



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**USO DE QUIMICOS MEJORADORES DE FLUJO Y SIMULACION
NUMÉRICA PARA OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE
COMBUSTIBLES EN EL POLIDUCTO LIBERTAD-MANTA**

AUTOR

Gavino González Geovanny Artemio

**TRABAJO DE TITULACIÓN EN MODALIDAD DE INFORME DE
INVESTIGACIÓN**

**Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN PETRÓLEOS**

TUTOR

PhD. Salcedo Arciniega Marco

La Libertad, Ecuador

Año 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**PhD. Álvarez Acosta Roxana
COORDINADORA(E) DEL
PROGRAMA**

**PhD. Salcedo Arciniega Marco
TUTOR**

**PhD. Ordoñez Andrade Jorge
DOCENTE ESPECIALISTA 1**

**Mgtr. Portilla Lazo Carlos
DOCENTE ESPECIALISTA 2**

**Ab. Rivera González María, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por GEOVANNY ARTEMIO GAVINO GONZÁLEZ, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Petróleos.

TUTOR

PhD. Salcedo Arciniega Marco

13 días del mes de marzo del año 2026



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, GEOVANNY ARTEMIO GAVINO GONZÁLEZ

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, USO DE QUIMICOS MEJORADORES DE FLUJO Y SIMULACION NUMERICA PARA OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES EN EL POLIDUCTO LIBERTAD-MANTA, previo a la obtención del título en Magíster en Petróleos, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 13 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR


Geovanny Gavino González



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado USO DE QUIMICOS MEJORADORES DE FLUJO Y SIMULACION NUMERICA PARA OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES EN EL POLIDUCTO LIBERTAD-MANTA, presentado por el estudiante, GEOVANNY ARTEMIO GAVINO GONZÁLEZ fue enviado al Sistema Antiplagio URKUND, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 8%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

**FORMATO INFORME DE INVESTIGACION
GEOVANNY GAVINO - ANTIPLAGIO_1**

8%
Textos sospechosos

- 5% Similitudes
0% similitudes entre comillas
0% entre las fuentes mencionadas
- 4% Idiomas no reconocidos
- 4% Textos potencialmente generados por IA (ignorado)

Nombre del documento: FORMATO INFORME DE INVESTIGACION GEOVANNY GAVINO - ANTIPLAGIO_1.docx
ID del documento: cca885485e3e8849377c3a500365972e2eff696
Tamaño del documento original: 216.92 kB

Depositante: Marco Antonio Salcedo Arciniega
Fecha de depósito: 11/1/2026
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 11/1/2026

Número de palabras: 9404
Número de caracteres: 61.814

TUTOR

PhD. Salcedo Arciniega Marco



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, GEOVANNY ARTEMIO GAVINO GONZÁLEZ

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de artículo profesional de alto nivel con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

La Libertad, a los 13 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR

Geovanny Artemio Gavino González

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento al Dr. Marco Antonio Salcedo Arciniega, tutor de esta tesis, por su guía, compromiso y confianza depositada en mí a lo largo de este proceso académico.

Agradezco especialmente a la Agencia de Regulación y Control de Hidrocarburos (ARCH), por permitirme desarrollar mi labor profesional en un entorno que fomenta el aprendizaje constante.

Universidad Estatal Península de Santa Elena y al Cuerpo Docente de Postgrado, gracias por su dedicación, conocimientos y acompañamiento.

Finalmente, a mis amigos, compañeros, colegas y a quien creyó en mí, que iniciaron y formaron parte de este camino, gracias por su apoyo, consejos y valiosos aportes.

¡¡Que no debo rendirme ni mirar relojes!! Que cuando llegue el momento llegará.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

Geovanny Artemio, Gavino González

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con amor y gratitud a mi esposa Jessica, por su apoyo incondicional, su paciencia y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí y caminar conmigo en este largo camino.

A mis hijos, Gabriela, Gabriel y Victoria, por ser mi mayor fuente de inspiración y motivación. Este logro también es suyo.

A mis padres, Artemio y Dolores, por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad. Su ejemplo ha sido mi guía.

Y a todos aquellos que, de una u otra forma, hicieron posible este sueño.

Geovanny Artemio, Gavino González

ÍNDICE GENERAL

TITULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN	2
Planteamiento de la investigación.....	3
Formulación del problema de investigación	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
Planteamiento hipotético.....	4
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Revisión de literatura	5
1.2. Principios de Funcionamiento.....	7
1.3. Características de los Agentes Reductores de Fricción.....	8
1.4. Aplicaciones y Resultados	9
1.5. Limitaciones y consideraciones	10

1.6. Descripción del poliducto Libertad-Manta	10
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	14
2.1. Contexto de la investigación	14
2.2. Diseño y alcance de la investigación	14
2.3. Tipo y métodos de investigación.....	15
2.4. Población y muestra	16
2.4.1. Población de estudio	16
2.4.2. Muestra.....	16
2.4.3. Variables	17
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19
2.5.1 Técnicas de recolección de datos	19
2.5.2 Instrumentos de recolección de datos	20
2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.	21
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1. Ensayos de viscosidad.....	22
3.2. Resultados del modelo matemático y simulaciones numéricas.....	35
3.2.1. Modelo numérico para análisis de flujos en tuberías	35
3.2.2. Parámetros fijos de simulación del poliducto y operación.....	37
3.2.3. Parámetros de Propiedades de Fluidos.....	38
3.2.4. Parámetros Económicos y de Eficiencia	38
3.2.5. Ecuaciones para el Cálculo	39
3.2.6. Mejoradores Químicos o Agente Reductores de Arrastre.....	44
3.2.7. Validación de estadística del efecto del DRA mediante ANOVA	48
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de bombeo del Poliducto Libertad-Manta.....	12
Tabla 2. <i>Características generales del Poliducto Libertad-Manta.....</i>	12
Tabla 3. <i>Capacidad de almacenamiento Estación Cabecera La Libertad.....</i>	13
Tabla 4. <i>Capacidad de almacenamiento Estación Cabecera La Libertad.....</i>	23
Tabla 5. <i>Capacidad de almacenamiento Estación Cabecera La Libertad.....</i>	24
Tabla 6. <i>Capacidad de almacenamiento Estación Cabecera La Libertad.....</i>	28
Tabla 7. <i>Capacidad de almacenamiento Estación Cabecera La Libertad.....</i>	29
Tabla 8. <i>Capacidad de almacenamiento Estación Cabecera La Libertad.....</i>	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicación de reductores de fricción en línea. Fuente: www.apollo.mx (consultado en agosto de 2025)	7
Figura 2. Estación Cabecera del Poliducto Libertad-Manta. Fuente: www.coeltec.com.ec (2025).....	11
Figura 3. Gráfica de Viscosidad Vs Temperatura ensayo 1 diésel	26
Figura 4. Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 1 diésel.....	27
Figura 5. Gráfica Viscosidad Vs Temperatura ensayo 2 diésel.....	27
Figura 6. Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 2 diésel.....	28
Figura 7 Gráfica Viscosidad Vs Temperatura ensayo 1 Jetfuel	30
Figura 8.	31
Figura 9. Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 1 Jetfuel.	31
Figura 10. Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 2 Jetfuel.	32
Figura 11. Gráfica Viscosidad Vs Temperatura ensayo gasolina.....	34
Figura 12. Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo gasolina.....	34
Figura 13. Resultados de la simulación hidráulica del poliducto Libertad–Manta para diferentes escenarios de combustible.....	42
Figura 14. Pérdidas en el poliducto Libertad - Manta	43
Figura 15. Resultado de simulación para los escenarios diésel, gasolina, diésel + DRA	47
Figura 16. Detalles de simulación del sistema de bombeo para diésel + DRA.....	47
Figura 17. Simulación del cálculo de porcentaje de DRA.....	48
Figura 18. Resultado de simulación de análisis ANOVA, MATLAB.	51

Figura 19. Gráfica de análisis ANOVA. de acuerdo con los datos generados en
MATLAB..... 53

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo principal optimizar el transporte de combustibles en el poliducto Libertad-Manta mediante la aplicación de químicos mejoradores de flujo y herramientas de simulación numérica. La investigación partió del análisis de las condiciones operacionales actuales del poliducto, que enfrenta desafíos relacionados con la eficiencia hidráulica, la pérdida de presión y el consumo energético durante el transporte de derivados de petróleo. Para esto se evaluó el desempeño de aditivos químicos que reducen la fricción interna del fluido, disminuyen la viscosidad y permiten un flujo más eficiente. Paralelamente, se desarrolló un modelo de simulación numérica que represente el comportamiento del flujo multifásico en el poliducto, integrando variables como temperatura, presión, caudal y propiedades fisicoquímicas de los combustibles. La combinación de ensayos experimentales y simulaciones permitió identificar escenarios óptimos de operación, con el fin de reducir costos de bombeo, minimizar tiempos de transporte y mejorar la seguridad del sistema. Además, se analizaron el impacto económico y ambiental de la implementación de estos mejoradores, con el objetivo de proponer una estrategia integral y sostenible para la gestión del poliducto.

Palabras claves: eficiencia operativa, factor de arrastre, hidráulica, mejorador de flujo.

ABSTRACT

The main objective of this project is to optimize the transportation of fuels in the Libertad-Manta polyduct through the application of flow enhancing chemicals and numerical simulation tools. The research is based on the analysis of the current operating conditions of the pipeline, which faces challenges related to hydraulic efficiency, pressure loss and energy consumption during the transportation of petroleum derivatives. For this purpose, the performance of chemical additives that reduce the internal friction of the fluid, lower the viscosity and allow a more efficient flow were evaluated. At the same time, a numerical simulation model was developed to represent the behavior of multiphase flow in the polyduct, integrating variables such as temperature, pressure, flow, and physicochemical properties of the fuels. The combination of experimental tests and simulations made it possible to identify optimal operating scenarios to reduce pumping costs, minimize transport times and improve system safety. In addition, the economic and environmental impact of the implementation of these upgraders was analyzed with the aim of proposing an integral and sustainable strategy for the management of the polypipeline.

Keywords: drag factor, flow improver, hydraulics, operating efficiency.

INTRODUCCIÓN

El transporte de combustibles líquidos a través de sistemas de poliductos es una actividad crítica para la logística energética de los países, especialmente en regiones donde las refinerías, terminales y centros de consumo están geográficamente distantes (Toyo, 2024). En el caso de Ecuador, el poliducto Libertad-Manta constituye una infraestructura estratégica para el traslado eficiente de derivados del petróleo desde la provincia de Santa Elena hacia la terminal de Barbasquillo en Manta, en Manabí. No obstante, con el paso del tiempo, la eficiencia operativa de estos sistemas puede verse afectada por factores como el incremento en la demanda, el envejecimiento de las tuberías, y las propiedades físicas de los productos transportados (EP PETROECUADOR, 2023b)

Desde mediados del siglo XX, la industria del transporte de hidrocarburos ha enfrentado el reto de optimizar el flujo interno de los ductos, particularmente cuando se manipulan productos de alta viscosidad o cuando las condiciones operativas no son óptimas. En este contexto, surgieron los primeros desarrollos de drag reducing agents (DRA), conocidos en español como químicos mejoradores de flujo, cuya aplicación a gran escala se popularizó a partir de la década de 1970 en Estados Unidos y otros países productores de petróleo (Fink, 2016). Estos aditivos, generalmente polímeros solubles, actúan reduciendo la fricción turbulenta en el interior de las tuberías, lo que se traduce en menores caídas de presión y mayor eficiencia energética (Makogon, 2019).

Durante las décadas de 1980 y 1990, diversos estudios académicos y técnicos refinaron la comprensión de los mecanismos fisicoquímicos detrás del funcionamiento de los DRA, así como sus interacciones con diferentes tipos de combustibles y condiciones de transporte (Al-Sarkhi, 2010). Paralelamente, el avance de la informática y el modelado computacional permitió el desarrollo de herramientas de simulación numérica aplicadas a sistemas de transporte por ductos, facilitando el análisis predictivo de escenarios operativos y la toma de decisiones basada en datos (Gómez et al., 2017).

Estos aditivos actúan reduciendo la fricción interna del fluido, mejorando su viscosidad aparente y favoreciendo un transporte más eficiente, especialmente en largas distancias.

Su aplicación ha demostrado beneficios significativos en otros sistemas de transporte de hidrocarburos, como el aumento del caudal, la reducción de costos operativos y la prolongación de la vida útil de los equipos. Este proyecto plantea una evaluación integral del uso de dichos químicos en el poliducto Libertad-Manta, considerando la caracterización de los combustibles transportados, el comportamiento del sistema bajo condiciones actuales y simuladas, y un análisis técnico-económico de la implementación.

Planteamiento de la investigación

Frente a esta situación, surge la necesidad de identificar soluciones tecnológicas que permitan mejorar el desempeño del poliducto sin requerir modificaciones estructurales costosas. En este contexto, el uso de químicos mejoradores de flujo representa una alternativa innovadora y de bajo impacto, que ha demostrado resultados positivos en sistemas similares a nivel internacional (Contreras, 2024). No obstante, su aplicación en el poliducto Libertad-Manta requiere un estudio técnico riguroso que evalúe su viabilidad, eficacia y rentabilidad (Morken Group, 2019).

Un uso adecuado de aceleradores de ruptura de emulsiones o también denominados desestabilizadores o surfactantes, permiten que la separación del agua de la emulsión sea más rápida gracias a una adecuada comprensión de los fenómenos interfaciales que se presentan frecuentemente en los crudos extrapesados (Ma et al., 2021). En el caso del poliducto, es necesario tomar en consideración que estos productos deben ser compatibles con el tipo de combustible y adicionalmente al reducir la presión de bombeo y por consiguiente la reducción de la energía necesaria para impulsar los productos a través de la línea, con lo que se adicionaría la reducción en costos de operación en la transferencia de los derivados (Contreras, 2024; Cuellar Muñoz, 2021).

Formulación del problema de investigación

La optimización del transporte de combustibles en el poliducto Libertad-Manta puede lograrse mediante el uso de químicos mejoradores de flujo, lo que permitirá incrementar la eficiencia operativa y reducir el consumo energético del sistema.

Objetivo General

Evaluar el impacto del uso de químicos mejoradores de flujo en la optimización del transporte de combustibles en el poliducto Libertad-Manta mediante simulación numérica de los datos obtenidos de los ensayos de viscosidad.

Objetivos Específicos

1. Identificar las condiciones operativas actuales del poliducto Libertad-Manta, incluyendo presión, caudal y propiedades de los combustibles transportados.
2. Analizar la eficiencia de diferentes tipos de químicos mejoradores de flujo disponibles en el mercado mediante ensayos de viscosidad en el Laboratorio.
3. Estimar los beneficios técnicos y económicos asociados al uso de químicos mejoradores de flujo en el poliducto.
4. Evaluar los resultados del uso de químicos mejoradores de flujo en la optimización del transporte de combustibles en el poliducto Libertad-Manta mediante simulación numérica aplicando los resultados de los ensayos de viscosidad.

Planteamiento hipotético

¿Cómo optimizar el transporte de combustibles en el poliducto Libertad- ¿Manta mediante el uso de químicos mejoradores de flujo, garantizando mejoras en la eficiencia operativa y reducciones en el consumo energético?

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Revisión de literatura

El poliducto Libertad – Manta inicia sus operaciones en 1990 de forma normal, abasteciendo de combustible a la Provincia de Manabí. Los principales productos que transportan son: Gasolina Extra, Destilado 1, Diesel 2, y Diesel Premium, tiene 170 Km de extensión y cuenta actualmente con dos grupos de bombeo con un caudal de 400 barriles por hora, con una tubería de 6 pulgadas (EP PETROECUADOR, 2023b)

Se ha reportado en los informes de Rendición de Cuentas del año 2019 que “*EP PETROECUADOR inyectó un polímero reductor de fricción en el Poliducto Libertad-Manta y Poliducto Quito – Ambato – Riobamba, con lo cual se incrementaron los caudales, eliminando las transferencias terrestres de combustibles hacia el Terminal Riobamba y evitando transferencias a Manta, generando un ahorro de aproximadamente USD 3.700.000 anuales*” (EP PETROECUADOR, 2019). Sin embargo, al año 2023 no aparece en los informes de Rendición de Cuentas la continuidad del uso del agente químico de base polímero para reducir la fricción en el poliducto Libertad-Manta (EP PETROECUADOR, 2023a).

Adicionalmente, según los mencionados informes, los incrementos en las tasas de bombeo han sido aproximadamente de 31,5% en el poliducto Libertad-Manta y de 43,9% en el Quito-Ambato-Riobamba, es importante mencionar que el aumento en la tasa de bombeo dependerá del tipo de producto a transportar y como estos estén mezclados dentro de la línea de transmisión, es decir, la sección operativa del poliducto en la que circula un único producto en forma continua, delimitada entre dos secuencias de cambio de lote o interfaces de mezcla..

Por otro lado, en un estudio de caso, Morken Group presenta el caso del incremento de hasta un 74% en la tasa de bombeo de un poliducto en Chile el cual transporta kerosene

de aviación, diésel B1 (Vehicular) y MGO (Diesel Marino), pasando de 1446 m³/d en “batches” de B1 y 1442 m³/d “batches” de MGO con 20 ppm de producto (Morken Group, 2019). Si bien la empresa no indica algo de la composición del agente reductor de fricción usado, estos valores de eficiencia presentados son más de dos veces superiores a los registrados con el agente base polímero usado en EP PETROECUADOR.

La eficiencia en el transporte de combustibles por poliductos es esencial para reducir costos y minimizar impactos ambientales. Los químicos mejoradores de flujo, también conocidos como reductores de fricción, actúan al modificar las propiedades reológicas del fluido, disminuyendo la resistencia al flujo y mejorando el caudal. Estudios previos han demostrado incrementos de hasta un 40% en la capacidad de transporte en poliductos con el uso de estos aditivos (Zhang et al., 2025).

En Ecuador, el poliducto Libertad-Manta enfrenta desafíos relacionados con pérdidas de presión y altos costos operativos debido a la resistencia interna del flujo. El uso de mejoradores de flujo podría resolver estos problemas, permitiendo un transporte más eficiente y sostenible (EP PETROECUADOR, 2023a).

A nivel global, los químicos mejoradores de flujo han sido aplicados con éxito en sistemas similares, demostrando beneficios como el ahorro de energía y la reducción de emisiones asociadas al bombeo (White & Mungal, 2008).

Los agentes reductores de fricción (ARFs) son aditivos químicos utilizados para mejorar la eficiencia del transporte de hidrocarburos líquidos en poliductos. Estos productos reducen la turbulencia en el flujo, disminuyendo la caída de presión y, por ende, incrementando la capacidad de transporte sin necesidad de modificaciones estructurales en la infraestructura (Souas & Meddour, 2022).

1.2. Principios de Funcionamiento

En poliductos, el flujo turbulento genera pérdidas de energía debido a la interacción de las moléculas del fluido con las paredes de la tubería. Los agentes reductores de fricción (ARF), especialmente los de base aceite orgánico, actúan como agentes modificadores del flujo al formar una película lubricante que reduce las fuerzas de corte entre las capas del fluido. Esto resulta en un transporte más eficiente y menos demandante en términos de energía de bombeo (Han & Choi, 2017).

La tecnología de reducción de fricción, figura 1, es la representación de estrategias avanzadas para la optimización del transporte de fluidos en los sistemas de tuberías. Este fenómeno tiene su fundamento la supresión de turbulencia que genera la máxima pérdida de energía para el flujo. Inicialmente el flujo mantiene un movimiento desordenado de las moléculas que forman vórtices y remolinos que disipan la energía en forma de calor u resistencia. Esta situación se agrava a medida que se recorre longitud en la tubería, lo que requiere un mayor consumo de energía en las bombas de transporte.

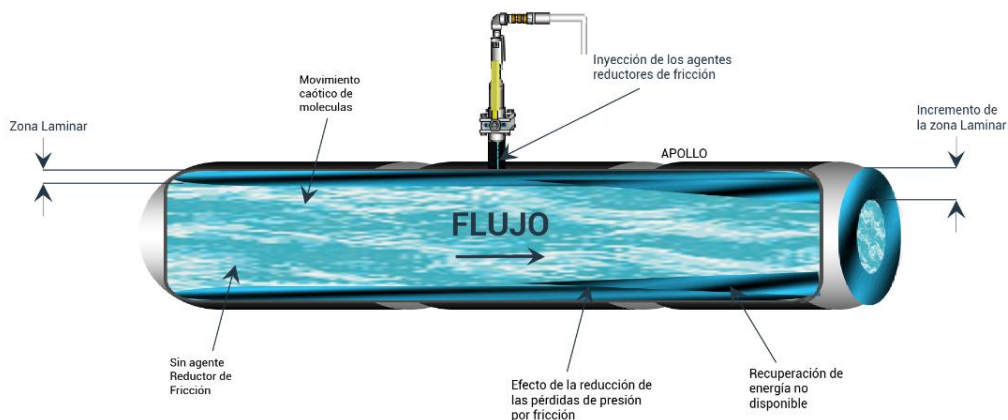


Figura 1 Aplicación de reductores de fricción en línea. Fuente: www.apollo.mx (consultado en agosto de 2025)

Nota: el reductor de fricción se inyecta por la parte superior del poliducto y forma una capa laminar al borde de las paredes de la tubería alrededor del punto de inyección aguas abajo.

1.3. Características de los Agentes Reductores de Fricción

Los ARF presentan varias ventajas (Nesyn et al., 2018)

- **Compatibilidad química:** Son altamente compatibles con diferentes tipos de hidrocarburos, evitando problemas de separación de fases.
- **Eficiencia de flujo:** Algunos estudios reportan incrementos en la eficiencia del transporte superiores al 50%, dependiendo de las condiciones operativas y de la formulación química.
- **Sostenibilidad:** Al ser fluidos compatibles con el combustible transportado, tienen menor impacto ambiental, ya que no generan contaminación del fluido y no afectan por tanto el despacho final del producto en tanques.
- **Protección de equipos:** Los aditivos mejoradores de flujo actúan como una barrera frente a problemas como la corrosión, el desgaste mecánico y la abrasión en los sistemas de transporte, lo que permite alargar la vida útil de los equipos y reducir los gastos asociados a su mantenimiento. Asimismo, estos compuestos ayudan a minimizar los efectos negativos de la fricción, preservando el rendimiento de los ductos y maquinaria involucrada.
- **Reducción de costos:** Al contribuir a una mayor durabilidad de los equipos y disminuir la resistencia al flujo, los ARF ayudan a bajar significativamente los costos operativos. Esto incluye menores requerimientos de energía para el bombeo, reducción de pérdidas de presión y una disminución general de los gastos por reparaciones o sustituciones de componentes.
- **Mejora de la seguridad:** Los agentes que reducen la fricción también fortalecen la estabilidad operativa del sistema, lo que se traduce en un entorno más seguro

tanto para el personal como para los equipos, al minimizar fallos o interrupciones inesperadas.

- **Aumento de flujo:** Gracias a su capacidad para reducir la resistencia del fluido al movimiento, estos aditivos facilitan un transporte más eficiente del hidrocarburo, permitiendo incrementar considerablemente el caudal en las tuberías. Esto reduce el riesgo de bloqueos, pérdidas de producto o formación de cuellos de botella en la infraestructura de transporte.

1.4. Aplicaciones y Resultados

El uso de estos químicos ha mostrado resultados prometedores en poliductos para el transporte de combustibles derivados del petróleo, debido al desafío operacional que se presenta por la formación de patrones turbulentos en el interior de la tubería y por tanto una necesidad de incremento de energía en el bombeo para compensar las cargas hidrodinámicas en el interior del ducto. En casos documentados, la aplicación de ARF permitió reducir la caída de presión en un 60%, permitiendo un incremento del caudal en un 40% sin alterar la infraestructura existente (INSPENET, 2024).

Cuando se transporta hidrocarburos, los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos, dependiendo de cómo responden al esfuerzo cortante. Un fluido newtoniano es aquel cuya viscosidad se mantiene constante independientemente de la temperatura o la velocidad de corte aplicada; es decir, presenta una relación lineal entre esfuerzo cortante y tasa de deformación, como lo establece la ley de viscosidad de Newton. Como podrían ser el agua o aceites livianos.

Por el contrario, los fluidos no newtonianos, como los crudos pesados y extrapesados, no mantienen una viscosidad constante; su viscosidad varía con la temperatura y la velocidad de corte. Dentro de esta categoría, el comportamiento pseudoplástico es el más común en crudos para transporte por ducto, caracterizándose por una disminución de la viscosidad al aumentar la tensión cortante. Este fenómeno implica que, a mayores temperaturas o velocidades de flujo, el crudo fluye con menor resistencia, lo que tiene un impacto directo en el consumo energético del sistema de bombeo (SPE, 2022).

Comprender este comportamiento reológico nos ayudará a justificar el uso de aditivos mejoradores de flujo, cuyo propósito es reducir la viscosidad y, por consiguiente, minimizar las pérdidas de presión y optimizar el transporte en el poliducto Libertad–Manta.

1.5. Limitaciones y consideraciones

Entre algunas limitaciones del uso de ARF se tienen, entre otras las siguientes (Liu et al., 2018):

- Condiciones de operación: La efectividad puede variar según la temperatura, presión y características del tipo de combustible a bombear.
- Costo: A pesar de su eficiencia, el costo inicial de los ARF puede ser elevado, requiriendo análisis costo-beneficio para su implementación a largo plazo.

1.6. Descripción del poliducto Libertad-Manta

La Estación Cabecera La Libertad, situada en el sector de Crucita del cantón La Libertad, abarca un área aproximada de 5 hectáreas y comenzó sus operaciones en agosto de 1990. Desde esta instalación se origina el poliducto Libertad–Manta, el cual se encuentra operativo desde ese mismo año, y recorre la franja costera de las provincias de Santa Elena y parte de Manabí. Este ducto tiene una longitud total de 170 km + 644 metros, un diámetro de 6 pulgadas, y es utilizado para el transporte de Gasolina Extra, Destilado 1 y Diésel 2, con destino final en el Terminal Barbasquillo, ubicado en Manta. Tiene una capacidad de bombeo máxima de 8400 bls/día y un operativo promedio de 7200 bls/día.

Desde los tanques de la refinería de La Libertad se alimentan por gravedad las bombas de la Estación de Transferencia, desde donde son enviados a la Estación Cabecera del

poliducto Libertad-Manta para que sean bombeados hasta el terminal de Barbasquillo de Manta.



Figura 2 Estación Cabecera del Poliducto Libertad-Manta. Fuente: www.coeltec.com.ec (2025)

En base a la información presentada por EP Petroecuador, 2023, se determina que la estación cuenta con dos grupos principales de bombeo eléctrico, cada uno con una potencia instalada de 450 HP, equipados con bombas centrífugas marca United, diseñadas para el manejo de altos caudales y presiones en sistemas de transporte de crudo y combustibles. Las bombas centrífugas United son ampliamente utilizadas en ductos de mediana y larga distancia por su robustez y eficiencia en condiciones continuas de operación. Cada grupo tiene una capacidad nominal de 318 gal/min y está accionado por motores eléctricos Siemens.

Adicionalmente, la estación dispone de dos grupos de bombeo tipo booster, los cuales son bombas auxiliares empleadas para incrementar la presión en puntos específicos de la línea de transmisión, garantizando que el flujo mantenga la presión requerida en todo el trayecto. Estos equipos operan con motores eléctricos de 30 HP y una velocidad de 1755 rpm, utilizando bombas marca Byron Jackson, reconocidas por su capacidad de operación estable en sistemas de refuerzo de presión y manejo de caudales medianos según lo presentado por EP Petroecuador, 2023. Las bombas booster instaladas poseen la misma capacidad de 318 gal/min, y están accionadas por motores Acec.

La capacidad de bombeo del poliducto, sus características generales y las capacidades de los tanques de almacenamiento por tipo de combustible se presentan en las Tablas 1-3. Desde los tanques de la estación cabecera se alinean los grupos de bombeo para la transferencia del producto. Cuando la operación requiera de un bombeo continuo de otro producto a continuación de la primera partida, se inyecta un colchón (bache) de Diésel 1, el cual basada en los mismos informes de la empresa EPPetroEcuador, 2023 y reflejándose en la tabla 3; están entre 8000 a 10000 galones, dependiendo del producto a espaciar y evitar contaminación.

Tabla 1.

Capacidad de bombeo del Poliducto Libertad-Manta.

Bomba	Caudal (GPM)	Cabeza (pies)	Potencia (HP)
B-307 (principal)	318	605	450
B-308 (principal)	318	605	450
B-302 (booster)	71,2	150	30
B-303 (booster)	71,2	150	30

Fuente: (EP PETROECUADOR, 2023b)

Tabla 2.

Características generales del Poliducto Libertad-Manta

Longitud	Diámetro	Capacidad bombeo	Vol. empaquetado línea	Caudal máximo
(km)	(pulg)	(bpd)	(bls)	(bph)
170+644	6	7200	21042	280-300

Fuente: (EP PETROECUADOR, 2023b)

Tabla 3.

Capacidad de almacenamiento Estación Cabecera La Libertad

Tipo de combustible	Tanque	Capacidad (galones)
Gasolina base	01	818.788
Gasolina extra	02	1.025.299
Diésel 2	03	1.037.896
Diésel 2	04	825.822
Diésel 1	05	389.855
Slop	07	25.000
Jet fuel	10	1.426.557

Fuente: (EP PETROECUADOR, 2023b)

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

El sistema de transporte de derivados de petróleo mediante poliductos cumple un rol esencial en la infraestructura energética del Ecuador, al permitir el traslado continuo, seguro y económico de combustibles desde centros de refinación o almacenamiento hacia puntos de distribución y consumo. En particular, el poliducto Libertad-Manta, que conecta la terminal La Libertad en la provincia de Santa Elena con la terminal Barbasquillo de Manta en Manabí, constituye una infraestructura estratégica para el abastecimiento de combustibles en la región litoral del país. Por tanto, esta investigación se realizó entre estas dos estaciones del poliducto incluyendo la cabecera ubicada en La Libertad y el terminal de arribo de los productos en el terminal de Barbasquillo.

2.2. Diseño y alcance de la investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo y aplicado, con un diseño no experimental, de tipo descriptivo y correlacional. El estudio se basa en la recolección y análisis de datos operativos del poliducto Libertad-Manta, así como en la simulación computacional del comportamiento hidráulico del sistema con y sin el uso de químicos mejoradores de flujo (*Drag Reducing Agents*, DRA). El procedimiento experimental se compone de los siguientes pasos (Hernández-Sampieri et al., 2014):

El diseño incluye las siguientes fases:

- 1 Recolección de información operativa del poliducto (presiones, caudales, consumo energético, topografía, características de los combustibles).

- 2 Caracterización de los fluidos transportados y análisis de sus propiedades fisicoquímicas.
- 3 Selección de DRA adecuados con base en literatura técnica y experiencias de uso internacional.
- 4 Simulación numérica del sistema de transporte, utilizando modelos hidráulicos para comparar escenarios base (sin DRA) y optimizados (con DRA).
- 5 Evaluación de impacto técnico y económico, a partir del análisis comparativo de indicadores clave como caída de presión, consumo energético y caudal transportado.

2.3. Tipo y métodos de investigación

Esta investigación se clasifica como un estudio de tipo aplicado, ya que busca resolver una problemática operativa concreta mediante la incorporación de soluciones tecnológicas en un contexto específico: el transporte de combustibles en el poliducto Libertad-Manta. Asimismo, se trata de una investigación cuantitativa, dado que se fundamenta en la recopilación, análisis y modelación de datos numéricos para evaluar el comportamiento hidráulico del sistema y estimar el impacto técnico-económico del uso de mejoradores de flujo.

En cuanto a su alcance, es una investigación descriptiva y correlacional. Es descriptiva porque caracteriza el sistema de transporte y sus condiciones operativas actuales, y es correlacional porque analiza la relación entre variables como caudal, presión, viscosidad, consumo energético y el efecto de los aditivos químicos.

El método de investigación es cuantitativo-experimental con simulación numérica, basado en la comparación de escenarios bajo condiciones controladas mediante herramientas computacionales. Aunque no se realiza una experimentación física directa en el ducto, se emplea una modelación basada en datos reales para simular el comportamiento del sistema con y sin la aplicación de químicos mejoradores de flujo.

2.4. Población y muestra

2.4.1. Población de estudio

La población de esta investigación estuvo constituida por el conjunto total de sistemas de transporte de derivados de petróleo por ductos en el Ecuador, operados principalmente por la empresa pública EP Petroecuador. Esta infraestructura incluye una red nacional de oleoductos, poliductos y ramales que conectan refinerías, terminales de almacenamiento y centros de distribución de combustibles a lo largo del territorio nacional.

Desde una perspectiva operativa, la población también abarcó los datos históricos de operación (presión, caudal, viscosidad, consumo energético, etc.) y los distintos tipos de combustibles transportados en estos sistemas, así como los equipos involucrados en las estaciones de bombeo y control.

2.4.2. Muestra

La muestra seleccionada para el estudio estuvo conformada exclusivamente por el poliducto Libertad–Manta, infraestructura que forma parte de la red de distribución costera de derivados. Este poliducto fue elegido bajo un criterio de muestreo intencional y no probabilístico, considerando su relevancia operativa, accesibilidad a datos históricos y su potencial para ser optimizado mediante la aplicación de tecnologías como los químicos mejoradores de flujo.

Las características específicas de la muestra incluyeron:

- Longitud aproximada: 170,6 km.
- Productos transportados: Gasolina, diésel, jet fuel.
- Diámetro nominal del ducto: (según información técnica disponible).
- Número y ubicación de estaciones de bombeo: Al menos dos (inicio y fin del trayecto).
- Datos operativos históricos: Presiones, caudales, viscosidades, consumo energético y temperaturas, correspondientes a los últimos 3 a 5 años de operación.

2.4.3. Variables

En esta investigación, se identifican y definen tanto variables independientes como dependientes, además de algunas variables de control relevantes para el análisis técnico del transporte de combustibles por el poliducto Libertad–Manta.

Variable Independiente

- **Uso de mejoradores de flujo (DRA)**

Definición: Aplicación de aditivos químicos que reducen la fricción del flujo turbulento en ductos.

Tipo: Cualitativa nominal (presencia o ausencia del DRA) / Cuantitativa continua (concentración del DRA en ppm).

Unidad: ppm (partes por millón)

Escala: Nominal y de razón.

Variables Dependientes

- **Caudal transportado**

Definición: Volumen de combustible que circula por el poliducto en un tiempo determinado.

Unidad: m³/h o bpd

Tipo: Cuantitativa continua

Escala: De razón

- **Pérdida de presión**

Definición: Diferencia de presión entre puntos de entrada y salida del poliducto.

Unidad: psi o Pa

Tipo: Cuantitativa continua

Escala: De razón

- **Consumo energético en estaciones de bombeo**

Definición: Energía requerida para operar el sistema de bombeo del poliducto.

Unidad: kWh

Tipo: Cuantitativa continua

Escala: De razón

- **Eficiencia del transporte**

Definición: Relación entre el volumen transportado y el consumo de energía.

Unidad: m³/kWh

Tipo: Cuantitativa continua

Escala: De razón

- **Costo operativo estimado**

Definición: Costos energéticos y de mantenimiento asociados al transporte con y sin DRA.

Unidad: USD

Tipo: Cuantitativa continua

Escala: De razón

Variables de Control

- **Tipo de combustible** (gasolina, diésel, jet fuel)
- **Propiedades fisicoquímicas del fluido** (viscosidad, densidad, temperatura)
- **Condiciones topográficas del poliducto**
- **Diámetro interno y rugosidad del ducto**

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

2.5.1 Técnicas de recolección de datos

- **Revisión documental y técnica:** Consiste en la recopilación y análisis de informes operativos, planos, manuales técnicos, reportes de mantenimiento y normativas internas sobre la operación del poliducto Libertad–Manta.
- **Consulta a bases de datos operativas:** Se accede a registros históricos del SCADA u otros sistemas de monitoreo utilizados por EP Petroecuador o la entidad operadora, donde se almacenan datos sobre presión, caudal, temperatura, consumo energético y calidad del combustible.

- **Simulación computacional:** Esta técnica permite generar datos proyectados bajo condiciones hipotéticas (uso de DRA), a partir de modelos matemáticos calibrados con datos reales.

2.5.2 Instrumentos de recolección de datos

Los principales instrumentos utilizados son:

- **Fichas técnicas operativas:** Diseñadas para organizar y registrar datos específicos del sistema (longitud del ducto, diámetro, presiones de entrada y salida, tipo de combustible, viscosidades, consumo de energía, etc.).
- **Base de datos SCADA o históricos operativos:** Fuente de datos en tiempo real o archivados que permiten evaluar el comportamiento hidráulico del poliducto bajo diferentes condiciones.
- **Software de simulación hidráulica (instrumento analítico):** modelación en MATLAB, dependiendo de la complejidad del modelo y disponibilidad, permiten realizar simulaciones comparativas con y sin la presencia de DRA.
- **Plantillas de cálculo (Excel u otros programas):** Utilizadas para sistematizar resultados, realizar análisis estadísticos y construir gráficos comparativos de rendimiento.

2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.

La validación de los resultados se la realizará mediante la comparación de resultados de otros trabajos del mismo tipo reportados en la literatura científica nacional e internacional y con datos operativos de campo en el poliducto Libertad-Manta.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en Matlab con base en los resultados de viscosidad obtenidos de los ensayos realizados en la línea de transporte de poliducto Libertad – Manta. Adicional a esto se presenta los análisis estadísticos y discusión técnica sobre las variables mencionadas: viscosidad, presión, caudal, consumo energético y costos operativos. Finalmente, se realizará una comparativa de con los efectos de los mejoradores químicos.

3.1. Ensayos de viscosidad

Se realizaron diferentes ensayos reológicos a diferentes temperaturas y velocidades de corte, donde se pudo observar que los líquidos poseen un comportamiento no newtoniano, tal como se explicó en la sección 1.4 previamente, específicamente del tipo pseudoplástico, lo cual se caracteriza por tener una correlación inversa, mientras mayor temperatura, menor viscosidad. Esto indica la imperiosa necesidad de incorporar mejoradores de flujo, pues a bajas temperaturas la viscosidad es elevada, generando pérdidas de presión en el transporte por ducto.

A continuación, en las tablas de 4 a 8 se presentan los datos obtenidos en los ensayos de viscosidad en muestras de combustible, distribuido de la siguiente manera: Diesel (tablas 4 y 5), Jetfuel (tablas 6 y 7) y Combustible gasolina (tabla 8). Es importante mencionar que los datos presentados se han obtenido de ensayos realizados por el departamento técnico de la empresa Petroecuador EP en la estación de bombeo “Cabecera La Libertad” ubicado en la provincia de Santa Elena.

Tabla 4.

Ensayos experimentales de viscosidad del combustible diésel en función de la temperatura

DATOS DE VISCOSIDAD OBTENIDOS DE LA MUESTRA DIESEL									
HORA DE INICIO:		07:30:00	HORA DE TÉRMINO		17:30	Rotor	#1		
TEMP.		6 RPM		12 RPM		30 RPM		60 RPM	
°C	°F	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)
100	212	-	-	-	-	10.20	5.10	9.70	9.70
90	194	-	-	-	-	11.40	5.70	11.50	11.50
80	176	-	-	16.00	3.20	13.30	6.60	14.00	14.00
70	158	-	-	19.40	3.80	16.10	8.00	17.80	17.80
60	140	-	-	24.70	4.90	20.90	10.40	24.00	24.00
50	122	36.80	3.60	33.40	6.60	29.60	14.80	34.10	34.10
40	104	50.40	5.00	50.90	10.10	46.10	23.00	50.30	50.30
28	82.4	87.30	8.70	81.90	16.30	82.20	41.10	98.90	98.90

Fuente: (EP PETROECUADOR, 2022)

Nota: Los datos corresponden a ensayos de laboratorio realizados por EP Petroecuador y se presentan con fines de análisis y validación del comportamiento reológico del combustible diésel.

La Tabla 4 presenta los resultados de viscosidad del combustible diésel obtenidos durante la fase inicial del ensayo, sin adición de mejorador de flujo, a velocidades de corte de 6, 12, 30 y 60 RPM. En esta etapa, el fluido se encontraba en condiciones térmicas no estabilizadas, lo que permite observar el comportamiento natural del diésel al variar la temperatura. Los datos evidencian que, a medida que aumenta la temperatura, la viscosidad disminuye progresivamente, confirmando un comportamiento no Newtoniano de tipo pseudoplástico. Esta información constituye la línea base del estudio y resulta fundamental para comparar el efecto reológico que posteriormente genera el uso de aditivos mejoradores de flujo.

Tabla 5.

Resultados complementarios de los ensayos de viscosidad del combustible diésel

DATOS DE VISCOSIDAD OBTENIDOS DE LA MUESTRA DIESEL									
HORA DE INICIO:		07:30:00	HORA DE TÉRMINO		17:30	Rotor	#1		
TEMP.		6 RPM		12 RPM		30 RPM		60 RPM	
°C	°F	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)
100	212	-	-	-	-	11.3	5.6	10.8	10.8
90	194	-	-	15.1	3	13.7	6.8	13.4	13.4
80	176	-	-	18.7	3.7	17.6	8.8	17.2	17.2
70	158	-	-	24.8	4.9	23.9	11.9	22.4	22.4
60	140	40.5	4	36.4	7.2	33.8	16.9	30.6	30.6
50	122	57.7	5.7	51.6	10.3	50.2	25.1	43.5	43.5
40	104	104.3	10.4	86.5	17.3	77.1	38.5	75.4	75.4
28	82.4	166	16.6	172.1	34.4	152.5	76.2	139	139

Nota: Los datos presentados corresponden a ensayos de laboratorio realizados por EP Petroecuador y se incluyen para complementar el análisis del comportamiento reológico del combustible diésel.

La Tabla 5 contiene los resultados obtenidos en la fase final del ensayo a las mismas velocidades de corte de **6, 12, 30 y 60 RPM**, cuando el fluido ya alcanzó un régimen térmico más estable. Este escenario permite analizar el efecto del calentamiento progresivo del combustible sobre su viscosidad de manera más consistente. Se observa una reducción más pronunciada de la viscosidad respecto a la fase inicial, evidenciando la influencia de la temperatura en la estructura molecular del diésel y su impacto directo en la disminución del esfuerzo cortante requerido para el flujo. Esta comparación es clave para establecer criterios de eficiencia operativa en el transporte por ductos y justificar técnicamente el uso de aditivos mejoradores de flujo.

La tabla 4 y 5 presenta los resultados en los ensayos de viscosidad del combustible diésel realizado con un viscosímetro rotacional, dentro de un ambiente con condiciones controladas, donde se ha manipulado la temperatura y velocidades de rotor. Las pruebas realizadas permiten observar cómo varía la viscosidad aparente en conjunto con el esfuerzo relativo en función de la temperatura. Es necesario destacar que estas tablas muestran datos reológicos de dos muestras distintas del combustible, mismas que han sido tomadas para validar y evaluar la variabilidad de las propiedades del producto y poder tener consistencia en los datos para la simulación numérica. Estos resultados

aportan información importante para entender el comportamiento reológico de un fluido en condiciones de operaciones de transporte del combustible a través del poliducto.

Los resultados muestran una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. De acuerdo con la Tabla 4 y la Tabla 5, a 100 °C la viscosidad del diésel se mantiene alrededor de 21–22 cP, valor favorable para el transporte por ductos por su baja resistencia al flujo. En el rango de 60–70 °C, la viscosidad observada se sitúa aproximadamente entre 25 y 37 cP, coherente con el comportamiento reológico esperado. En contraste, a 28 °C la viscosidad aumenta de manera notable, alcanzando cerca de 82 cP (Tabla 4) y 139 cP (Tabla 5), condiciones que no son óptimas para el bombeo, pues elevan los requerimientos energéticos del sistema.

A bajas temperaturas, específicamente a 28 °C, el comportamiento reológico del combustible presenta diferencias según las condiciones experimentales de cada ensayo. En la Tabla 4, correspondiente a la fase inicial del ensayo, se observa que a 28 °C la viscosidad tiende a incrementarse con el aumento de la velocidad de corte, lo cual sugiere un comportamiento transitorio asociado a la falta de estabilización térmica del fluido. En contraste, en la Tabla 5, que representa el ensayo realizado bajo condiciones térmicas más estables, a la misma temperatura de 28 °C la viscosidad disminuye al incrementarse la velocidad de rotación, evidenciando un comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico.

Esta diferencia confirma que el perfil reológico del combustible depende no solo de la temperatura y del esfuerzo de corte, sino también del estado térmico del fluido durante el ensayo. En ambos casos, las bajas temperaturas generan valores elevados de viscosidad, lo que limita la operatividad del sistema de transporte y se traduce en mayores requerimientos energéticos. Por el contrario, a temperaturas más altas, el efecto del esfuerzo de corte se vuelve más consistente, las curvas de viscosidad tienden a estabilizarse y se obtiene una mejora hidráulica que se refleja en una reducción del consumo energético del sistema de bombeo.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4 y la Tabla 5, se observa que a temperaturas iguales o superiores a 60 °C la viscosidad del combustible desciende a valores inferiores a 40 cP, lo cual se encuentra dentro del rango operativo recomendado para el transporte por ductos según estándares API, ya que permite reducir la pérdida de

presión y el consumo energético en las estaciones de bombeo. A temperaturas menores, como 28 °C, la viscosidad se incrementa significativamente (entre 82 y 139 cP), generando condiciones no favorables para el flujo. Por este motivo, el valor de 60 °C no es arbitrario, sino que corresponde al umbral a partir del cual el combustible presenta un comportamiento reológico que garantiza un flujo estable, una reducción del esfuerzo cortante y una operación energéticamente eficiente.

A continuación, se muestra los resultados de las gráficas realizadas en Matlab, figura 3 y 4 correspondientes al ensayo 1 y las figuras 5 y 6 correspondientes al ensayo 2, con cada uno de sus scripts de programación, es importante mencionar que estas gráficas se realizan de acuerdo con los valores de las tablas de los ensayos.

Figura 3.

Gráfica de Viscosidad Vs Temperatura ensayo 1 diésel

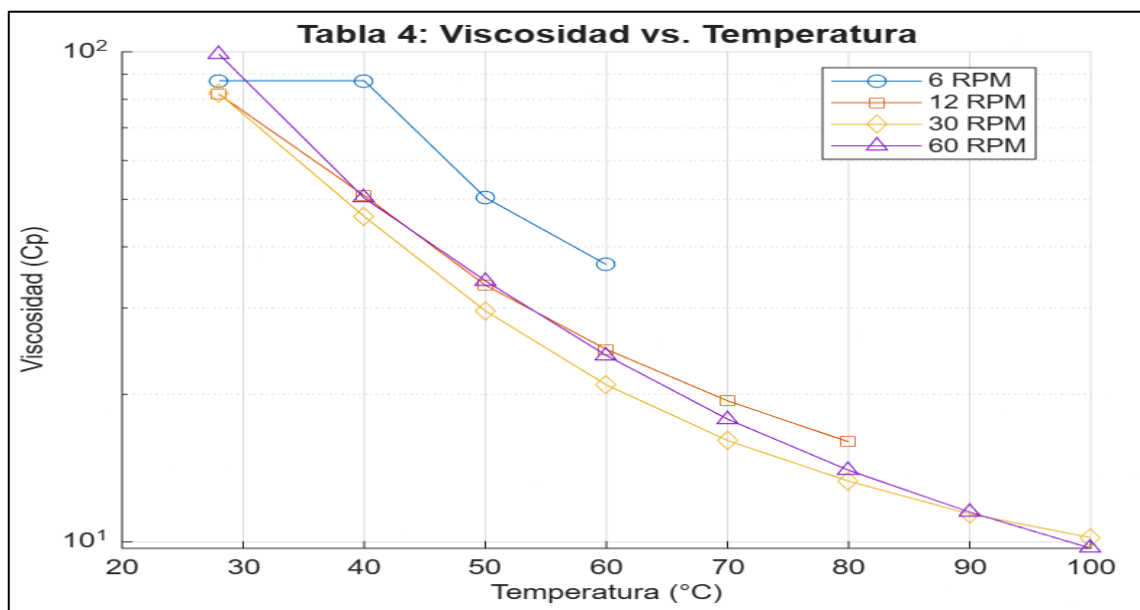


Figura 4.

Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 1 diésel

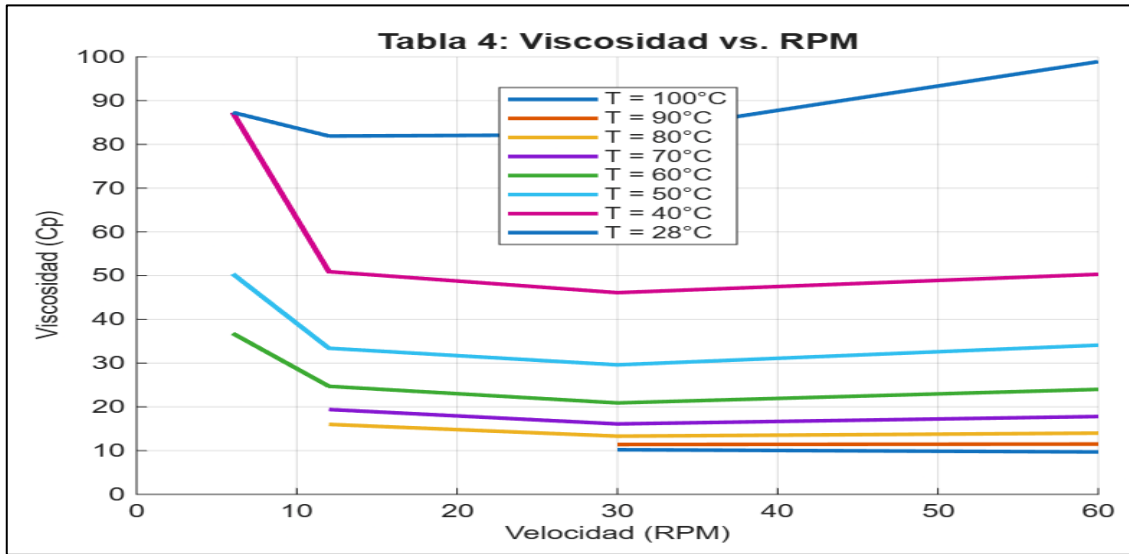


Figura 5.

Gráfica Viscosidad Vs Temperatura ensayo 2 diésel

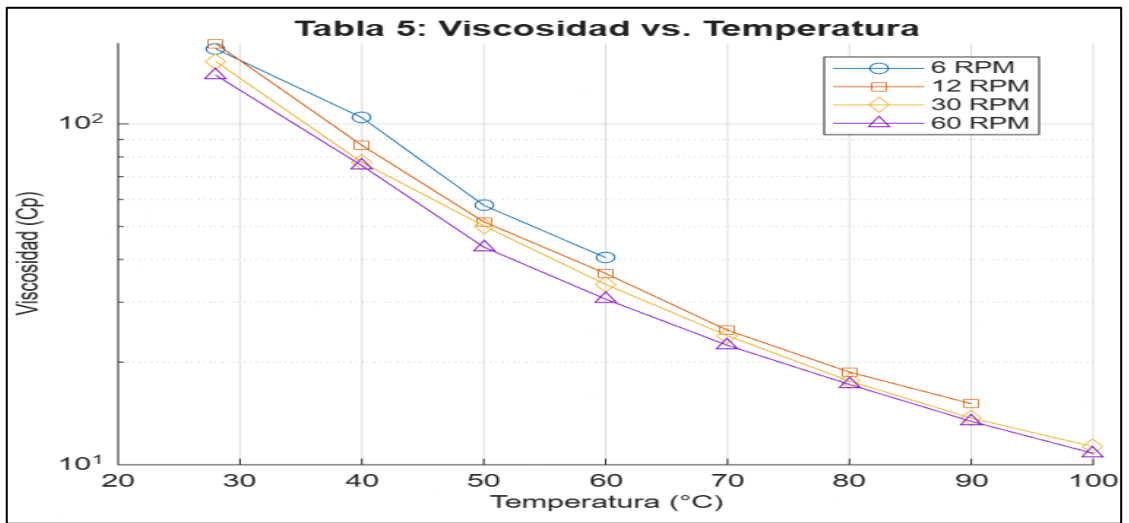
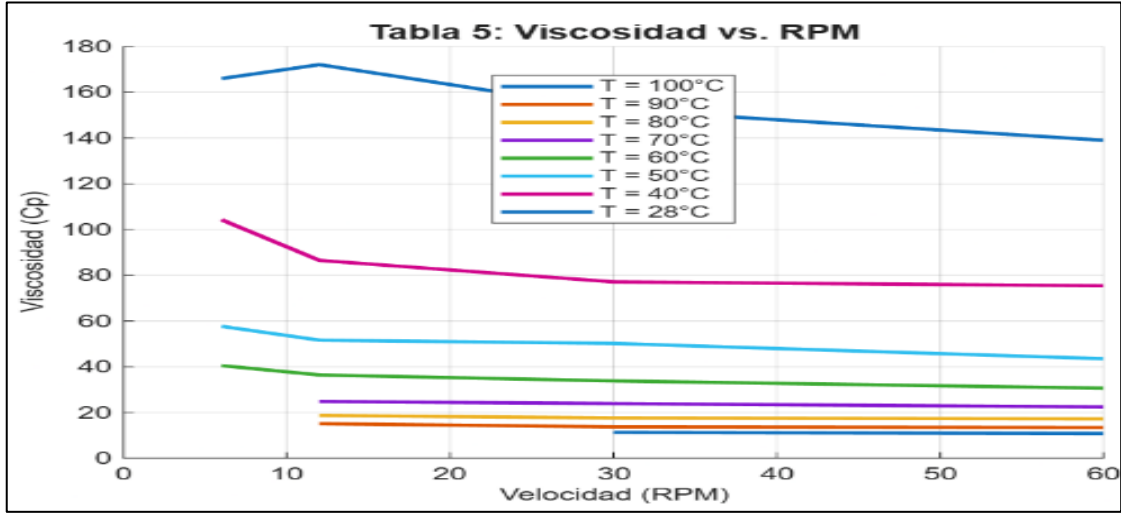


Figura 6.

Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 2 diésel



A continuación, se muestra los datos de los ensayos para Jetfuel

Tabla 6.

Ensayos experimentales de viscosidad del combustible Jet Fuel en función de la temperatura (1/2)

DATOS DE VISCOSIDAD OBTENIDOS DE LA MUESTRA JETFUEL									
HORA DE INICIO:		07:30:00	HORA DE TÉRMINO		17:30	Rotor	#1		
TEMP.		6 RPM		12 RPM		30 RPM		60 RPM	
°C	°F	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)
100	212	-	-	18.7	3.7	17.6	8.8	19	19
90	194	-	-	22.2	4.4	22.8	11.4	25.7	25.7
80	176	-	-	29.8	5.9	32.6	16.3	35.1	35.1
70	158	52.5	4	47.1	7.7	40.5	23.5	38.9	38.9
60	140	78.3	5.7	69.4	11.8	59.2	34.7	57.7	57.7
50	122	105.2	8.8	113.2	17.6	88.1	56.6	88.1	88.1
40	104	193.8	15.1	186.3	30.6	153.4	96.9	151.9	151.9
28	82.4	491.2	29.6	323	58.3	296.7	245.6	291.6	291.6

*Nota: Los datos corresponden a ensayos de laboratorio realizados por EP Petroecuador y se presentan para el análisis del comportamiento reológico del combustible Jet Fuel. **Tabla 7.***

Tabla 8.

Resultados complementarios de los ensayos experimentales de viscosidad del combustible Jet Fuel (2/2)

DATOS DE VISCOSIDAD OBTENIDOS DE LA MUESTRA JETFUEL									
HORA DE INICIO:		07:30:00	HORA DE TÉRMINO		17:30	Rotor	#1		
TEMP.		6 RPM		12 RPM		30 RPM		60 RPM	
°C	°F	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)
100	212	-	-	19.8	3.9	16.6	8.3	16.7	16.7
90	194	-	-	23.7	4.7	21.5	10.7	21.4	21.4
80	176	32.9	3.2	31.5	6.3	27.5	13.7	30.7	30.7
70	158	45.5	4.5	46	9.2	44.6	22.3	44.8	44.8
60	140	69.8	6.9	74.6	14.9	71.1	35.5	70.5	70.5
50	122	113.4	11.3	117.3	23.4	122	61	117.2	117.2
40	104	213.4	21.3	228.9	45.7	253.3	126.6	244.1	244.1
28	82.4	570.3	57	335.6	67.1	478.8	239.4	-	-

Nota: Los datos corresponden a ensayos de laboratorio realizados por EP Petroecuador y se emplean para el análisis del comportamiento reológico del combustible Jet Fuel.

Los datos obtenidos para el Jetfuel muestran una tendencia reológica similar a la del combustible diésel, evidenciando una correlación inversa entre la viscosidad y la temperatura. A medida que el fluido alcanza temperaturas superiores a los 70 °C, la viscosidad disminuye notablemente, situándose en valores que permiten un flujo estable y eficiente para el transporte por ductos. Esta reducción de viscosidad se debe a la mayor energía térmica disponible, la cual disminuye las fuerzas intermoleculares entre los compuestos aromáticos y parafínicos presentes en el Jetfuel, favoreciendo su movilidad. A bajas temperaturas (28–50 °C), el Jetfuel presenta valores de viscosidad superiores a los del diésel, lo que se explica por su composición química específica establecida en la norma ASTM D1655, que incorpora aditivos anticongelantes y componentes de mayor peso molecular que incrementan la resistencia inicial al flujo. Sin embargo, conforme aumenta la temperatura, estas interacciones disminuyen y el comportamiento del fluido se estabiliza.

El análisis de las curvas de viscosidad frente a la velocidad de corte demuestra que, a bajas temperaturas, el Jetfuel presenta un comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico, ya que la viscosidad disminuye al incrementar las RPM del viscosímetro, indicando una sensibilidad significativa a la tasa de deformación. No obstante, cuando la temperatura supera los 70 °C; como se evidencia en las figuras 9 y 10, tienden a evidenciar un comportamiento plano, lo que evidencia una transición hacia un comportamiento cercano al fluido newtoniano. En este régimen, la viscosidad se mantiene prácticamente constante ante variaciones en la velocidad de corte, lo cual es indicador de que el fluido ha alcanzado un estado reológico ideal para el transporte por ductos, reduciendo al mínimo las pérdidas de presión y el consumo energético requerido en las estaciones de bombeo.

Figura 7

Gráfica Viscosidad Vs Temperatura ensayo 1 Jetfuel

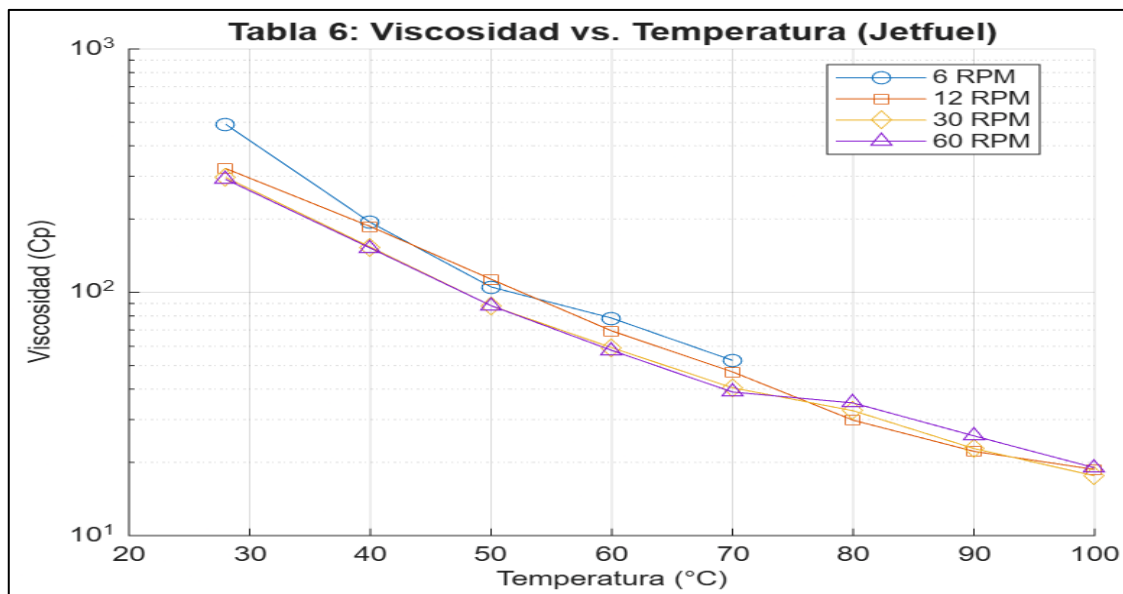


Figura 8.

Ensayos experimentales de viscosidad del combustible gasolina en función de la temperatura

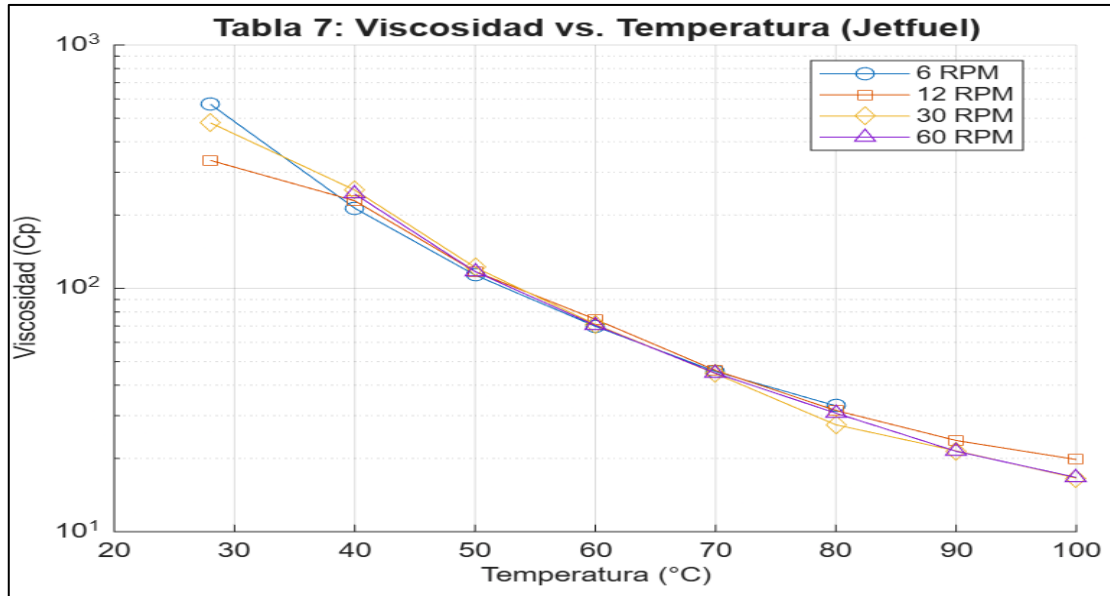


Figura 9.

Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 1 Jetfuel.

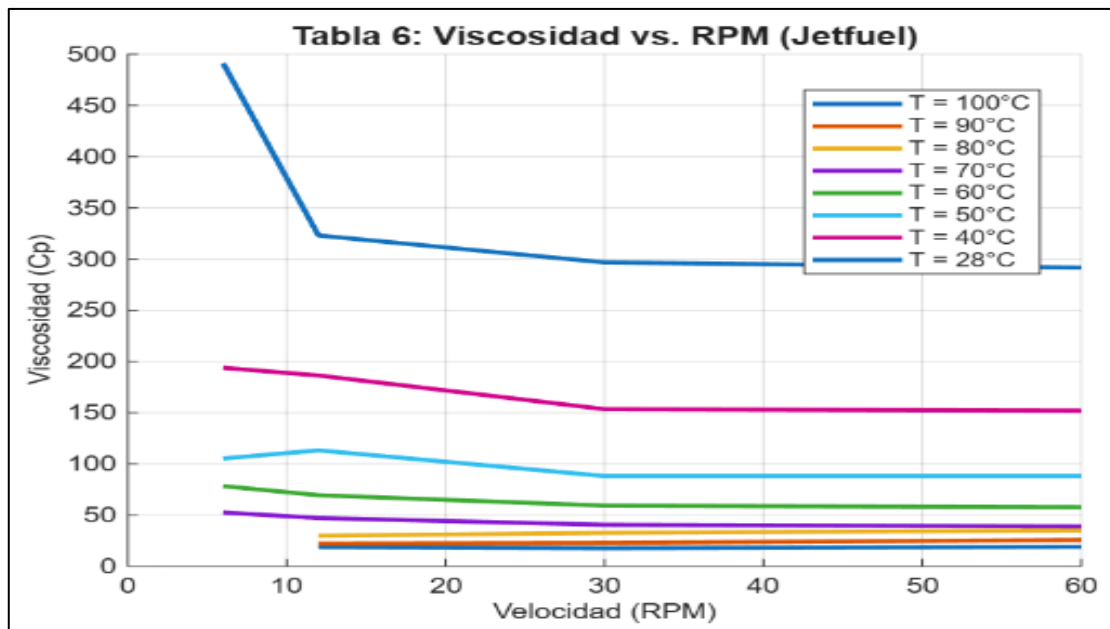


Figura 10.

Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo 2 Jetfuel.

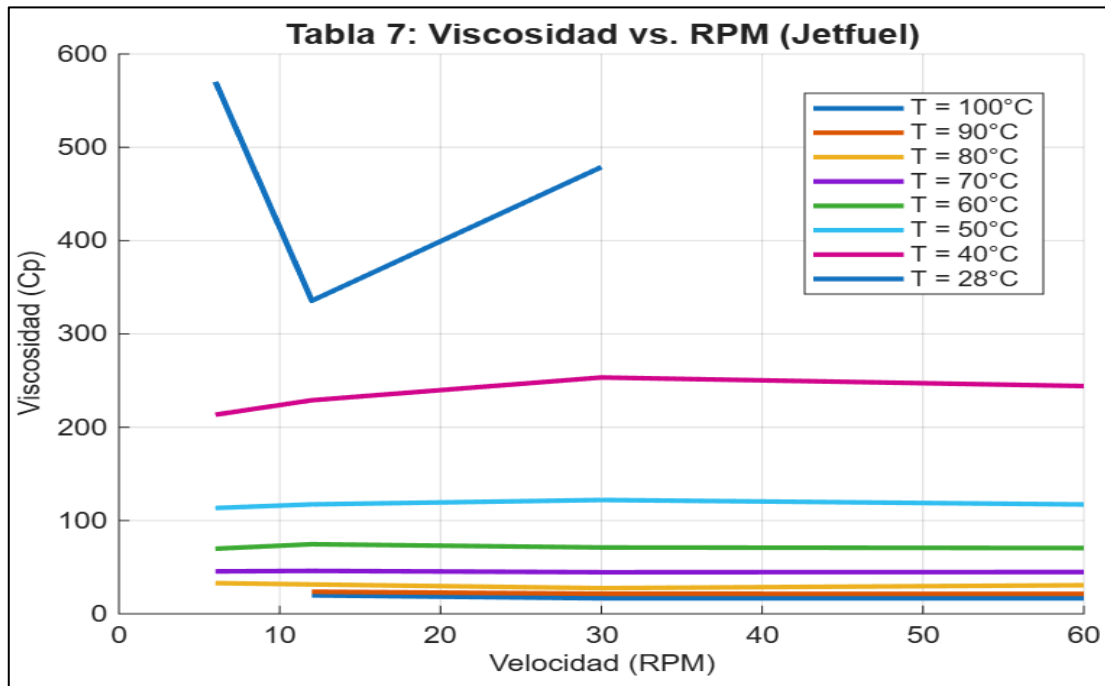


Tabla 9.

Ensayos experimentales de viscosidad del combustible gasolina en función de la temperatura

DATOS DE VISCOSIDAD OBTENIDOS DE LA MUESTRA GASOLINA									
HORA DE INICIO:		07:30:00	HORA DE TÉRMINO		17:30	Rotor	#1		
TEMP.		6 RPM		12 RPM		30 RPM		60 RPM	
°C	°F	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)	μ (Cp)	FS(%)
100	212	-	-	-	-	6.7	3.3	5.5	5.5
90	194	-	-	-	-	7.1	3.5	6	6
80	176	-	-	-	-	7.9	3.9	6.6	6.6
70	158	-	-	-	-	8.5	4.2	7.6	7.6
60	140	-	-	15	3	10	5	8.8	8.8
50	122	-	-	17.4	3.4	11.6	5.8	10.5	10.5
40	104	-	-	20.8	4.1	13.9	6.9	13.3	13.3
28	82.4	30	3	-	-	18.4	9.2	18.3	18.3

Nota: Los datos corresponden a ensayos de laboratorio realizados por EP Petroecuador y se presentan para el análisis del comportamiento reológico del combustible gasolina.

Los resultados observados en los ensayos para el combustible gasolina, presenta la misma tendencia de los combustibles anteriores, manteniendo la correlación inversa de sus propiedades. Esta relación es característica de los líquidos newtonianos y no newtonianos, donde el aumento de la temperatura disminuye la viscosidad de los líquidos. La gasolina al ser la fracción de destilación más ligera tiene valores de viscosidad mucho menores dentro de los rangos de temperatura utilizado para los ensayos, figuras 11.

En la tabla 8 hay datos que no existen en los ensayos de 6 y 12 RPM en altas temperaturas, debido a las bajas viscosidades, lo que hace que las mediciones en el viscosímetro de rotor tengan una menor precisión a velocidades bajas. La gasolina, al igual que el Jetfuel, presenta una relación inversa entre la viscosidad y las RPM en los rangos de 12 a 30 manifestando un comportamiento no newtoniano. Sin embargo, frente al diésel y el Jetfuel, la gasolina demuestra una menor dependencia de la viscosidad con el esfuerzo de la cizalla.

La grafica 12, muestra que el comportamiento de las viscosidades a partir de 30 RPM se muestra planas o con una pendiente muy ligera, acercándose a un comportamiento ideal, casi Newtoniano. Este comportamiento define que a altas velocidades la variación de la

viscosidad es mínima permitiendo una mayor estabilidad reológica en comparación del diésel.

Figura 11.

Gráfica Viscosidad Vs Temperatura ensayo gasolina

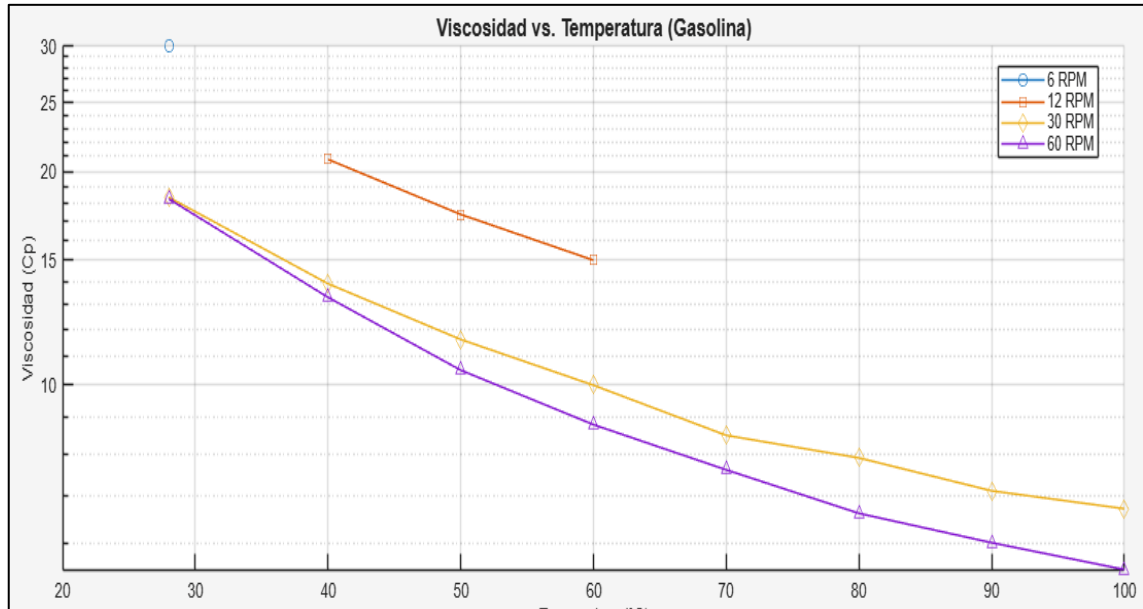
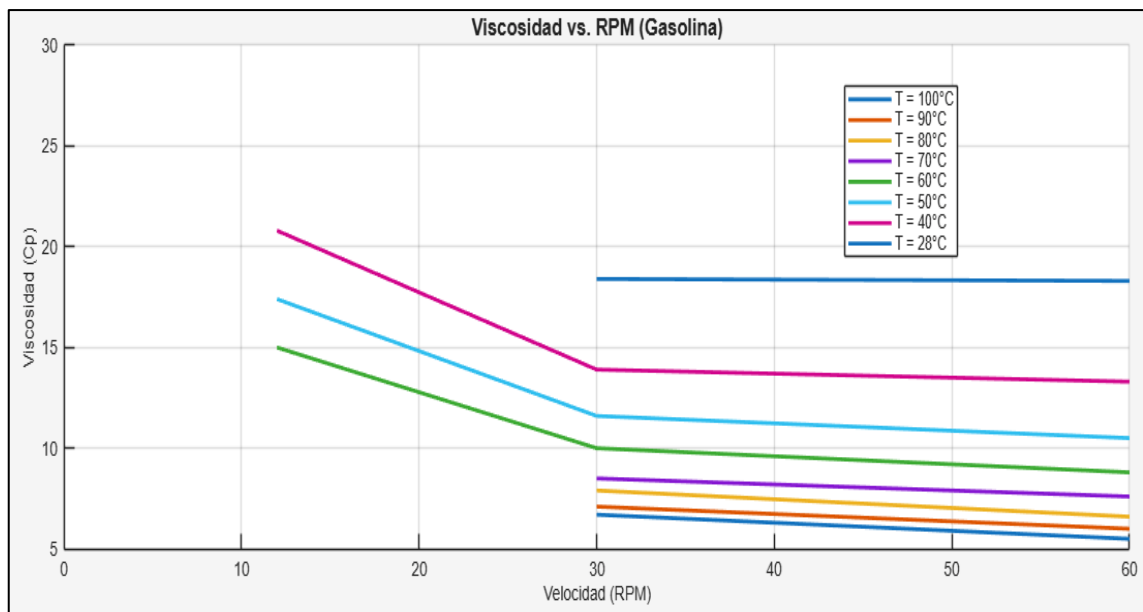


Figura 12.

Gráfica Viscosidad Vs RPM ensayo gasolina



3.2. Resultados del modelo matemático y simulaciones numéricas

3.2.1. Modelo numérico para análisis de flujos en tuberías

Una de las herramientas más comunes para el análisis de pérdidas de carga por fricción en tuberías es el modelado con base en la ecuación de Darcy-Weisbach, al implementarlo en una simulación en MATLAB, es necesario describir la base teórica y metodología de cálculo, específicamente para encontrar el factor de fricción. El cual es un parámetro adimensional capaz de cuantificar la resistencia de un fluido por la fricción con la tubería, este valor permite el cálculo de pérdida de energía.

Para lograr simular y entender el comportamiento del flujo y lograr calcular un valor de pérdida aproximado en el sistema de tuberías, se implementó un modelado unidimensional en MATLAB, el fundamento de esta simulación tiene su base en la ecuación Darcy-Weisbach, misma que se considera una de las más precisa para la determinación de pérdidas de carga en un sistema de flujo a presión (Feng et al., 2024).

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

Donde:

h_f : Pérdida de carga por fricción (m), representa la pérdida de energía del fluido debido a la resistencia de la pared de la tubería.

f : Factor de fricción (adimensional)

L : Longitud de la tubería (m)

D : Diámetro de la tubería (m)

v : Velocidad media del flujo (m/s)

g : Gravedad (9.81 m/s²)

Es importante mencionar que el factor de fricción es un parámetro que tiene dependencia en el número de Reynolds (Re), este es un parámetro adimensional que compara las fuerzas inerciales frente a las fuerzas viscosas dentro de un fluido en movimiento, la rugosidad relativa es una propiedad geométrica de la superficie interna de una tubería, que describe el grado de aspereza o irregularidad presente en sus paredes. Esta aspereza genera turbulencias microscópicas en el flujo, aumentando la resistencia a su desplazamiento y, por tanto, la pérdida de energía por fricción de la tubería de transporte. Para el régimen turbulento, existen diversas expresiones empíricas para calcular el factor de fricción. La ecuación de Colebrook–White (1939) es la formulación más aceptada para representar el comportamiento del flujo turbulento en tuberías rugosas; sin embargo, es implícita y requiere métodos iterativos para su resolución. Con el fin de evitar iteraciones y facilitar su implementación en modelos computacionales, Swamee y Jain (1976) desarrollaron una aproximación explícita derivada de la ecuación de Colebrook–White, obtenida mediante ajuste matemático y validación experimental.

Para los flujos que son laminares, $Re < 2000$, el factor de fricción f puede definirse directamente con la siguiente fórmula $f = 64/Re$, mientras que, para flujos turbulentos, $Re > 4000$, es necesaria la implementación de una ecuación que aproxime el factor de fricción. Para esta investigación se decidió utilizar la expresión de Swamee-Jain, esto hace referencia a una ecuación que permite una aproximación bastante certera al factor de fricción en zonas de flujo turbulentos. Esta se encuentra definida matemáticamente por la siguiente expresión (Li et al., 2025):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds = $\frac{\rho v D}{\mu}$

ϵ : Rugosidad absoluta de tubería

D: Diámetro interno de la tubería (m)

ρ : Densidad de fluido (kg/m^3)

μ : Viscosidad dinámica de flujo (Pa. s)

La implementación de estas ecuaciones en el software MATLAB se ha estructurado de manera que es capaz de recibir los parámetros físicos de las tuberías y las propiedades de los fluidos, el script permite el cálculo de Reynolds y, en función del flujo si es laminar o no, aplica la formula correspondiente para encontrar el factor de fricción y conjuntamente la determinación de la pérdida de carga en el tramo de la tubería.

3.2.2. Parámetros fijos de simulación del poliducto y operación

El modelo de simulación que se implementa en MATLAB requiere parámetros físicos del ducto y variables operativas, donde los valores de rugosidad, velocidad de flujo y presión de bombeo son de suma importancia para una simulación con características reales para el trabajo realizado.

Rugosidad de Tubería. – Este valor de 4.57×10^{-5} metros se establece de acuerdo con las especificaciones de la Asociación Americana de Gas, AGA. Organismo que establece que este es el estándar recomendado para tuberías de acero comercial nuevas o lisas que se utilizan en el transporte de hidrocarburos (Mott, 2015).

Viscosidad de Flujo. – La velocidad operativa se establece en 1.5 m/s, considerada como una velocidad ideal y de referencia para la ingeniería de transporte de fluido en tuberías de diámetros grandes. Las velocidades de optimas de diseño se establecen en el rango de 1 a 2.5 m/s (Peñaranda, 2018).

Presión inicial de Bombeo. – Este valor se establece como condición frontera, 20 bar o 20×10^5 Pa, como un valor de diseño realista en la ingeniería de poliductos, permitiendo el fluido del hidrocarburo con la energía suficiente capaz de superar las pérdidas por fricción en el primer segmento de la tubería (EP PETROECUADOR, 2015).

3.2.3. Parámetros de Propiedades de Fluidos

Esta sección permite conocer la razón de selección de los parámetros de características de los fluidos a transportar. Es importante mencionar que estas propiedades se seleccionan para un escenario de operación de 50 °C, debido a que esta temperatura se considera como promedio dentro del poliducto (Balcazar, 2020).

Selección de Viscosidad. – Para los combustibles diésel y gasolina se eligió un valor de viscosidad medido a 60 RPM debido a que en estas velocidades esta característica tiende a la estabilización, es decir, mantiene un comportamiento casi Newtoniano dentro el poliducto.

Densidades. – Los valores utilizados en la simulación se han obtenido de acuerdo con las normativas y tablas de especificaciones de combustibles estándar para la industria. Según las normas ASTM D975 y ASTM D4814, que establecen densidades que oscilan entre 820 – 870 Kg/m³ y 720 – 775 Kg/m³, para diésel y gasolina, respectivamente. Las densidades se tomaron de normas ASTM D975 y D4814.

3.2.4. Parámetros Económicos y de Eficiencia

Dentro de esta sección se abordan los análisis para los costos y potencias requeridas para el funcionamiento de la estación de bombeo.

Eficiencia de Bombeo. – Los valores de eficiencia de motor al 0.85 y del rotor al 9.0, se han establecido de acuerdo con los parámetros de operación típicos en este tipo de bombas utilizadas para el transporte de hidrocarburos (Fundación Red de Energía BUN-CA, 2011).

Costo de Electricidad. – El valor de \$0.10 se establece de acuerdo al plan tarifario presentado por la compañía eléctrica CNEL EP en la resolución Nro. ARCONEL-022/2024 (CNEL EP, 2025).

Horas anuales de Operación. – Se asume que la estación opera por un promedio de 15 horas diarias durante los 365 días del año, reflejando de esta manera una operación real no continua.

3.2.5. Ecuaciones para el Cálculo

A. Ecuaciones Fundamentales

La simulación tiene su base en la ecuación de Darcy-Weisbach y la aproximación de Swamee-Jain. Adicional de las que se han mencionado anteriormente se utilizan las siguientes:

Perdida_{total}. – Aquí se almacena la pérdida total de presión, medido en bar, que se acumula al final del ducto.

Potencia_{KW}. – Esta variable permite el almacenamiento de la potencia eléctrica requerida, medida en KW, Kilo watts.

Energía_{Annual}. – Permite el almacenamiento del consumo energético anual, medido en MWH, mega watts por hora.

Costo_{anual}. – Permite el cálculo de los costos operativos de manera anual, expresado en dólares (USD).

B. Cálculos de Pérdidas y Perfil de Presión

La simulación presenta un perfil de presión incremental a lo largo del ducto. Para ello es necesario la aplicación de las siguientes fórmulas.

1. Pérdida de carga por Fricción (h_f)

La pérdida de carga en cada segmento de la tubería se realiza aplicando de manera directa la ecuación de Darcy-Weisbach, ver apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

2. Pérdida de Presión

La pérdida de carga pasa a convertirse en pérdida de presión al usar la relación fundamental de hidrostática que se realiza con la siguiente ecuación matemática:

$$P_{segmento} = \rho * g * h_{fsegmento}$$

En esta expresión, $P_{segmento}$ representa la presión correspondiente al tramo analizado; ρ corresponde a la densidad del fluido; g es la aceleración de la gravedad y $h_{f,segmento}$ expresa la pérdida de carga por fricción en el segmento considerado.

3. Presión Acumulada

Para cada final de segmento se debe realizar el cálculo de presión acumulada, lo cual se realiza mediante la aplicación de la ecuación:

$$P_{j+1} = P_j - \Delta P_{segmento}$$

En esta relación, P_j corresponde a la presión en el punto considerado, P_{j+1} representa la presión en el punto subsiguiente y $\Delta P_{segmento}$ expresa la pérdida de presión asociada al tramo evaluado.

Esta ecuación expresa el principio, que la presión disminuye conforme el fluido se mueve por la tubería, esto debido a la pérdida de energía por fricción.

Esta ecuación expresa el principio, que la presión disminuye conforme el fluido se mueve por la tubería, esto debido a la pérdida de energía por fricción.

C. Cálculo de Bombeo, Consumo y Costo

Determinada las pérdidas de presiones, se procede a realizar el cálculo de parámetros de bombeo y económicos.

Potencia Hidráulica. – Se refiere a la potencia necesaria para mover el flujo y mantener superado el índice de pérdida de presión total, esto se realiza mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$Potencia_{hidráulica} = Q * \Delta P_{Total}$$

En esta expresión, Q representa el caudal volumétrico del fluido y ΔP_{total} corresponde a la pérdida total de presión considerada en el análisis hidráulico.

Potencia Eléctrica al rotor. – La potencia hidráulica calculada se convierte en potencia eléctrica real que requiere el rotor, medida en Kilo Watts. Este cálculo se lo debe realiza teniendo en consideración los valores de eficiencia de la bomba (η_{bomba}) y del motor (η_{rotor}).

$$Potencia_{KW} = \frac{Potencia_{hidráulica}}{\eta_{bomba} * \eta_{rotor} * 1000}$$

Energía y Costo Anual. – La energía y el costo anual se calculan a partir de la potencia eléctrica requerida y las horas de operación, bajo esta definición matemática:

$$Energía_{Anual}(MWH) = \frac{Potencia_{kW} * Horas_{Anuales}}{1000}$$

$$Costo_{Anual} = Energía_{Anual}(MWH) * Costo_{eléctrico} * 1000$$

Figura 13.

Resultados de la simulación hidráulica del poliducto Libertad–Manta para diferentes escenarios de combustible



```
Command Window
>> perdida_libertad_manta_3

=====
                Resultados de la Simulación
=====

--- ESCENARIO 1: Diesel ---
Numero de Reynolds (Re): 9497 (Flujo Turbulento)
Pérdida total de presión: 203.05 bar
Potencia eléctrica estimada: 2017.35 kW
Energía anual consumida: 11044.97 MWh
Costo anual estimado: 1104497.27 USD/año

--- ESCENARIO 2: Gasolina ---
Numero de Reynolds (Re): 27214 (Flujo Turbulento)
Pérdida total de presión: 138.06 bar
Potencia eléctrica estimada: 1371.72 kW
Energía anual consumida: 7510.14 MWh
Costo anual estimado: 751014.41 USD/año
=====
|
>>
```

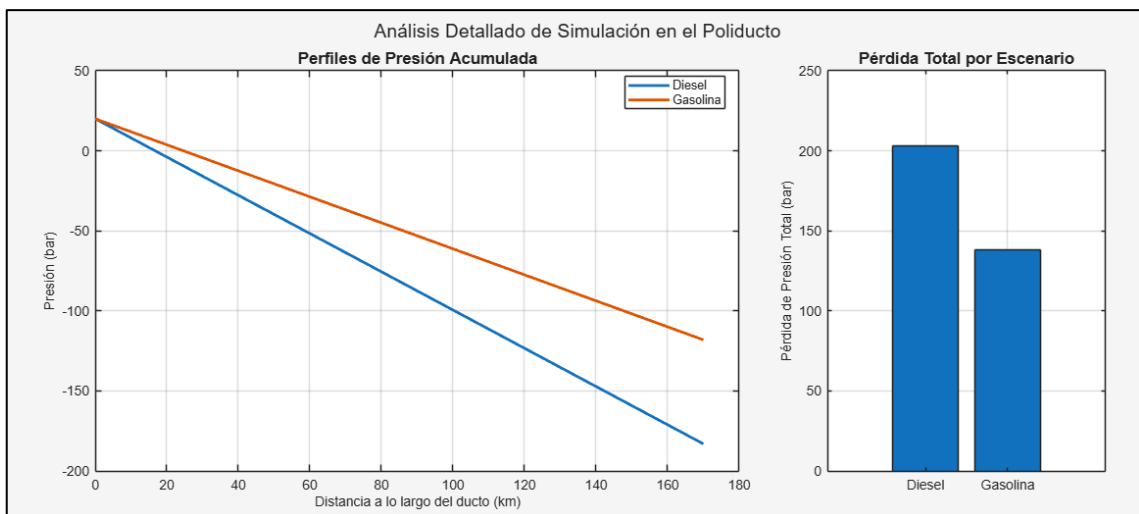
La figura 13 presenta los resultados numéricos referente al impacto que tiene la viscosidad del líquido transportado como métrica clave. Dentro de este resumen se puede observar una pérdida total de 203.05 bar y 138.06 bar para diésel y gasolina, respectivamente. A pesar de ser derivados diferentes es importante resaltar que la diferencia del 47.05% se debe a la viscosidad, por lo tanto, es imperioso considerar este factor para el diseño y operación de los sistemas de transportes de fluidos. La pérdida de presión indica que las

bombas auxiliares deben generar una presión significativamente alta para superar los índices de fricción y mantener un flujo constante hasta su terminal final.

Estas pérdidas de presiones tienen un costo significativo en cuanto a la potencia eléctrica requerida por el sistema de bombeo, en el caso de la transportación del diésel se necesita alrededor de 2,017.35 KW, mientras que para la gasolina es necesario mantener un consumo de 1,371.72 KW. De esta manera los consumos anuales pueden llegar a ser de 11,044.97 MWh y de 7,510.14 MWh para el diésel y gasolina, respectivamente. Lo que se convierte en un gasto operativo económico que bordea 1'104,497.27 dólares para la transportación del diésel, mientras que para el sistema de transporte de gasolina se presupuesta un gasto de 751,014.41 dólares de manera anual. Estos valores representan el uso del sistema de bombeo las 15 horas del día.

Figura 14.

Pérdidas en el poliducto Libertad - Manta



Fuente: Elaboración propia mediante simulación hidráulica del poliducto Libertad–Manta.

La figura 14, muestra un detalle técnico de la pérdida de presión durante el trayecto de los 170 km de poliducto, donde se puede observar que la presión inicial es de 20 bar y esta va disminuyendo en ambos escenarios, lo que es normal según Darcy-Weisbach en

un flujo estable en una tubería uniforme. Esta grafica representa el gradiente de presión que se define como la caída de presión por unidad de longitud, y representa la resistencia al flujo a lo largo de la tubería. Éste está relacionado directamente con el factor de fricción. La diferencia entre las curvas presentadas se debe a la diferencia de viscosidad, al ser dos productos diferentes.

3.2.6. Mejoradores Químicos o Agente Reductores de Arrastre

Los mejoradores químicos de flujo, también conocidos como Agentes reductores de arrastre (DRA), polímeros de alto peso molecular que se inyectan en concentraciones pequeñas, generalmente en ppm (partes por millón), dentro de los oleoductos o poliductos para la reducción de pérdidas por fricción durante un flujo turbulento, una de las aplicaciones más destacadas de estos DRA es mejorar la capacidad de transporte en el ducto, logrando de esta manera la reducción de consumo de energía dentro de las estaciones de bombeo, lo que finalmente recae en un ahorro significativo en la economía de la industria (Laurencio & Retirado, 2023).

Mecanismo de Acción

Es importante mencionar que el mecanismo de reducción de arrastre no tiene como función disminuir la viscosidad de un líquido, sino realizar una supresión de turbulencia a microescala. Cuando se transportan los líquidos a altos gradientes de corte se forman remolinos y vórtices, mismos que logran disipar la energía del transporte en forma de calor aumentando de esta manera la resistencia friccional. Los polímeros de DRA se conforman de moléculas largas y flexibles, que se estiran y orientan en dirección del flujo, esta acción repetitiva logra amortiguar las turbulencias generadas y evitan la formación de los remolinos. Lo que suaviza el flujo minimizando la energía disipada logrando una menor perdida en la carga (Hernández et al., 2018).

Ecuación y Modelado

El efecto del DRA se puede cuantificar mediante el porcentaje de reducción (%DR) lo que se puede definir matemáticamente a partir de la reducción de presiones ΔP o mediante el factor de fricción f , de acuerdo con las siguientes fórmulas (Laurencio et al., 2022):

$$DR = \left(\frac{\Delta P_{sin\ DRA} - \Delta P_{con\ DRA}}{\Delta P_{sin\ DRA}} \right) \times 100 \%$$

$$DR = \left(\frac{f_{sin\ DRA} - f_{con\ DRA}}{f_{sin\ DRA}} \right) \times 100 \%$$

Para esta investigación se realiza una simulación con modelado de DRA ajustado al factor de fricción para el flujo turbulento. En este caso en particular se usa la ecuación de Swamee-Jain. Este factor se encuentra mediante la siguiente fórmula (Pérez et al., 2021):

$$f_{conDRA} = f_{sinDRA} \times (1 - DR)$$

En esta expresión, f_{conDRA} corresponde al factor de fricción bajo la influencia del aditivo reductor; f_{sinDRA} representa el valor base del factor de fricción obtenido sin la presencia de aditivos, mientras que DR define la eficiencia asociada al químico mejorador.

Es importante aclarar que al utilizar el modelo Darcy-Weisbach la pérdida de carga y la potencia de bombeo requerida disminuirán en una misma proporción que el factor de fricción. Porque en la ecuación de Darcy-Weisbach la pérdida de presión es proporcional al factor de fricción. Si el factor de fricción disminuye, la caída de presión también disminuye en la misma proporción. Al reducirse la pérdida de presión, la bomba requiere menos energía para vencer esa resistencia, y por lo tanto la potencia de bombeo también disminuye.

Simulación de Pérdidas de Presión, Potencia y Costos en el Poliducto

Para el tercer escenario se asumió una reducción de arrastre del **30%**, valor consistente con rangos reportados en aplicaciones industriales de aditivos reductores de fricción para transporte de hidrocarburos. Diversos estudios indican que los DRA pueden generar reducciones en pérdidas de presión entre **20% y 50%**, dependiendo del fluido, la concentración del aditivo y las condiciones de operación (SPE, 2021; Zhang et al., 2020). Por lo tanto, se seleccionó un valor intermedio representativo del desempeño típico del sistema, garantizando una estimación conservadora y realista para el análisis operacional.

Consultar el anexo 1 en la que se presenta el código desarrollado para la simulación del comportamiento hidráulico del poliducto, considerando tres escenarios de operación: transporte de diésel, transporte de gasolina y transporte de diésel con aplicación de Agente Reductor de Arrastre (DRA).

El script incluye la definición de parámetros geométricos del ducto, propiedades físicas de los fluidos a 50 °C, condiciones operativas, cálculo del número de Reynolds, factor de fricción, pérdidas de presión acumuladas, potencia de bombeo requerida, consumo energético anual y costos asociados. Asimismo, se muestran los perfiles de presión a lo largo del poliducto y la comparación de pérdidas totales de presión para cada escenario analizado.

Figura 15.

Resultado de simulación para los escenarios diésel, gasolina, diésel + DRA

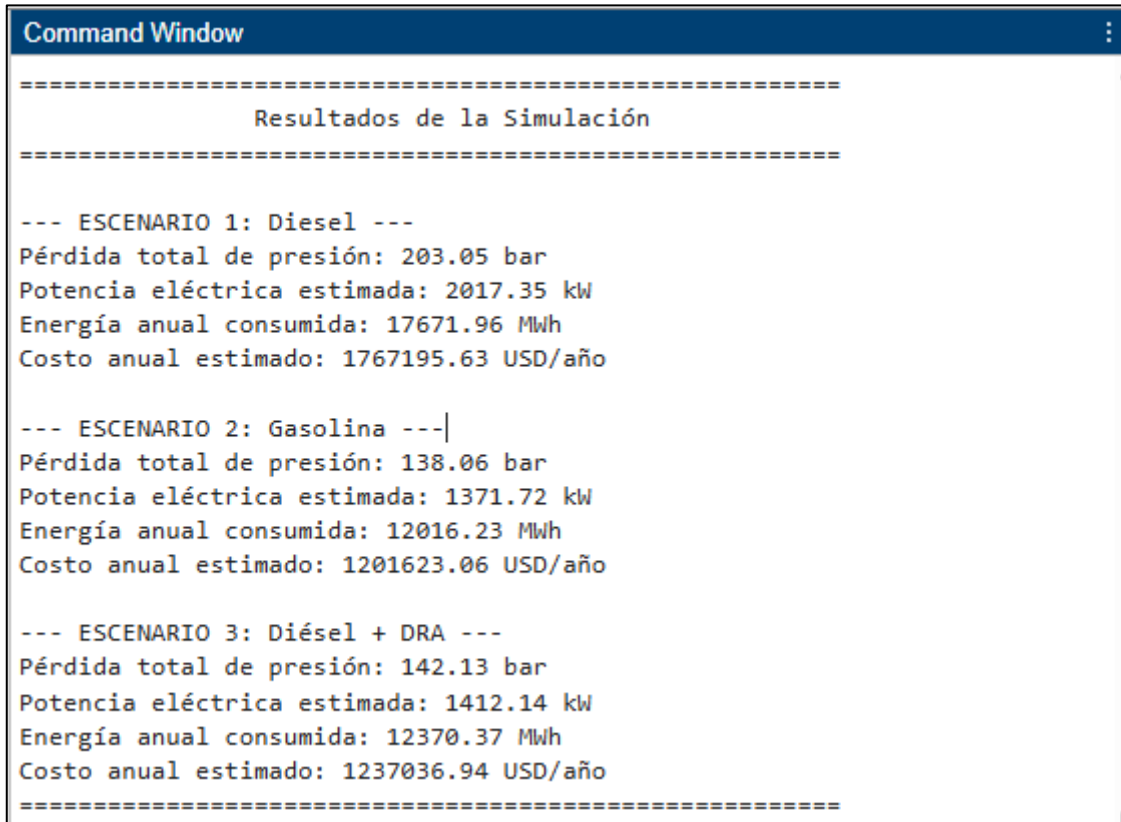


Figura 16.

Detalles de simulación del sistema de bombeo para diésel + DRA

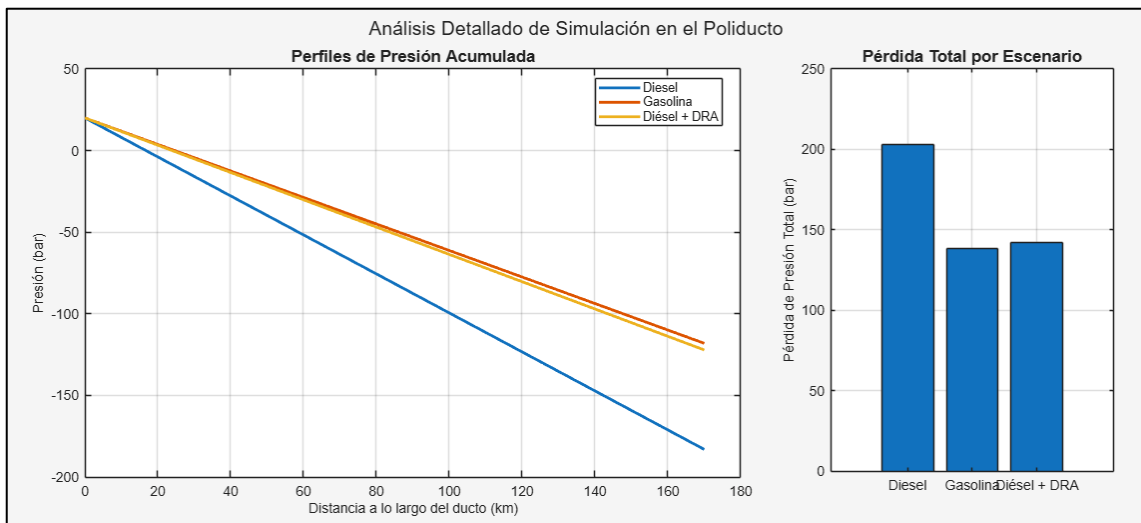


Figura 17.

Simulación del cálculo de porcentaje de DRA

```
>> calculo_DRA
=====
  Análisis de la Reducción de Arrastre (Drag Reduction)
=====
Pérdida de Presión sin DRA: 203.05 bar
Pérdida de Presión con DRA: 142.13 bar
-----
Porcentaje de Reducción de Arrastre (DR%): 30.00%
=====
>>
```

Como se puede observar en la figura 15 las pérdidas disminuyen a 142.13 bar y una potencia eléctrica estimada de 1412.14 KW, consumiendo un total de 12,370.37 MWh durante un periodo anual, lo que genera un gasto económico de 1'237,036.94 dólares. La figura 16 muestra la comparativa entre los sistemas base (sin DRA) y el sistema de bombeo con DRA, y su comparativa en cuanto a presiones necesarias para el bombeo del combustible. Finalmente, la figura 17 presenta la diferencia de pérdida de presión. y el desarrollo cálculo de su porcentaje.

3.2.7. Validación de estadística del efecto del DRA mediante ANOVA

La reducción de la pérdida de presión debe ser validada mediante un análisis estadístico que permita determinar que el uso de DRA es real y no un resultado aleatorio. Para tal efecto se aplica un Análisis de Varianza (ANOVA) (Bàguena, 2013), mediante esta herramienta se compara las mediciones realizadas en los ensayos para determinar si la diferencia es significativa y los químicos de mejoramiento funcionan de manera adecuada.

Para este proyecto de investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

H₀: No existe una diferencia estadística significativa en la pérdida de presión total entre los escenarios de combustibles puros y el escenario de combustibles con aditivos (DRA)

H₁: La pérdida de presión en el sistema de bombeo con aditivos de mejoramiento (DRA) es significativamente menor a los escenarios de combustibles puros.

Para la validación mediante ANOVA, se ejecuta una simulación Monte Carlo de 100 iteraciones, dentro de los rangos típicos de velocidades operativas, es decir entre 1.4 y 1.6 m/s. dentro de este contexto se calcula las pérdidas de presiones que corresponden a las pérdidas totales de presión por fricción dentro de todo el recorrido del poliducto. A diferencia del perfil de presión acumulada, que muestra las presiones en 100 segmentos, esta es un valor único de presión que representa la energía que se disipa mediante la fricción desde el inicio hasta el final del ducto, misma que se calcula mediante la ecuación de Darcy-Weisbach para la pérdida de la carga, medida en bar.

Validación Estadística y Visualización Estética: Prueba ANOVA

```
% 1. Parámetros del Poliducto y Fluidos (valores de tesis)  
L = 170000;    % Longitud en metros (m)  
D = 0.254;    % Diámetro interno en metros (m)  
epsilon = 4.57e-5; % Rugosidad de la tubería en metros (m)  
rho = 850;    % Densidad del diésel en kg/m^3  
mu = 34.10e-3; % Viscosidad del diésel a 50°C en Pa·s  
  
% 2. Rango de Simulación  
num_simulaciones = 100;  
velocidades = linspace(1.4, 1.6, num_simulaciones); % Rango de velocidad en m/s  
eficiencia_DRA = 0.30;    % 30% de reducción de arrastre  
  
% 3. Generar los Grupos de Datos de Pérdida de Presión  
dP_sinDRA = zeros(size(velocidades));  
dP_conDRA = zeros(size(velocidades));  
  
for i = 1:num_simulaciones  
    v = velocidades(i);  
  
    % Número de Reynolds
```

```

Re = (rho * v * D) / mu;

% Factor de fricción sin DRA (Swamee-Jain)
f_sin = 0.25 / (log10((epsilon/D)/3.7 + 5.74 / (Re^0.9)))^2;

% Pérdida de presión sin DRA
dP_sinDRA(i) = (f_sin * (L/D) * (v^2 / (2*9.81))) * rho * 9.81 / 1e5; % En bar

% Factor de fricción con DRA (reducción del 30%)
f_con = f_sin * (1 - eficiencia_DRA);

% Pérdida de presión con DRA
dP_conDRA(i) = (f_con * (L/D) * (v^2 / (2*9.81))) * rho * 9.81 / 1e5; % En bar
end

% 4. Preparar Datos y Etiquetas para ANOVA y Gráficos
datos_anova = [dP_sinDRA; dP_conDRA];
etiquetas_grupos = [repmat({'Sin DRA'}, num_simulaciones, 1); repmat({'Con DRA'},
num_simulaciones, 1)];

% 5. Realizar la Prueba ANOVA
% 'off' suprime el gráfico de ANOVA por defecto para personalizarlo después
[p, tabla_anova, stats] = anova1(datos_anova, etiquetas_grupos, 'off');

% 6. Visualización Estética de los Resultados
figure('Color', 'white');

% a. Gráfico de Dispersión para mostrar los datos
subplot(1, 2, 1);
scatter(ones(size(dP_sinDRA)), dP_sinDRA, 'filled', 'MarkerEdgeColor', [0.1 0.1 0.1],
'MarkerFaceColor', [0.1 0.7 0.9]);
hold on;
scatter(ones(size(dP_conDRA)) + 1, dP_conDRA, 'filled', 'MarkerEdgeColor', [0.1 0.1
0.1], 'MarkerFaceColor', [0.9 0.4 0.1]);
hold off;
xlim([0.5 2.5]);
set(gca, 'XTick', [1 2], 'XTickLabel', {'Sin DRA', 'Con DRA'}, 'FontSize', 10);
ylabel('Pérdida de Presión (bar)', 'FontSize', 12);
title('Dispersión de los Datos', 'FontSize', 12);
grid on;

% b. Gráfico de Caja (Box Plot) para la comparación
subplot(1, 2, 2);
boxplot(datos_anova, etiquetas_grupos, 'Colors', [0.1 0.7 0.9; 0.9 0.4 0.1], 'Widths', 0.5,
'Symbol', 'o', 'OutlierSize', 6);
set(gca, 'FontSize', 10);
ylabel('Pérdida de Presión (bar)', 'FontSize', 12);
title('Comparación de Pérdidas de Presión (ANOVA)', 'FontSize', 12);

```

```

grid on;

% c. Añadir el valor p al gráfico
anotacion = sprintf('p-valor = %.4e\nConclusión: p < 0.05, diferencia significativa', p);
annotation('textbox', [0.5, 0.8, 0.4, 0.1], 'String', anotacion, 'FitBoxToText', 'on',
'BackgroundColor', 'white', 'FontSize', 10);

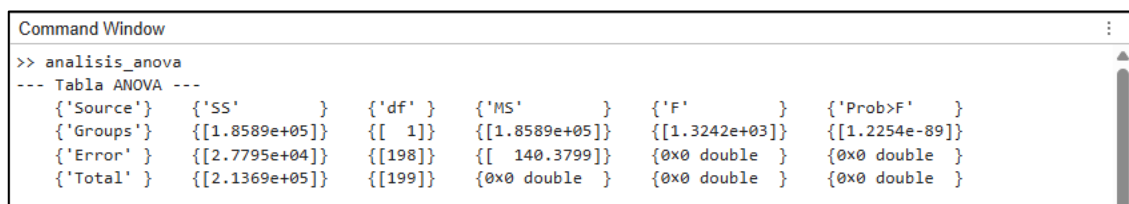
sgtitle('Análisis Estadístico del Efecto del DRA', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');

% 7. Presentación de la tabla ANOVA en la ventana de comandos
fprintf('--- Tabla ANOVA ---\n');
disp(tabla_anova);

```

Figura 18.

Resultado de simulación de análisis ANOVA, MATLAB.



The screenshot shows the MATLAB Command Window with the following output:

```

>> analisis_anova
--- Tabla ANOVA ---
{'Source'}   {'SS'      }   {'df' }   {'MS'      }   {'F'       }   {'Prob>F'  }
{'Groups'}   {[1.8589e+05]} {[ 1]}   {[1.8589e+05]} {[1.3242e+03]} {[1.2254e-89]}
{'Error'}    {[2.7795e+04]} {[198]}  {[ 140.3799]} {0x0 double } {0x0 double }
{'Total'}    {[2.1369e+05]} {[199]}  {0x0 double } {0x0 double } {0x0 double }

```

La figura 18, muestra la tabla por MATLAB para el análisis ANOVA, la cual se detalla a continuación:

Columna SS (Suma de cuadrados). – Representa la variabilidad de los datos.

Group (grupos). – Mide la variación entre los dos grupos de iteraciones del combustible uno sin DRA y otro con DRA, el valor obtenido, al ser grande, genera la principal diferencia.

Error. - Mide la variación dentro de cada grupo debido a la variación de la velocidad en la simulación.

Columna df (Grados de Libertad). –

Group (grupo). – Número de grupo menos 1

Error. – Número total de simulaciones menos el número de grupos (200-2)

MS (media cuadrática). – Relación entre SS y df, representando la varianza

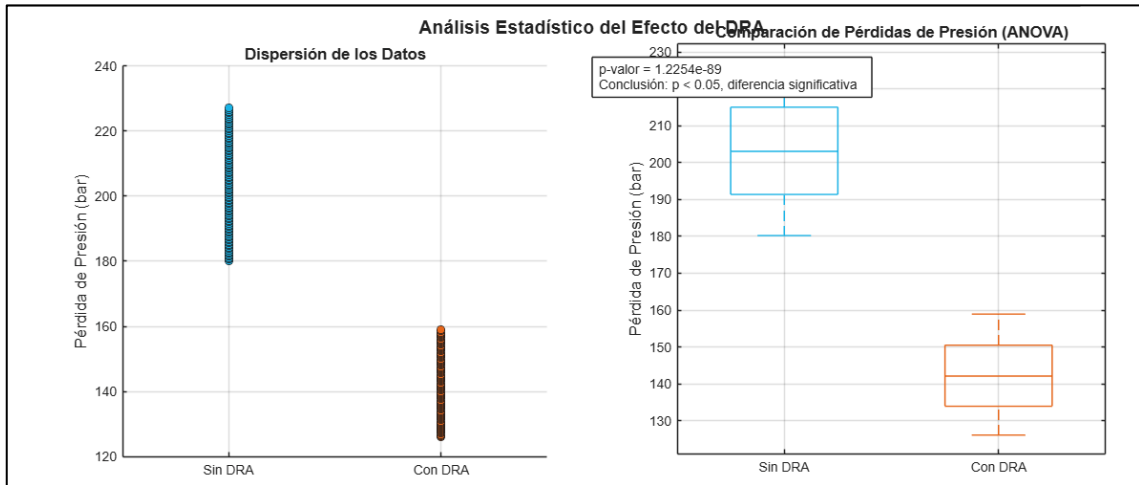
Estadístico F. – Varianza explicada por DRA y varianza residual o de error

p-valor. – Posibilidad de la observación de datos para que la hipótesis nula es cierta.

Finalmente, la tabla muestra que el valor p es extremadamente bajo, menor a 0.05, permitiendo rechazar la hipótesis nula. Confirmando que el efecto del agente reductor es estadísticamente significativo, es decir, que los cambios de presiones reflejados en los combustibles con y sin DRA no se puede atribuir al cambio de velocidades de flujo dentro de los ductos.

Figura 19.

Gráfica de análisis ANOVA. de acuerdo con los datos generados en MATLAB



La validación de los datos referente a la inyección de aditivos para mejorar el flujo del combustible dentro del poliducto se realiza la prueba ANOVA los cuales se presentan de manera visual en la tabla generada por MATLAB. En la figura 19 se muestra la dispersión que tienen los datos de cada escenario, azul para sistema sin DRA, naranja para sistema con DRA, esto indica que al no existir un solapamiento entre los datos de ambos grupos la pérdida de presión tiene una diferencia significativa, los gráficos de cajas tienen la representación de los rangos intercuartílicos y sus marcas de mediana notoriamente con separación. De mostrando una vez más que los resultados obtenidos no son eventos aislados, mas, bien al contrario, los datos se vuelven consistentes aceptando que los mejoradores funcionan como se espera.

Los resultados más importantes para esta prueba ANOVA es el valor de p que, para este caso en particular, arroja como resultado $1.2254e^{-89}$, valor que se aproxima a cero y es mucho menor que el nivel de significancia de 0.05. por tal razón se reafirma la aceptación de la hipótesis alternativa, que expresa la diferencia significativa entre ambos grupos.

CONCLUSIONES

El análisis a profundidad de las operaciones en el poliducto Libertad – Manta, afirma que este cuenta con una distancia de 170 km de longitud y una capacidad de flujo de 400 barriles por hora. Además, revela que esta infraestructura sufre de pérdidas de presión afectando la eficiencia del transporte de combustible y que es necesaria la intervención. Mediante la simulación numérica se puede describir una reducción de pérdida de 142.13 bares, reduciendo el consumo anual de energía eléctrica en un estimado de 12,370.37 MWh.

La efectividad de los químicos mejoradores de flujo se puede demostrar su eficiencia, tanto en las simulaciones numéricas realizados, como en un informe de la empresa PETROECUADOR EP en el año 2019. Ambos escenarios admiten que la inyección de un polímero reductor de fricción en el poliducto Libertad – Manta permite aumentar la tasa de bombeo en un 30% aproximadamente, optimizando el sistema de transporte de combustibles.

La implementación de los polímeros reductores además de optimizar el sistema de transporte también coadyuva a la optimización de los recursos económicos de la industria. En este caso en particular, disminuir la resistencia del flujo permite un ahorro anual de aproximadamente 673,000 dólares bajo el esquema de operación de 5 horas. Sin embargo, considerando una optimización de máxima capacidad, es decir, que el sistema se pone en marcha las 24 horas y que existe un sistema para cada derivado que se ha estudiado en esta investigación, se puede alcanzar un ahorro significativo de 3'7000,000 dólares.

La simulación numérica ha demostrado ser una herramienta fundamental para validar el efecto de los aditivos mejoradores de flujo en el transporte de combustibles. En el caso específico del diésel, la incorporación de un aditivo reductor de fricción (DRA) evidencia una reducción significativa en las pérdidas de presión, lo que se traduce en una

disminución de la potencia de bombeo requerida hasta 955,27 kW y un costo operativo anual aproximado de USD 836.819,11.

Cabe señalar que el análisis con DRA se realizó exclusivamente para el escenario de transporte de diésel, por lo que las comparaciones efectuadas se limitan a dicho combustible. En este contexto, el escenario de transporte de diésel sin aditivo continúa siendo el que mayor potencia de bombeo requiere dentro del conjunto de casos evaluados. La inclusión del DRA permite, por tanto, una optimización operativa y económica del sistema, estableciendo un marco de referencia para futuras evaluaciones que incluyan otros combustibles bajo condiciones similares de aditivación.

RECOMENDACIONES

Con base en los hallazgos de la investigación se recomienda la implementación de un plan piloto para el uso de mejoradores de flujo (DRA) en otras secciones del poliducto con la intención de corroborar las estadísticas de la simulación realizada.

De igual manera realizar un análisis de factibilidad técnico – económica para el uso de DRA en otros poliductos, como por ejemplo Libertad – Pascuales, y poder dimensionar los beneficios que esta aplicación puede tener para la estación de bombeo en costos de operatividad referente al consumo energético.

Finalmente, un estudio de impacto ambiental puede complementar la investigación para determinar su degradación, toxicidad y efectos que estos pueden tener en el medio ambiente, en caso de algún derrame, esto permitirá que la solución propuesta no sea solo económica, sino que también pueda ser viable de manera ecológica.

REFERENCIAS

- Al-Sarkhi, A. (2010). Drag reduction with polymers in gas-liquid/liquid-liquid flows in pipes: A literature review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2(1), 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2010.01.001>
- APOLLO (2025) Diseño e implementación de soluciones integrales e innovadoras para el sector energético. Recuperado de <https://apollo.mx/reductores-de-friccion> (consultado en agosto de 2025)
- Bàguena, J. G. (2013). *L'anàlisi de la variància (ANOVA)*. Universitat Oberta de Catalunya. <https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/1aaf8f22-8853-4aac-9293-a49ee4d0cb55/content>
- Bravo, J. (2021). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FLUIDO-ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DINÁMICAS DE UN TANQUERO CON CAPACIDAD DE 10000 GAL, PARA EL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE, UTILIZANDO EL MÉTODO COMPUTACIONAL TRANSITORIO* [Ingeniería Automotriz]. Escuela superior Politécnica del Chimborazo.
- COELTEC (2025) Proyectos eléctricos, mecánicos, civiles y de automatización de tipo EPC. Recuperado de <https://www.coeltec.com.ec/> (consultado en agosto de 2025)
- Contreras, A. (2024). Energy Efficiency in Pipelines: A ComparativeApplicative Analysis of Predictive Models for Drag Reducing Agents (DRA). *LACCEI*.
- Cuellar Muñoz, J. A. (2021). *Optimización del desempeño energético para el transporte de hidrocarburos en el oleoducto de los Llanos Orientales mediante la utilización del agente reductor de fricción extreme power*. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8277>

- EP PETROECUADOR. (2019). *RENDICION DE CUENTAS 2019* (No. 10.02.17).
<https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/10/INFORME-RENDICION-DE-CUENTAS-2019-VF-12.10.20.pdf>
- EP PETROECUADOR. (2022). *Ensayos de Derivados de Petróleo* (Técnico Nos. 2023-08-05-ET-DP-PEEP). EP Petroecuador.
- EP PETROECUADOR. (2023a). *Plan General de Negocios, Expansión e Inversión de EP PETROECUADOR 2023* [Técnico]. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/09/PGN-2023-FINAL-con-actualizacion-estimados-05-07-2023-con-resolucion.pdf>
- EP PETROECUADOR. (2023b). *Transporte y almacenamiento* [Técnico].
<https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2024/12/Transporte-y-almacenamiento.pdf>
- Feng, D.-Q., Fan, J.-J., Wang, W.-J., Xia, C.-X., & Li, A. (2024). New formula of vegetation roughness height and Darcy–Weisbach friction factor in channel flow. *Journal of Hydrology*, *636*, 131278.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131278>
- Fink, J. (2016). Chapter 6—Drag Reduction and Flow Improvement. En J. Fink (Ed.), *Guide to the Practical Use of Chemicals in Refineries and Pipelines* (pp. 83-108). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805412-3.00006-4>

- Gómez, H. G. B., Proaño, G. A. A., Reina, I. C. N., Flores, R. A. C., & Cabrera, C. F. I. (2017). FIGEMPA: Investigación y Desarrollo. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 3(1), 22-30. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.52>
- Hernández, G., Legrá, A. A., Rojas, L., Ramírez, B., & Mariño, A. (2018). Modelos matemáticos de parámetros reológicos y su influencia en el sistema de bombeo de fluidos no newtonianos. *Revista Colombiana de Química*, 47(3), 52-60. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v47n3.70248>
- INSPENET. (2024). *Implementación de Poliductos en el Transporte Energético*. <https://inspenet.com/articulo/poliductos-en-el-transporte-energetico/>
- Laurencio, H. L., & Retirado, Y. (2023). Procedimiento para determinar la variación de temperatura del petróleo pesado con comportamiento pseudoplástico en tuberías conductoras. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 31, 0-0. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052023000100240>
- Laurencio, H. L., Retirado, Y., Falcón, J. F., Torres, E., & Salazar, M. F. (2022). Modelo para simulación de la potencia de flujo en tuberías conductoras de petróleo pesado con comportamiento pseudoplástico. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30(1), 171-179. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052022000100171>
- Li, C., Huang, Y., Fu, J., Sun, X., & Wei, C. (2025). New metric derived from the Darcy–Weisbach formula for rapid characterization of anode hydrodynamic loss in fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 239, 126582. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126582>

- Liu, D., Wang, Q., & Wei, J. (2018). Experimental study on drag reduction performance of mixed polymer and surfactant solutions. *Chemical Engineering Research and Design*, 132, 460-469. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.047>
- Ma, J., Yang, Y., Li, X., Sui, H., & He, L. (2021). Mechanisms on the stability and instability of water-in-oil emulsion stabilized by interfacially active asphaltenes: Role of hydrogen bonding reconstructing. *Fuel*, 297, 120763. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120763>
- Makogon, T. Y. (2019). Chapter 6—Production chemistry and fluid quality. En T. Y. Makogon (Ed.), *Handbook of Multiphase Flow Assurance* (pp. 191-203). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813062-9.00006-3>
- Morken Group. (2019). *AGENTE REDUCTOR DE FRICCIÓN*. https://morkengroup.com/case_study/agente-reductor-de-friccion/
- Nesyn, G. V., Sunagatullin, R. Z., Shibaev, V. P., & Malkin, A. Ya. (2018). Drag reduction in transportation of hydrocarbon liquids: From fundamentals to engineering applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 161, 715-725. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.092>
- Pérez, L., Hernández, G., Laffita, Q. R., Garcell, L. R., & Legrá, A. A. (2021). Influencia del comportamiento reológico de las pulpas lateríticas en la eficiencia de bombeo. *Tecnología Química*, 41(3), 619.
- Souas, F., & Meddour, A. S. E. (2022). Drag reduction in single-phase crude oil flow: A mini-review. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2(4), 100088. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100088>

White, C. M., & Mungal, M. G. (2008). Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40(Volume 40, 2008), 235-256.

<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102156>

Zhang, X., Guo, X., Xing, H., Yang, L., Shen, S., Liang, H., & Lv, X. (2025). Research on Influencing Factors and Prediction of Drag Reducing Agent Effectiveness in Oil Pipeline Transportation. *International Journal of Economy, Energy and Environment*, 10(2), 17-30. <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20251002.11>

ANEXO 1

Modelo computacional para el análisis hidráulico del poliducto y evaluación del uso de DRA

Se incluye el modelo computacional empleado para el análisis hidráulico del poliducto, en el cual se estiman las pérdidas de carga, perfiles de presión, potencia de bombeo, consumo energético y costos operativos, considerando las propiedades reológicas de los combustibles y la eficiencia de reducción de arrastre asociada a la aplicación de DRA.

% (Versión ampliada con Agente Reductor de Arrastre - DRA)

% 1. Parámetros del Poliducto

L = 170000; % Longitud en metros (170 km)

D = 0.254; % Diámetro interno en metros (10 pulgadas)

epsilon = 4.57e-5; % Rugosidad de la tubería de acero en metros

% 2. Propiedades de los Fluidos a 50°C

% Escenario 1: Diésel (Tabla 4 a 50°C, 60 RPM)

mu_diesel_cp = 34.10;

*mu_diesel = mu_diesel_cp * 1e-3; % Viscosidad en Pa·s*

rho_diesel = 850; % Densidad en kg/m³

% Escenario 2: Gasolina (Tabla 8 a 50°C, 60 RPM)

mu_gasolina_cp = 10.5;

*mu_gasolina = mu_gasolina_cp * 1e-3; % Viscosidad en Pa·s*

rho_gasolina = 750; % Densidad en kg/m³

% Escenario 3: Diésel con DRA (Se mantiene la misma viscosidad y densidad)

% Solo se añade la eficiencia de reducción de arrastre

eficiencia_DRA = 0.30; % 30% de reducción de arrastre (valor típico)

% 3. Parámetros de Operación

v = 1.5; % Velocidad del flujo en m/s

*A = pi * (D²) / 4; % Área de la sección transversal en m²*

*Q = v * A; % Caudal volumétrico en m³/s*

% 4. Parámetros Económicos y de Eficiencia

eta_bomba = 0.85; % Eficiencia de la bomba (ej. 85%)

eta_motor = 0.90; % Eficiencia del motor (ej. 90%)

costo_electricidad = 0.10; % Costo por kWh en USD

*horas_anuales = 24 * 365; % Horas de operación en un año*

% 5. Cálculo para Cada Escenario

fluidos = {'Diesel', 'Gasolina', 'Diésel + DRA'};

```

mu_valores = [mu_diesel, mu_gasolina, mu_diesel]; % Viscosidad del DRA es la misma
que el diésel
rho_valores = [rho_diesel, rho_gasolina, rho_diesel];

perdida_total_bar = zeros(1, 3);
potencia_kW = zeros(1, 3);
energia_anual_MWh = zeros(1, 3);
costo_anual_USD = zeros(1, 3);

% Inicializar variables para el perfil de presión
num_segmentos = 100;
longitud_segmento = L / num_segmentos;
presion_inicial = 20e5; % Presión de salida en Pascales (20 bar)
presion_perfil = zeros(num_segmentos + 1, 3);
presion_perfil(1,:) = presion_inicial;

for i = 1:length(fluidos)
    mu = mu_valores(i);
    rho = rho_valores(i);

    % Cálculos de Pérdida de Presión
    Re = (rho * v * D) / mu;
    f = 0.25 / (log10((epsilon/D)/3.7 + 5.74 / (Re^0.9)))^2;

    % Aplicar la reducción del DRA si el escenario es Diésel + DRA
    if i == 3
        f = f * (1 - eficiencia_DRA);
    end

    % Perfil de Presión Acumulada
    for j = 1:num_segmentos
        hf_segmento = f * (longitud_segmento/D) * (v^2 / (2*9.81));
        dP_segmento = rho * 9.81 * hf_segmento;
        presion_perfil(j+1, i) = presion_perfil(j, i) - dP_segmento;
    end

    % Pérdida Total de Presión
    dP_total = presion_inicial - presion_perfil(end, i);
    perdida_total_bar(i) = dP_total / 1e5;

    % Cálculos de Bombeo
    potencia_hidraulica = Q * dP_total;
    potencia_motor = potencia_hidraulica / (eta_bomba * eta_motor);
    potencia_kW(i) = potencia_motor / 1000;

    % Consumo y Costo
    energia_anual_MWh(i) = (potencia_kW(i) * horas_anuales) / 1000;
    costo_anual_USD(i) = energia_anual_MWh(i) * costo_electricidad * 1000;
end

```

```

end

% 6. Presentación de Resultados en Gráficos
figure;
subplot(1,3,1:2);
plot(linspace(0, L/1000, num_segmentos+1), presion_perfil/1e5, 'LineWidth', 2);
xlabel('Distancia a lo largo del ducto (km)', 'FontSize', 10);
ylabel('Presión (bar)', 'FontSize', 10);
title('Perfiles de Presión Acumulada', 'FontSize', 12);
legend(fluidos, 'Location', 'best');
grid on;

subplot(1,3,3);
bar(perdida_total_bar);
set(gca, 'xticklabel', fluidos);
ylabel('Pérdida de Presión Total (bar)', 'FontSize', 10);
title('Pérdida Total por Escenario', 'FontSize', 12);
grid on;

sgtitle('Análisis Detallado de Simulación en el Poliducto', 'FontSize', 14);

% 7. Presentación de Resultados en Texto
fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf('          Resultados de la Simulación          \\n');
fprintf('=====
=====\\n');
for i = 1:length(fluidos)
    fprintf('\n--- ESCENARIO %d: %s ---\\n', i, fluidos{i});
    fprintf('Pérdida total de presión: %.2f bar\\n', perdida_total_bar(i));
    fprintf('Potencia eléctrica estimada: %.2f kW\\n', potencia_kW(i));
    fprintf('Energía anual consumida: %.2f MWh\\n', energia_anual_MWh(i));
    fprintf('Costo anual estimado: %.2f USD/año\\n', costo_anual_USD(i));
end
fprintf('=====
=====\\n\\n')

```