incrementación de caudal debería ser evaluada en todos los poliductos bolivianos gracias a sus beneficios.

El costo para el procedimiento de inyección de agente reductor es de Bs322860 y el aumento en costos para la operación ese mes son de Bs17286 que serán recuperables con la venta del hidrocarburo, el ahorro de energía para bombear, el transporte virtual, mantenimientos del poliducto, etc.

### **Discusión**

YPFB Logística en su informe técnico de aplicación de mejoradores de flujo en poliductos, llevo a la conclusión que es la mejor alternativa económica.

En antecedentes podemos ver que en distintas partes del mundo el agente reductor de fricción es la alternativa más apropiada para el incremento de caudal ya que no interrumpe los tiempos de entrega ni modifica el diseño inicial del poliducto.

La inyección de un agente reductor en el campo hidrocarburifero trajo beneficios en su aplicación obteniendo incrementos hasta del 74% como en Chile y también demostrando que muchos prefieren esta alternativa que además de positiva es económica y fácil de encontrar en el mercado ya que existe una gran variedad de marcas que cumplen distintas especificaciones.

Los agentes reductores de fricción no solo se utilizan en la industria hidrocarburifera, sino también en industrias de agua y alimentos y obteniendo en buenos resultados y reseñas.

## **2.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

- Se realizó un diagnóstico del poliducto PSP tramo Sucre-Potosí, obteniendo información actual del poliducto en el que se denota que solo trabaja con el 30 % de su capacidad. De igual manera se obtuvo los datos de las propiedades del Diesel Oíl y del Gas Especial que son sus hidrocarburos con más demanda en el parque automotriz.
- Se elaboró el análisis teórico de los diferentes agentes reductores de fricción seleccionando LP™ Flow Improver que es un polímero que cumple las especificaciones técnicas para que no dañen al fluido.
- Se realizaron los cálculos necesarios para demostrar el incremento de caudal en el poliducto PSP. Se obtuvieron resultados satisfactorios demostrando que aplicar agentes reductores de fricción si es una alternativa fiable.
- El análisis económico nos demuestra que la inyección del agente reductor de fricción no necesita de mucho capital debido a que los costos de inversión y de operación no son extensas ni de tiempos indeterminados en comparación de otras alternativas para el incremento de caudal.

### **Recomendaciones**

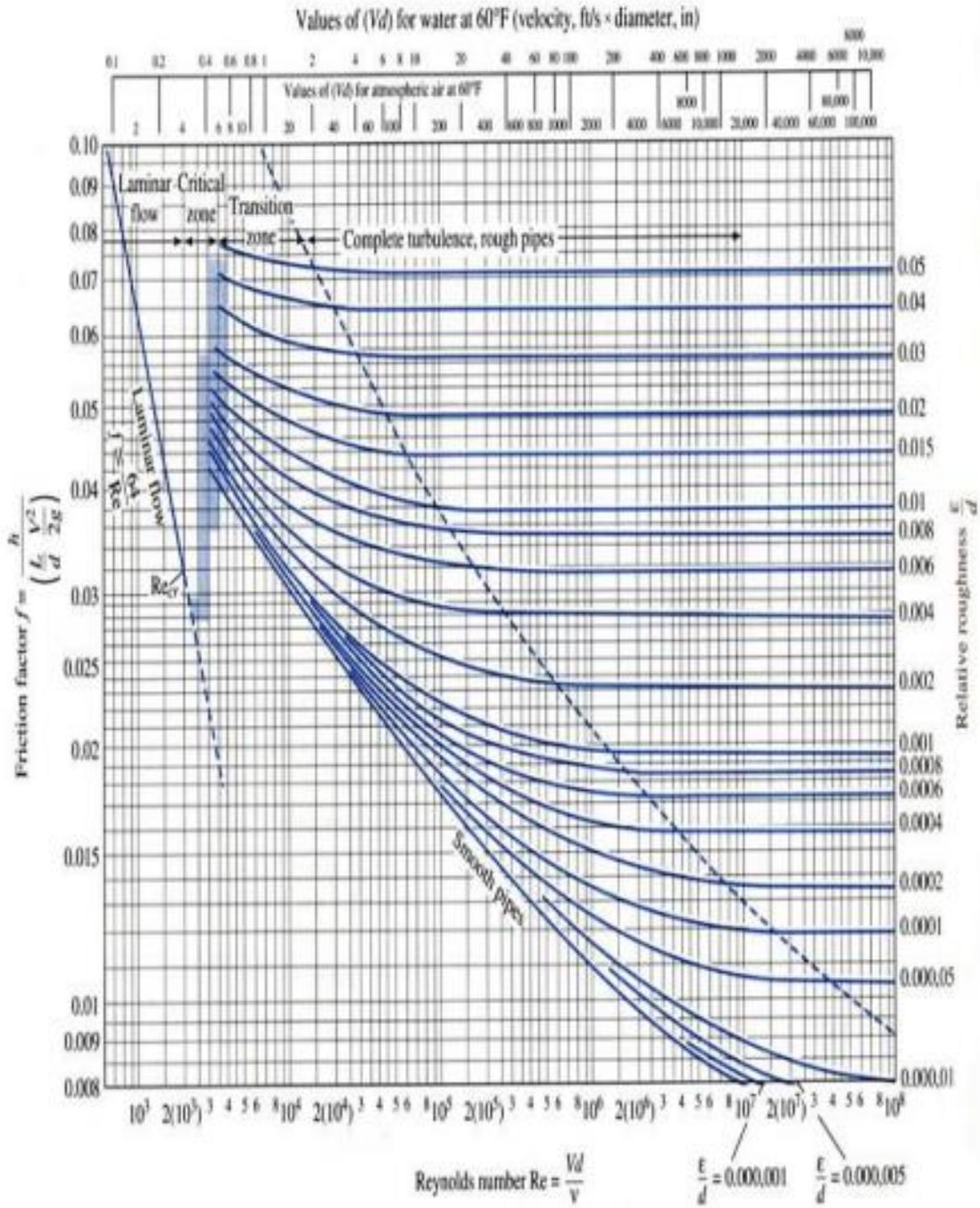
- Se recomienda que los sistemas de control para la inyección de DRA sean adecuados para que puedan trabajar en forma paralela en las dos estaciones.
- Se recomienda escoger bien el agente reductor para que el poliducto y el fluido no sufran cambios.
- Se recomienda que las estaciones de los ductos tengan un lazo de comunicación y control entre las diferentes estaciones de bombeo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Rodas Alarcón, J. (2015). Optimización energética en la ampliación de capacidad de un sistema de transporte de líquidos de gas natural. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Martínez, H., & Fabián, H. (2020). ANÁLISIS DEL USO DE AGENTES REDUCTORES DE FRICCIÓN EN EL TRANSPORTE DE CRUDO POR EL OLEODUCTO DE LOS LLANOS ORIENTALES S.A. TRAMO RUBIALES-MONTERREY-CUSIANA. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/4766>
- Ramírez, C., & Marcelo, J. (2022). Diseño y cálculo del loop del PCS para ampliar la capacidad de transporte del poliducto Camiri – Sucre (PCS).
- Bolivia, E.P. (22 de junio de 2019). Agencia Nacional de Hidrocarburos. Obtenido de Agencia Nacional de Hidrocarburos: <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=12>
- Abdou, H. (2013). Case study in deducing pump discharge pressures with applied methods for maximizing throughput of a strategic crude oil pipeline. Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels
- Ortiz, J. (2004). Reducción en el arrastre y sus aplicaciones industriales. México: Instituto nacional de investigaciones nucleares.
- Romeo, E. (2002). Cálculo del factor de fricción en tuberías. Zaragoza. Dpto. de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza.
- YPFB Transporte S.A. Términos y condiciones generales del servicio de transporte de hidrocarburos por el sistema de poliductos de YPFB Transporte S.A. <https://www.yxfbtransporte.com.bo/wp-content/uploads/2020/06/TCGS-Poliductos.pdf>
- YPFB. Transporte S.A. ANEXO “C” (2022)
- YPFB. Logística (2023). Gestión Operativa obtenido de: <https://www.yfblogistica.com.bo/index.php/operaciones/gestion-operativa>

# ANEXOS

## ANEXO "A": DIAGRAMA MOODY





## HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

# LP™ 100

Para petróleo crudo

### Antecedentes

El LP.100 Flow Improver es parte de la línea de ConocoPhillips Specialty Products Inc. que brindan tecnología superior e innovadora para mejorar las condiciones de flujo. Este producto pionero en estado suspendido, es la respuesta para mejorar las condiciones de circulación en oleoductos de petróleos crudos.

### Characteristics

El LP.100 Flow Improver es una suspensión acuosa. Posee óptimas características como reductor de fricción en muchas aplicaciones en oleoductos. El LP.100 Flow Improver puede reducir en más del 80% la fricción. Esto permite a las empresas tomar decisiones estratégicas para disminuir los costos operativos de oleoductos, incrementar la producción, reducir la presión de línea o incluso omitir estaciones intermedias de bombes.

Se disuelve en el fluido que circula sin formar un revestimiento en la superficie interna del oleoducto. Aumenta el caudal de producción y al mismo tiempo reduce la corrosión interna.

La tecnología de polímeros utilizada por ConocoPhillips permite liberar más polímeros activos por unidad de volumen del producto tratado y mejora el proceso de disolución. El polímero utilizado tiene excelente afinidad con los hidrocarburos y genera una notable reducción de la fricción bajo distintas condiciones de servicio. También tiene una extraordinaria propiedad de resistencia a las fuerzas de cese.

### Manipulación del producto

El LP.100 Flow Improver es fácil de manejar, almacenar y limpiar. Es inofensivo para el medio ambiente y no es inflamable. Fluye fácilmente y no necesita almacenarse en tanques presurizados con nitrógeno.

Véase al dorso las propiedades del producto.

### Beneficios

#### Rendimiento extraordinario

- Más del 80% de reducción de la fricción
- Permite aumentar los caudales con la misma presión de bombes
- Mantiene el valor del flujo al tiempo que reduce la presión de línea
- Permite omitir la intervención de estaciones intermedias de bombes

#### Tecnología superior

- Eleva la capacidad de transporte del oleoducto sin necesidad de inversiones de capital
- Se necesita menos volumen de polímeros para obtener los mismos resultados
- Menos cantidad de inyección que otros reductores de fricción
- Mayor velocidad de disolución que otros reductores de fricción
- Reduce en un 40% de la corrosión interna del oleoducto
- Disminuye las pérdidas por disipación de calor del crudo



La curva de rendimiento muestra el rango de rendimientos en el cual opera el LP™ 100 Flow Improver en función del tipo de oleoducto y las condiciones del crudo.

Comuníquese con nosotros en [www.LiquidPower.com](http://www.LiquidPower.com)

El logotipo de LiquidPower y todos los productos con los símbolos de ™ o ® son marcas registradas de ConocoPhillips o de sus subsidiarias.



# LP 100

## PROPIEDADES DEL PRODUCTO

| PROPIEDADES GENERALES  |  |
|--|--|
| Uso destinado  | Con petróleo crudo   |
| Tipo de mejorador de flujo   | En estado suspendido   |
| Medio portador/solvente  | Agua   |
| RENDIMIENTO  |  |
| Máxima reducción de la fricción  | Mayor del 80%  |
| Concentración típica   | 10 a 50 ppm  |
| PROPIEDADES TÍPICAS  |  |
| Color  | Blanco   |
| Densidad   | 8 libras/galón (0.96 g/cm <sup>3</sup> )   |
| Punto de inflamación   | No corresponde   |
| Viscosidad   | 350 cP a 511" (No newtoniano)  |
| Punto de congelamiento   | 32 °F (0 °C)   |
| Punto de ebullición  | 212 °F (100 °C)  |
| Presión de vapor   | 0.95 libras/pulg. <sup>2</sup> (24 mm de Hg a 25 °C)                               |
| MANIPULACIÓN   |  |
| Rango de temperatura de servicio   | 32 °F a 110 °F (0 °C a 43.3 °C)  |
| Estabilidad del producto   | Estable en suspensión<br>Se recomienda agitación intermitente                      |
| Presión  | No necesita recipientes presurizados ni presurización con nitrógeno                |
| Calentamiento  | Se ofrece control climático ambiental  |
| EQUIPOS DE INYECCIÓN   |  |
| Bombas   | Hay varios tipos de bombas para distintas dosificaciones y condiciones de servicio |
| Rango de caudal  | 5 a 2500 galones/día (20 a 9500 litros/día)  |
| Caudalímetro   | De masa (Coriolis)   |
| Automatización   | Disponible   |
| SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE (Véase la Hoja de Datos de Seguridad de Materiales) |  |
| Seguridad  | No peligroso; no inflamable  |
| Salud  | Baja toxicidad. Equipos convencionales de protección                               |
| Medio ambiente   | Toxicidad acuática muy baja  |

Los datos presentados son el resultado de pruebas y experimentos que ConocoPhillips considera fiables, y se brindan únicamente con propósitos informativos. ConocoPhillips no acepta ninguna responsabilidad civil por daños o lesiones derivadas del uso de los datos aquí contenidos y tampoco de dichos datos constituir una garantía ni una representación de garantía (incluida respecto de responsabilidad civil) efectuada con respecto por parte de ConocoPhillips sobre los productos que se distribuyen al saber el uso de los mismos para propósitos particulares, excepto de los propósitos aquí expresados por ConocoPhillips.

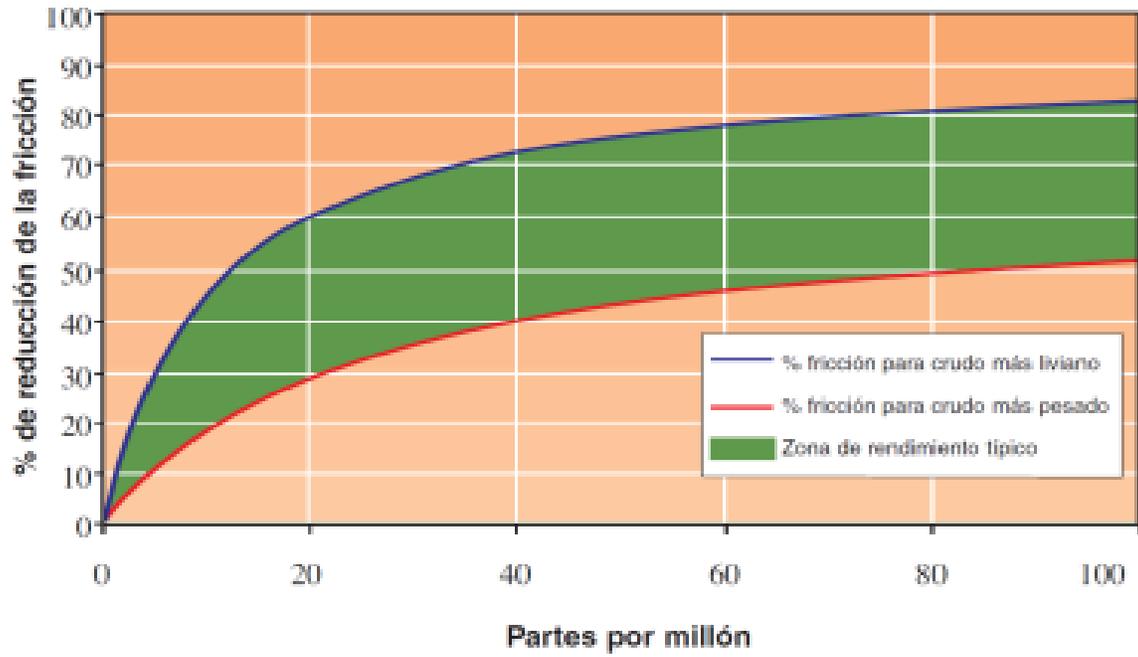
Norteamérica  
Latinoamérica  
P.O. Box 2197  
Houston, TX 77252-2197  
EE.UU.  
Teléfono: +1.832.486.2834  
+1.800.897.2774 (en EE.UU., sin cargo)  
Fax: +1.832.486.2881

Europa, Oriente Medio, África,  
Asia y Oceanía  
Medialaan 50  
1800 Vilvoorde  
Bruselas  
Bélgica  
Teléfono: +32.2.263.0520  
Fax: +32.2.267.5176

Rusia y CIS  
1st Bratskaya str. 29, 8th Floor  
Moscu, Rusia 125047  
Teléfono: +7.095.785.2859  
Fax: +7.095.785.2803

ConocoPhillips

ANEXO "C": GRAFICA DE RENDIMIENTO DEL LP™ 100 FLOW IMPROVER



ANEXO "D": OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE CARBURANTES PARA POLIDUCTOS.

|   |  |            |                          |
|---|--|------------|--------------------------|
| <br><b>Transporte S.A.</b> | <b>Procedimiento</b><br><b>"Operación del Sistema de Transporte de Carburantes por Poliductos"</b> |            |                          |
|   | PO.049   | Revisión 1 | Válido desde: 28.11.2018 |

| Tabla de Ediciones |            |  |
|--------------------|------------|--|
| Revisión           | Fecha      | Motivo de la Revisión  |
| 0                  | 27.09.2017 |  |
| 1                  | 28.11.2018 | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cambio de denominación de cargos de acuerdo a la estructura organizacional vigente.</li> <li>➤ Redefinición en la sección "2. Desarrollo" de este documento, para reflejar la implementación "ERP-SAP S/4HANA" que impacta a este procedimiento.</li> <li>➤ Modificación de los formularios:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- FO.305 Parte Diario de Transporte [Nombre del Poliducto]</li> <li>- FO.306 Parte Nacional Diario Poliductos.</li> </ul> </li> <li>➤ Revisión y modificación de los Anexos:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anexo 2: Poliducto Santa Cruz – Camiri (PSZ-1)</li> <li>- Anexo 3: Poliductos Villamontes – Tarija (PVT)</li> <li>- Anexo 4: Poliducto Camiri – Sucre (PCS)</li> <li>- Anexo 5: Poliducto Sucre – Potosí (PSP)</li> <li>- Anexo 6: Poliducto Cochabamba – La Paz (PCOLP I) y Poliducto Cochabamba – Oruro (PCOLP II)</li> <li>- Anexo 7: Poliducto Cochabamba – Puerto Villarroel (PCPV)</li> </ul> </li> </ul> |

| ÍNDICE                              | PÁG. |
|-------------------------------------|------|
| 1. OBJETIVO Y ALCANCE.....          | 2    |
| 2. DESARROLLO.....                  | 2    |
| 3. REGISTROS DE CALIDAD .....       | 30   |
| 4. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA ..... | 30   |

ANEXO "E" APLICACIÓN DE MEJORADORES DE FLUJO EN POLIDUCTOS DE YPFB LOGISTICA S.A

|   |  |   |   |              |
|---|--|---|---|--------------|
|    | <b>INFORME TÉCNICO</b>                                   |   | Emisión: 09-2017<br>Revisión: 0<br>Página: 1 de 22<br>Elaborado: GING |              |
|   | <b>REFERENCIA</b>  | <b>APLIACION DE MEJORADORES DE FLUJO EN<br/>POLIDUCTOS DE YPFB LOGISTICA SA</b> |   |              |
|   | <b>CÓDIGO</b>  | <b>YPFBL-GING-OFC-INF-0005/2017</b>   |   |              |
| <p><b>Informe Técnico</b></p> <p><b>APLICACIÓN DE MEJORADORES DE FLUJO EN<br/>POLIDUCTOS DE YPFB LOGISTICA S.A.</b></p> <p>YPFBL-GING-OFC-INF-0005/2017<br/>                 GERENCIA DE INGENIERÍA Y PROYECTOS</p> |  |   |   |              |
| <b>ACCIÓN</b>   | <b>NOMBRE</b>  | <b>CARGO</b>  | <b>FECHA</b>  | <b>FIRMA</b> |
| Elaborado   | Charles <del>Chavez</del> Cardozo Oscar<br>Salazar Durán | INGENIERO DE PLANIFICACIÓN Y PROYECTOS<br>GERENTE<br>DE INGENIERIA Y PROYECTOS  | Mar - 2017  |              |