



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROPUESTA TECNOLÓGICA

“PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO DE FLUIDOS INDUSTRIALES CON COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO.”

Propuesta tecnológica presentada previo a la obtención del Título de Ingeniera en Electromecánica.

Autora:

Molina Bautista Valeria Lisseth

Tutor:

Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso Dr. C.

Latacunga-Ecuador

2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Molina Bautista Valeria Lisseth declaro ser autora del presente proyecto de investigación: **“PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO DE FLUIDOS INDUSTRIALES CON COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO.”**, siendo el Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso Dr. C tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Molina Bautista Valeria Lisseth

C.I. 050412148-4

AVAL DEL TUTOR DE TITULACIÓN

En calidad de tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO DE FLUIDOS INDUSTRIALES CON COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO.”, de Molina Bautista Valeria Lisseth, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnico suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Agosto 2021

El Tutor

Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso Dr. C.

CC: 1758367252

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Carrera de Ingeniería Electromecánica; por cuanto el o los postulantes: Molina Bautista Valeria Lisseth, el título de proyecto de titulación: **“PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO DE FLUIDOS INDUSTRIALES CON COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO.”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación del Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Agosto 2021

Para constancia firman:

Lector 1 (presidente)

PHD. Enrique Torres Tamayo

C.C. 175712194-0

Lector 2

Ing. MsC. Raúl Reinoso Peñaherrera MBA.

C.C. 050215089-9

Lector 3

Ing. Mg. Luis Miguel Navarrete

López

C.C.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por guiarme en todo este tiempo que ha sido mi vida estudiantil al igual quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres a mi hermana que me brindaron su apoyo durante el transcurso de mi carrera universitaria y en especial a mi esposo que estuvo conmigo apoyándome incondicionalmente el proceso del desarrollo de mi tesis.

A mis docentes institucionales de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en especial a la Facultad de ciencias de la Ingeniería y Aplicadas por impartirnos los conocimientos y brindarnos sus experiencias profesionales que fueron de gran importancia para la formación profesional a lo largo de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, sobre todo a nuestro Tutor el Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso Dr. C. y al Tribunal de lectores como Lector 1 el PHD. Enrique Torres Tamayo, Lector 2 Ing. MsC. Raúl Reinoso Peñaherrera MBA. y Lector 3 el Ing. Mg. Luis Miguel Navarrete López, por la confianza depositada al desarrollo de mi trabajo de titulación.

Valeria Lisseth Molina Bautista.

DEDICATORIA

Yo Valeria Lisseth Molina Bautista dedico este trabajo a mi madre Carmen Bautista a mi Padre Fausto Molina por ser los pilares fundamentales en mi vida, por todo el apoyo que siempre me han brindado, por estar conmigo en las buenas y en las malas dándome fuerzas para salir adelante a pesar de todas las dificultades.

Agradezco a mi hermana Daniela Molina Bautista que me demostró que su apoyo será incondicional en todo momento y sobre todo en los más difíciles a mi amado esposo Cesar Vargas que me levanto y me dio fuerzas para seguir con el desarrollo de mi tesis y supo darme fuerzas cuando más las necesitaba a mi abuela Griselda Álvarez y a mi tía Margoth Bautista que siempre estuvieron pendientes de mi muchas gracias infinitamente por todo. Los quiero mucho.

Valeria Lisseth Molina Bautista.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INFORMACION BASICA	1
2.	DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	3
2.1	TITULO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	3
2.2	TIPO DE ALCANCE	3
2.3.	ÁREA DEL CONOCIMIENTO:.....	3
2.4.	SINÓPSIS DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	3
2.5.	OBJETO DE ESTUDIO Y CAMPO DE ACCIÓN	4
2.6.	SITUACIÓN PROBLÉMICA Y PROBLEMA.....	4
2.7.	HIPOTESIS O FORMULACION DE PREGUNTA CIENTIFICA	5
2.8.	OBJETIVO(S).....	6
2.9	DESCRIPCION DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS.....	6
3.	MARCO TEÓRICO	8
3.1	FLUIDOS INDUSTRIALES.....	8
3.1.1	Hidrocarburos	8
3.1.2	Clasificación de los hidrocarburos	9
3.1.3	Clasificación de los hidrocarburos	10
3.1.4	Clasificación de los crudos según el grado API	11
3.1.5	Propiedades físicas de los crudos	11
3.1.6	Propiedades que influyen dentro de la reología.....	13
3.1.7	Variables que influyen en las propiedades dentro de la reología	14
3.2	TRANSPORTE DE FLUIDOS	14
3.2.1	Modelos utilizados en el cálculo de transporte de fluidos seudoplásticos	15
3.2.2	Aseguramiento de flujo	15
3.2.3	Tecnologías de aseguramiento de flujo	16
3.2.4	Tecnologías por reducción de viscosidad.....	16

3.2.5	Criterios de diseño de transporte de crudos.....	19
3.3	OPTIMIZACIÓN	19
3.3.1	Elementos para optimización.....	20
3.3.2	Métodos de optimización.....	20
3.4	PYTHON	21
3.4.1	Python para optimización	21
4.	METODOLOGÍA.....	23
4.1	Descripción del proceso.....	23
4.2	Equipos	23
4.2.1	Características del intercambiador de calor.....	23
4.2.2	Características de los equipos de bombeo	24
4.3	Variables de investigación.....	24
4.4	Matriz de relación de variables.....	24
4.5	Algoritmo.....	25
4.6	Definición de variables	27
4.7	Planteamiento de ecuaciones	27
4.7.1	Propiedades del fluido	27
4.7.2	Propiedades del aire.....	29
4.7.3	Constantes de cálculo	30
4.7.4	Gradiente de temperatura.....	32
4.7.5	Gradiente de presión.....	32
4.7.6	Costos de operación.....	33
4.8	Descripción de variables.....	34
4.8.1	Variables solicitadas	35
4.8.2	Constantes utilizadas en el diseño del método de calculo	35
4.8.3	Variables calculadas a través del método de calculo.....	35
4.9	Selección de herramientas matemáticas	36

4.10	Desarrollo del método de cálculo	37
4.11	Herramientas y técnicas utilizadas.....	45
5.	ANALISIS Y RESULTADOS	46
5.1	Análisis del sitio de trabajo e instalaciones	46
5.2	Comportamiento de las propiedades del crudo en función de la temperatura de bombeo	47
5.3	Comportamiento de las constantes que rigen el modelado del proceso de transporte de crudo	49
5.4	Análisis de gradientes de presión y temperatura	51
5.5	Análisis de gradientes, costos de bombeo, costos de calentamiento y costos totales	52
5.6	Análisis de costos en función de la longitud	61
5.7	Análisis de costos en función del diámetro	61
5.8	Análisis de costos en función de la gradiente de velocidad.....	62
5.9	Análisis de los resultados obtenidos en Python.....	63
5.10	Análisis de costos totales en Excel	63
6.	PRESUPUESTO.....	64
7.	ANÁLISIS DE IMPACTOS	65
7.1	Impacto económico.....	65
7.2	Impacto tecnológico.....	66
7.3	Impacto ambiental	66
7.4	Impacto social.....	67
8.	CRONOGRAMA	68
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Diagrama Causa-Efecto sobre transporte de crudo.....	5
Figura 3. 1. Razón de deformación vs esfuerzo cortante de fluido newtoniano.....	9
Figura 3. 2. Razón de deformación vs esfuerzo cortante de fluido no newtoniano.....	10
Figura 3. 3. Relación viscosidad-temperatura	13
Figura 3. 4. Tecnologías de aseguramiento de flujo	16
Figura 4. 1. Algoritmo del método de cálculo.....	26
Figura 4. 2. Radios de la sección transversal de la tubería de transporte	31
Figura 4. 3. Costos del sistema de transporte	37
Figura 5. 1. Sistema de ductos para transporte del fluido multifásico del bloque 31-bloque 12.....	47
Figura 5. 2. Curva de comportamiento de la densidad de los tres tramos.....	48
Figura 5. 3. Curva de comportamiento de los tres tramos	48
Figura 5. 4. Coeficiente de conductividad térmica del crudo de los tres tramos	49
Figura 5. 5. Índice de consistencia másica de los tres tramos	49
Figura 5. 6. Número de Reynolds de los tres tramos	50
Figura 5. 7. Numero de Prandt de los tres tramos.....	50
Figura 5. 8. Coeficiente de convección de combustible de los tres tramos	51
Figura 5. 9. Gradiente de presión de los tres tramos.....	52
Figura 5. 10. Gradiente de temperatura de los tres tramos	52
Figura 5. 11. Gradiente de Presión en función de la temperatura de bombeo (Python)	53
Figura 5. 12. Gradiente de temperatura del tramo 1 (Python)	53
Figura 5. 13. Resumen de costos del sistema en el primer tramo (Python).....	54
Figura 5. 14. Resumen de costos de transporte del tramo 1.....	54
Figura 5. 15. Gradiente de Presión en función de la temperatura del tramo 2	55
Figura 5. 16. Gradiente de temperatura del tramo 2	56
Figura 5. 17. Resumen de costos del sistema en el segundo tramo.....	56
Figura 5. 18. Resumen de costos del tramo 2.....	57
Figura 5. 19. Gradiente de Presión en función de la temperatura de bombeo del tramo 3	58
Figura 5. 20. Gradiente de temperatura del tramo 3	58
Figura 5. 21. Resumen de costos del sistema en el tercer tramo	59
Figura 5. 22. Costo total según la longitud de la tubería	61
Figura 5. 23. Costo total según el diámetro de la tubería.....	62

Figura 5. 24. Costos según la gradiente de velocidad.....63

INDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Clasificación de los crudos según su grado API11

Tabla 3. 2. Tipo de flujo según Re.....12

Tabla 4. 1. Datos técnicos del intercambiador de calor24

Tabla 4. 2. Variables de la investigación24

Tabla 4. 3. Matriz de relación de variables24

Tabla 4. 4. Variables de operación del sistema de transporte27

Tabla 4. 5. Datos del sistema de transporte35

Tabla 4. 6. Parámetros de los equipos instalados y otras condiciones35

Tabla 4. 7. Constantes de las instalaciones, equipos, ambiente.35

Tabla 4. 8. Variables de comportamiento del proceso36

Tabla 4. 9. Herramientas y técnicas de la investigación45

Tabla 5. 1. Gradiente de velocidad obtenida por experimentación62

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación (4. 1)28

Ecuación (4. 2)28

Ecuación (4. 3)29

Ecuación (4. 4)29

Ecuación (4. 5)29

Ecuación (4. 6)30

Ecuación (4. 7)30

Ecuación (4. 8)30

Ecuación (4. 9)30

Ecuación (4. 10)31

Ecuación (4. 11)31

Ecuación (4. 12)32

Ecuación (4. 13)32

Ecuación (4. 14)32

Ecuación (4. 15)33

Ecuación (4. 16)33

Ecuación (4. 17)33

Ecuación (4. 18)33

Ecuación (4. 19)34

Ecuación (4. 20)34

Ecuación (4. 21)34

Ecuación (4. 22)34

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
INGENIERIA Y APLICADAS**

**TITULO: “PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE
SISTEMAS DE BOMBEO DE FLUIDOS INDUSTRIALES CON
COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO.”**

Autor: Valeria Lisseth molina Bautista

RESUMEN

El transporte de fluidos es un problema continuamente estudiado en las industrias petrolíferas, debido a la necesidad de transportar crudos pesados con alta viscosidad que cada vez se vuelven más recurrentes. Para el caso de estudio se ha seleccionado el sistema de transportar entre los bloques 31 y 12 de la empresa Petroamazonas EP del oriente ecuatoriano, este consta de un sistema de transporte no optimizado. Usando dicho sistema se plantea desarrollar un método de cálculo orientado al tipo de crudo que se manipula en el sector, donde el diseño matemático fue desarrollado en un estudio anterior el cual se encuentra referenciado a lo largo de este trabajo. Se construye un algoritmo para organizar del procedimiento del método de cálculo y mediante el uso de software libre se implementan el modelo matemático, posteriormente se desarrolla un procedimiento de optimización donde se busca encontrar el costo mínimo de transporte a través del análisis de los parámetros como viscosidad, densidad, temperatura y su influencia en los gradientes de presión y temperatura que influyen directamente en los costos de bombeo y costos de mantenimiento, dando como resultado reducción de costos anuales de operación, costos de mantenimiento, contaminación e impulsando el uso de software libre para aplicaciones industriales sofisticadas.

Palabras clave: transporte, fluido, temperatura, óptimo, viscosidad, costos.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: "PROCEDURE TO OPTIMIZE THE DESIGN AND OPERATION OF INDUSTRIAL FLUID PUMPING SYSTEMS WITH STATIONARY AND NON-STATIONARY BEHAVIOR".

Author: Valeria Lisseth Molina Bautista

ABSTRACT

The transport of fluids is a problem continuously studied in the oil industries, due to the need to transport heavy crudes with high viscosity that are becoming more and more recurrent. For the case study, the transport system between blocks 31 and 12 of Petroamazonas EP in eastern Ecuador has been selected, which consists of a non-optimized transport system. Using this system, it is proposed to develop a calculation method oriented to the type of crude oil handled in the sector, where the mathematical design was developed in a previous study which is referenced throughout this work. An algorithm is built to organize the procedure of the calculation method and through the use of free software the mathematical model is implemented, then an optimization procedure is developed to find the minimum cost of transportation through the analysis of parameters such as viscosity, density, temperature and its influence on the pressure and temperature gradients that directly influence the pumping costs and maintenance costs, resulting in reduction of annual operating costs, maintenance costs, pollution and promoting the use of free software for sophisticated industrial applications.

Key words: transport, fluid, temperature optimum viscosity, costs.

Yo el Docente tutor apruebo este documento para ser revisado por el centro de idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO DE FLUIDOS INDUSTRIALES CON COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO.”** presentado por: **Valeria Lisseth Molina Bautista**, egresado de la Carrera de: **Ingeniería Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de ciencias de la ingeniería y aplicadas**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, Julio del 2021

Atentamente,

Mg. Lidia Rebeca Yugla Lema
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI:0502652340

DISEÑO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

1. INFORMACION BASICA

PROPUESTO POR: Molina Bautista Valeria Lisseth

TEMA APROBADO: Procedimiento para optimizar el diseño y operación de sistemas de bombeo de fluidos industriales con comportamiento estacionario y no estacionario.

CARRERA: Ingeniería Electromecánica

DIRECTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA: Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso Dr. C.

EQUIPO DE TRABAJO: Molina Valeria

LUGAR DE EJECUCION: Zona 3 centro, Cotopaxi, Latacunga, Eloy Alfaro.

TIEMPO DE DURACION DE LA PROPUESTA: 19 semanas

FECHA DE ENTREGA:

LÍNEA(S) Y SUBLINEAS DE INVESTIGACION A LAS QUE SE ASOCIA LA PROPUESTA TECNOLÓGICA:

LÍNEA DE INVESTIGACION

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS ELECTROMECAÁNICO Y USO DE FUENTES RENOVABLES

Esta línea de investigación abarca tres grandes ejes para su accionar investigativo, que están en correspondencia con los objetivos nacionales e internacionales de investigación, desarrollo tecnológico e innovación en esta área. Se integran todas aquellas investigaciones que busquen promover el aprovechamiento de las energías alternativas y renovables, fomentar y promocionar el uso eficiente de la energía (Eficiencia Energética) en los diferentes sectores (Industrial, Residencial, Público, Transporte y Agrícola), y reducir el impacto medioambiental derivado de la utilización de los recursos energéticos.

SUBLINEA DE INVESTIGACION

3 eficiencia energética

TIPO DE PROPUESTA TECNOLÓGICA

La aplicación de la presente investigación mediante la cual se busca proponer un

procedimiento para los sistemas de bombeo de fluidos industriales que mediante su implementación permita optimizar el diseño y operación de dichos sistemas con comportamiento estacionario y no estacionario.

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

2.1 TITULO DE LA PROPUESTA TECNOLOGICA

Procedimiento para optimizar el diseño y operación de sistemas de bombeo de fluidos industriales con comportamiento estacionario y no estacionario.

2.2 TIPO DE ALCANCE

DESARROLLO: Se desarrolla la optimización de operación de sistemas de bombeo de fluidos industriales.

2.3. ÁREA DEL CONOCIMIENTO:

Tecnología de la Automatización, Ingeniería de Control, Instrumentos Electrónicos

2.4. SINÓPSIS DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

En la actualidad, las necesidades de diferentes industrias en las que se requiere el transporte de algunos tipos de fluidos a largas distancias, han hecho necesario el adaptarse al uso de sistemas de bombeo que permitan el transporte de los mismos de manera eficaz y eficiente; sin embargo, es común encontrar sistemas de bombeo con diseño de bajo rendimiento, averías inoportunas, interrupción del proceso de producción, entre otros inconvenientes que provocan grandes pérdidas económicas y del factor tiempo que no justifican las grandes inversiones realizadas en los mismos, es por esta razón por la que el presente trabajo de investigación busca proponer un procedimiento de operación de sistemas de bombeo de fluidos industriales que permitan el uso adecuado de los recursos disponibles de los distintos tipos de industria como pueden ser la industria química, de papel y celulosa, minería, farmacéutica y en especial en la industria petrolera, implementado un sistema más eficiente y disminuyendo los costos de operación al mejorar la eficiencia energética de los equipos. El procedimiento busca a través del software Python, implementar una aplicación cuyo principal objetivo es determinar las características óptimas del proceso para reducir el consumo de energía eléctrica e incrementar la vida útil de los equipos a través del análisis del tipo de fluido a transportar, se tomará en cuenta variables como la temperatura, el caudal, la presión, la densidad, viscosidad de los fluidos, etc, según el comportamiento del mismo, para establecer el sistema que permita disminuir los costos del diseño y operación de los sistemas de bombeo.

2.5. OBJETO DE ESTUDIO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.5.1 Objeto de estudio

El proceso de transporte por tuberías de los fluidos no estacionarios.

2.5.2 Campo de acción

La Mecánica de Fluidos es una ciencia especializada en el estudio de los fluidos en movimiento. Los mismos que para su procesamiento deben ser transportados por los diferentes sistemas de transporte por bombeo. Es así que mediante el presente trabajo de investigación se propone un procedimiento que permita la reducción del consumo energético basado en el establecimiento de parámetros racionales en el proceso de transporte de tuberías mediante la utilización del lenguaje de programación Python.

2.6. SITUACIÓN PROBLÉMICA Y PROBLEMA

2.6.1 Situación problemática:

El transporte de crudos pesados a través de oleoductos es muy difícil debido a su alta viscosidad y baja movilidad. En las últimas dos décadas, los crudos pesados y extra pesados están siendo visualizados como una fuente de energía alterna, debido a la declinación en la producción de crudos livianos y al incremento en la demanda de energía [1]. Cuyos factores conduce a un alto costo de producción de cada barril de petróleo.

El mayor problema en el transporte de los petróleos y sus acompañantes, radica en que estos son fluidos de elevada viscosidad con comportamiento no newtoniano, que cambian esa propiedad en función del gradiente de velocidad, requiriéndose de la determinación de modelos reológicos que describan su comportamiento de flujo [2].

El fluido petrolífero extraído de los pozos, presenta numerosas dificultades para su transporte y manejo, requiriéndose de técnicas especiales para la mejora de sus propiedades. Lo anterior conlleva a que se estudien vías a través de las cuales pueda mejorarse la fluidez. El calentamiento del combustible a una temperatura adecuada para el bombeo constituye la alternativa más usual y viable aplicada en la actualidad [2].

Las teorías para la determinación de las propiedades reológicas y de transporte de líquidos se realizan a través de técnicas empíricas basadas en la evaluación de algunas constantes a partir de la estructura o propiedades físicas del fluido del que se trate. La situación actual del equipamiento, la instrumentación y las líneas de transporte, asociada a la falta de métodos,

tecnologías y procedimientos, no favorece la puesta en práctica del transporte eficiente para el tratamiento de flujo [2].

No se ha desarrollado una metodología adecuada para selección y operación adecuada de los componentes del sistema. Los software existentes no cuentan con un análisis de pérdida de carga, tiempo de operación, condiciones ambientales, características del fluido a transportar, tarifa eléctrica y sobre todo temperatura óptima para transporte.

Diagrama de Causa-Efecto

En el diagrama de la **Figura 2. 1** presenta una descripción de las principales causas del problema.

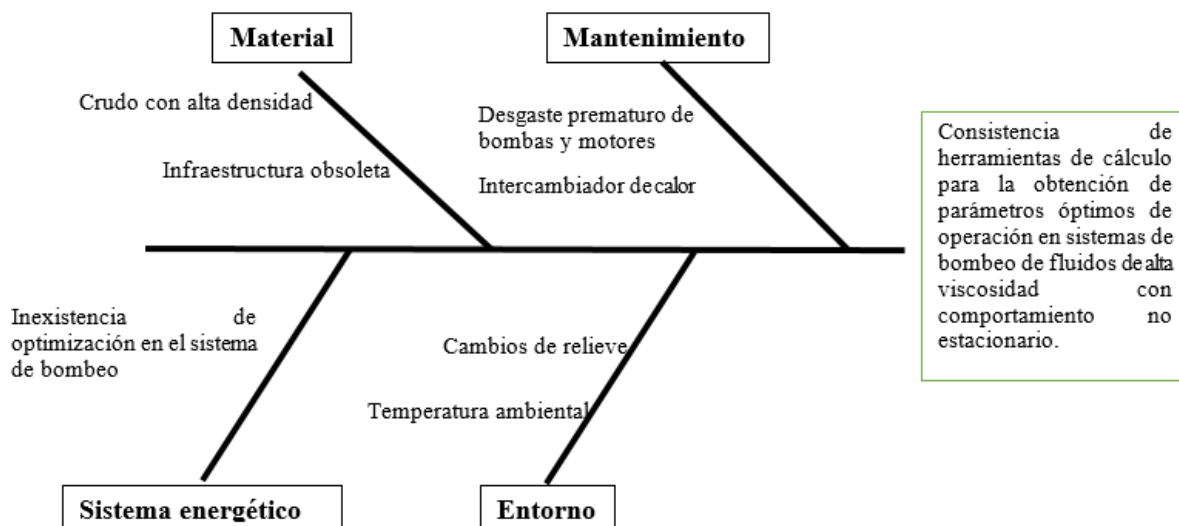


Figura 2. 1. Diagrama Causa-Efecto sobre transporte de crudo

Fuente: Valeria Molina

2.6.2 Problema

Inconsistencia de herramientas de cálculo para la obtención de parámetros óptimos de operación en sistemas de bombeo de fluidos de alta viscosidad con comportamiento no estacionario.

2.7. HIPOTESIS O FORMULACION DE PREGUNTA CIENTIFICA

Mediante la implementación de un método de cálculo en PYTHON para la optimización del sistema de transporte de fluido en función de las propiedades físicas del fluido se obtendrá una reducción de consumo energético, una minimización de costos de operación y el incremento de la eficiencia del sistema.

2.8. OBJETIVO(S)

2.8.1 Objetivo general

Desarrollar un procedimiento para la optimización de costos de operación de los sistemas de bombeo de los fluidos industriales con comportamiento estacionario y no estacionario, mediante un método de cálculo que permita determinar el costo de operación mínima del sistema en función de la temperatura.

2.8.2 Objetivos específicos

Realizar las investigaciones teóricas y experimentales de los efectos del comportamiento del crudo pesado en el proceso transporte por tubería.

Analizar la influencia de la temperatura en las propiedades del fluido para el proceso de transporte.

Plantear ecuaciones del comportamiento del fluido con la influencia de temperatura y los principios de funcionamiento de la bomba centrífuga y elaborar un método de cálculo para minimización de costos de operación del proceso de transporte mediante el uso del software Python

Realizar un análisis del método de cálculo obtenido a través de la comparación entre los datos obtenidos del estudio Apaika Nenke [2]. y el obtenido en Python.

2.9 DESCRIPCION DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	TAREA - ACTIVIDAD	MEDIOS E INSTRUMENTOS
Realizar las investigaciones teóricas y experimentales de los efectos del comportamiento del crudo pesado en el proceso transporte por tubería.	Estudio del estado del arte del proceso de transporte de fluidos asociados con las características reológicas y físicas del crudo pesado,	Bibliografía y tesis existentes, artículos científicos.

<p>Analizar la influencia de la temperatura en las propiedades del fluido.</p>	<p>Análisis de la relación que existe entre las variables estudiadas como la temperatura con las propiedades físicas del fluido.</p>	<p>Bibliografía, libros y artículos sobre mecánica de fluidos y transporte de fluidos de viscosidad variable por tuberías. Matriz de relación de variables.</p>
<p>Plantear ecuaciones del comportamiento del fluido con la influencia de temperatura y los principios de funcionamiento de la bomba centrífuga y elaborar un método de cálculo para minimización de costos de operación del proceso de transporte mediante el uso del software Python</p>	<p>Planteamiento de las ecuaciones de relación entre las variables con las propiedades del fluido, ecuaciones que gobiernan los principios físicos del transporte de fluidos y ecuaciones de funcionamiento y operación de los componentes del sistema de transporte de fluidos. Análisis de las herramientas computacionales y complementos del software Python para realizar la optimización de la función objetivo ya planteada anteriormente, obteniendo el costo mínimo de operación a condiciones de eficiencia energética y desgaste mínimo de los componentes del sistema.</p>	<p>Bibliografía de libros, artículos sobre mecánica de fluidos con influencia de la viscosidad. Fichas técnicas de hojas de datos técnicos. Recolección de datos experimentales para la aproximación de una función de relación entre la temperatura y viscosidad. Excel, aproximación de funciones. Python Librerías asociadas para optimización. MathCad</p>
<p>Realizar un análisis del método de cálculo obtenido a través de la comparación entre los datos obtenidos del estudio Apaika Nenke [2] y el obtenido en Python</p>	<p>Simulación de las características del proceso de transporte del combustible, para la obtención de la temperatura racional de bombeo al costo mínimo de operación. Obtención de las gráficas de las propiedades del fluido Obtención de las gráficas de los costos totales de operación.</p>	<p>Recolección de datos experimentales para la simulación de la investigación realizada anteriormente. Python. Librerías asociadas para optimización. MathCad Excel</p>

3. MARCO TEÓRICO

3.1 FLUIDOS INDUSTRIALES

Es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia adopta la forma del recipiente que lo contiene [3].

Diversas industrias, incluyendo los sectores químico y farmacéutico, procesan fluidos orgánicos e inorgánicos. Muchos de estos fluidos, como los disolventes, tienen valor en sí mismos y otros contienen sustancias valiosas: minerales, compuestos químicos o nutrientes como las proteínas. Idealmente, la industria aspira a aumentar la vida útil de estos fluidos, lo que no solo reduce los residuos, los costes y el uso de los recursos, sino también aumenta la vida del equipo con el que entran en contacto [4].

3.1.1 Hidrocarburos

A los hidrocarburos se les define como compuestos químicos de carbón e hidrógeno; elementos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros forman parte de estos. La génesis del petróleo, se ubica en el depósito y descomposición de organismos de origen vegetal y animal, que hace millones de años quedaron atrapados en rocas sedimentarias en ambientes marinos o próximos al mar y que fueron sometidos a enormes presiones y elevadas temperaturas. La palabra petróleo, proveniente del latín “petroleum” y significa aceite de piedra [2].

Se ha encontrado petróleo en todos los continentes excepto en el Antártico, sin embargo, el petróleo no se encuentra distribuido uniformemente en el subsuelo del planeta. Al analizar petróleo de procedencias diversas, de manera general puede decirse que lo forman los siguientes elementos químicos: de 76 a 86 % de carbono y de 10 a 14 % de hidrógeno. A veces contiene algunas impurezas mezcladas como oxígeno, azufre y nitrógeno; también se han encontrado huellas de compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales [2].

El petróleo se localiza en el subsuelo, impregnado en formaciones de tipo arenoso y calcáreo. Asume los tres estados físicos de la materia (sólido, líquido y gaseoso) según su composición, temperatura y presión a la que se encuentra. Los yacimientos de petróleos crudos están constituidos por hidrocarburos líquidos, bajo las condiciones de presión y temperatura del depósito, su viscosidad es medida a la temperatura original del yacimiento y a la presión atmosférica, como un líquido estabilizado libre de gas [2].

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se presentan diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes [2].

3.1.2 Clasificación de los hidrocarburos

Es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales, principalmente fluidos que están formados por macromoléculas o que tienen estructura y que se conocen con el nombre genérico de fluidos no newtonianos o fluidos complejos [5].

3.1.1.1 Fluidos newtonianos

Los fluidos para los cuales la razón de deformación es proporcional al esfuerzo cortante, siendo una función lineal cuya pendiente es la viscosidad como se muestra en la Figura 1. Dando como resultado el valor de la viscosidad constante. La mayoría de los fluidos comunes, como el agua, el aire, la gasolina y los aceites son newtonianos [6].

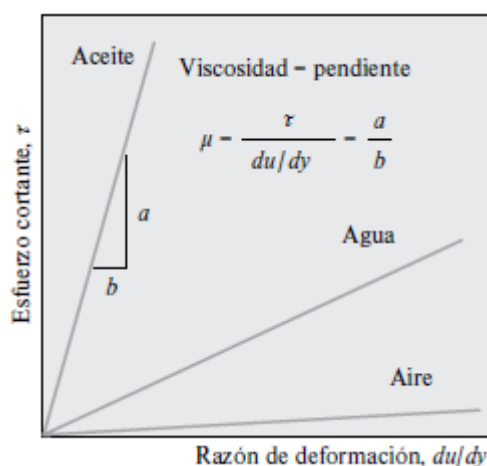


Figura 3. 1. Razón de deformación vs esfuerzo cortante de fluido newtoniano

Fuente: [6].

3.1.1.2 Fluidos no newtonianos

La relación entre el esfuerzo cortante y la razón de deformación no es lineal, como se muestra en la **Figura 3. 1**. La pendiente de la curva se conoce como viscosidad aparente del fluido, es decir la viscosidad no es constante [6].

Estos materiales tienen características intermedias entre los sólidos elásticos y los fluidos puramente viscosos. Dentro de este tipo de fluidos se encuentran las soluciones poliméricas, los polímeros fundidos, las suspensiones de partículas, los alimentos, los medicamentos, los

recubrimientos, los fluidos y tejidos biológicos, y muchos otros más, la mayoría de los fluidos de importancia práctica son no newtonianos, como los hidrocarburos [5].

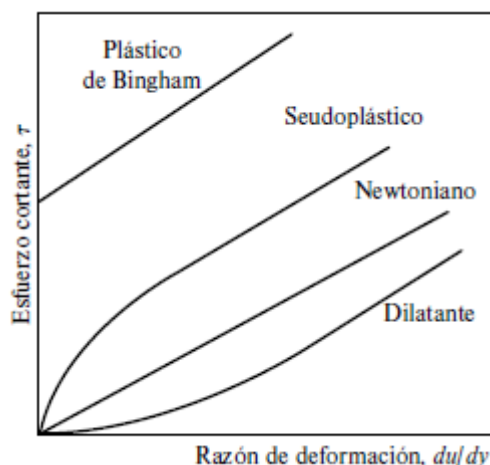


Figura 3. 2. Razón de deformación vs esfuerzo cortante de fluido no newtoniano

Fuente: [6].

3.1.3 Clasificación de los hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que contienen cadenas de carbono e hidrógeno. En estado líquido se conocen con el nombre de petróleo, mientras que en estado gaseoso se conocen como gas natural [7].

Los hidrocarburos se clasifican según su composición en: parafínicos, nafténicos, aromáticos y asfálténicos

3.1.2.1 Hidrocarburos parafínicos

Se caracterizan por su gran estabilidad, son los más livianos, entre los que se encuentran el metano, etano, hexano y hexadecano. Son de baja densidad, elevado índice de viscosidad, baja volatilidad, bajo contenido de azufre, alto punto de congelación, y bajo poder disolvente [7].

3.1.2.2 Hidrocarburos Nafténicos

Su densidad es relativamente más elevada comparada con los hidrocarburos parafínicos, bajo índice de viscosidad, su volatilidad es mayor a la de los parafínicos, bajo punto de inflamación, bajo punto de congelación y bajo contenido de azufre [7].

3.1.2.3 Hidrocarburos Aromáticos

Se caracterizan por ser semivolátiles, se encuentran en forma gaseosa a temperatura ambiente. Son lipofídicos, es decir tienden a unirse a sustancias grasas y a disolverse en ellas, son inestables fotoquímicamente ya que se degradan con la luz [7].

3.1.2.4 Hidrocarburos Asfalténicos

Tienen alto contenido de azufre y metales y alta viscosidad. En el proceso de destilación producen abundante residuo de asfalto [7].

3.1.4 Clasificación de los crudos según el grado API

Los crudos pueden ser clasificados en base a diferentes propiedades, sin embargo, este trabajo se enfoca en la clasificación por gravedad API (**Tabla 3. 1**), puesto que la investigación se enfoca en crudos de densidades y viscosidades altas, de difícil transporte.

Tabla 3. 1. Clasificación de los crudos según su grado API

CLASE	Grado API	Densidad (gr/cm ³)
Extra liviano	Mayor a 40	< 0,83
Liviano	Entre 30 – 40	0,87 – 0,83
Mediano	Entre 22 – 29,90	0,92 – 0,87
Pesado	Entre 10 – 21,9	1,0 – 0,92
Extra pesado	Menor a 10	> 1,0

Fuente: [7]

Los crudos livianos y extra livianos presentan alta concentración de hidrocarburos de bajo peso molecular. Son fácilmente transportables y extraíbles [7].

Los crudos medianos presentan mediana concentración de hidrocarburos de bajo peso molecular, son fáciles de transportar [7].

El crudo pesado presenta gran concentración de hidrocarburos de mediano peso molecular. Su transporte ya no es tan sencillo como con los crudos anteriores [7].

El crudo extrapesado contiene menos concentración de hidrocarburos con mayor peso molecular, lo cual lo hace más *pesado y difícil de transportar* [7].

3.1.5 Propiedades físicas de los crudos

La temperatura y la presión crítica son características físicas de los crudos. Estos parámetros determinan el punto límite superior de la curva de presión de vapor más allá del cual no se

advierte el cambio de fase; este punto crítico corresponde al valor más aproximado de las propiedades del líquido y del vapor [7].

Sin embargo se detallan las propiedades que intervienen en el análisis de crudos pesados.

3.1.5.1 Gravedad específica de un fluido

Se define como la razón de la densidad de una sustancia a la densidad de alguna sustancia estándar, a una temperatura específica (por lo general, agua a 4 °C, para la cual $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$) [6].

3.1.5.2 Gravedad API de un crudo

El American Petroleum Institute, define la clasificación de crudos a través de una escala arbitraria, que expresa la densidad relativa de los productos de petróleo. La gravedad API está estandarizada a una temperatura de 60° F. Si el valor de la gravedad se toma con una temperatura diferente, esta debe ser transformada a 60° F, con ayuda de las tablas incluidas en el boletín API 2500. De este modo se puede ver que entre más alto sea el grado de API, más liviana es la sustancia [7].

3.1.5.3 Numero de Reynolds

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y diámetro del tubo a través del cual fluiría el flujo, en una expresión adimensional. Para tuberías circulares, en flujo a tubería llena, se tienen la siguiente expresión [7].

El número de Reynolds determina el tipo de flujo en la tubería. A continuación en la **Tabla 3. 2** se identifica el tipo de fluido dependiendo del número de Reynolds [7].

Tabla 3. 2. Tipo de flujo según Re

Re	Tipo de flujo
Menor a 2300	Laminar
Entre 2300 y 4000	Crítico
Mayor a 4000	Turbulento

Fuente: [7]

3.1.6 Propiedades que influyen dentro de la reología

3.1.6.1 Densidad de un fluido

La densidad se define como masa por unidad de volumen, la densidad de una sustancia depende de la temperatura y de la presión. La densidad de los líquidos y los sólidos depende más fuertemente de la temperatura que de la presión. [6].

3.1.6.2 Viscosidad de un fluido

Propiedad que representa la resistencia interna de un fluido al movimiento o la fluidez [6].

En general, la viscosidad de un fluido depende tanto de la temperatura como de la presión, aun cuando la dependencia respecto a la presión es más bien débil. Para los líquidos, la viscosidad dinámica y la cinemática son prácticamente independientes de la presión y suele descartarse cualquier variación pequeña con ésta [6].

La viscosidad de un fluido está relacionada a forma directa con la potencia de bombeo que se necesita para transportar un fluido en un tubo o para mover un cuerpo (como un automóvil en el aire o un submarino en el mar) a través de un fluido [6].

La viscosidad de los líquidos decrece con la temperatura, en tanto que la de los gases se incrementa gracias a ella (**Figura 3. 3**). Esto se debe a que, en un líquido, las moléculas poseen más energía a temperaturas más elevadas y se pueden oponer con mayor fuerza a las grandes fuerzas de cohesión intermoleculares. Como resultado, las moléculas energizadas de los líquidos se pueden mover con mayor libertad [6].

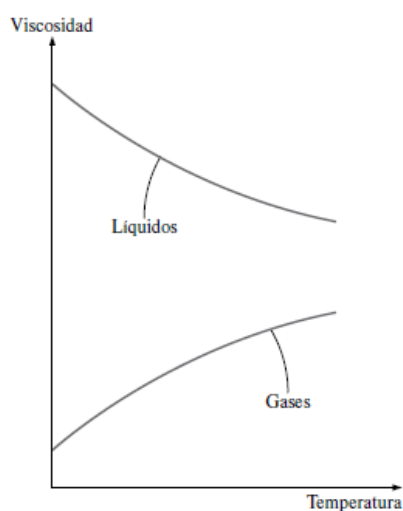


Figura 3. 3. Relación viscosidad-temperatura

Fuente: [6]

3.1.6.3 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica o absoluta de un fluido, es una medida de su resistencia al deslizamiento, o a sufrir deformaciones internas. Se define como el esfuerzo de corte en un punto, dividido por el gradiente de velocidad en ese punto. La unidad más conocida es el poise el cual equivale a 0.1 Pa.s [7].

3.1.6.4 Viscosidad cinemática

En mecánica de fluidos y transferencia de calor, con frecuencia aparece la razón de la viscosidad dinámica a la densidad. Por conveniencia, a esta razón se le da el nombre de viscosidad cinemática, su unidad es el stoke [6].

Los valores de viscosidad deben ser calculados de acuerdo a la metodología de cálculo planteada en la norma ASTM D341-93, Cartas de Temperatura-Viscosidad para Productos Líquidos del Petróleo. Tomando como base dos puntos de viscosidad a diferentes temperaturas [7].

3.1.7 Variables que influyen en las propiedades dentro de la reología

3.1.7.1 Temperatura de un crudo

Esta propiedad influye tanto en viscosidad como en la densidad del crudo. A medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del crudo disminuye [7].

3.2 TRANSPORTE DE FLUIDOS

El transporte de crudos pesados es una de las mayores dificultades que enfrentan las industrias en la actualidad, considerándose como crudos pesados aquellos cuya densidad se encuentra entre 934 y 1.000 kg/m³ (22,3 - 10,1 ° API) y su viscosidad es elevada, llegando a alcanzar hasta 100.000 cSt; los que contienen altas concentraciones de asfaltenos, resinas y parafinas [8].

El transporte de crudos pesados a través de oleoductos es muy difícil debido a su alta viscosidad y baja movilidad. En las últimas dos décadas, los crudos pesados y extra pesados están siendo visualizados como una fuente de energía alterna, debido a la declinación en la producción de crudos livianos y al incremento en la demanda de energía [1].

Los oleoductos están diseñados para transportar crudo a través de grandes distancias sobre diferentes tipos de terrenos y diferentes elevaciones de los mismos. Para ello se diseñan estaciones de bombeo para impulsar el transporte del crudo. Las unidades de bombeo son

diseñadas para incrementar la presión en el oleoducto y de esta manera transportar grandes volúmenes de crudo. La selección de estas unidades de bombeo depende en gran medida del caudal, de la viscosidad del crudo bombeado, de la densidad del mismo, y de los requerimientos de cabeza de presión. La mejor selección de los equipos de bombeo es aquella que permite la operación más económica en términos energéticos, alcanzando la eficiencia requerida por el sistema, teniendo en cuenta los diferentes tipos de crudos bombeados [7].

3.2.1 Modelos utilizados en el cálculo de transporte de fluidos pseudoplásticos

El parámetro más importante del flujo en tuberías es el gradiente de presión. El comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad en un fluido no newtoniano y en particular el de petróleos pesados, es sustancialmente diferente del comportamiento newtoniano [2].

La predicción de las caídas de presión y los patrones de flujo constituyen un problema muy complejo, donde las dos aproximaciones principales que se han usado son relacionadas a continuación [2].

- 1) Correlaciones de datos empíricos, usando potencialmente un razonamiento semi-teórico como por ejemplo los resultados de Turian y Yuan [2].
- 2) Desarrollo de aproximaciones teóricas basadas en una modelación fenomenológica, tal como los modelos de dos capas de Wilson. y los modelos de tres capas de Doron *et al.* [2].

La principal limitación de los modelos teóricos existentes, consiste en su imposibilidad para predecir de manera suficientemente exacta los efectos de mezclado y cambio de densidad del fluido en las tuberías, mientras que las correlaciones empíricas tienen un intervalo limitado de aplicabilidad, cuando no están concebidas bajo criterios de semejanzas para la extrapolación del factor de fricción [2].

3.2.2 Aseguramiento de flujo

Requiere la aplicación de múltiples disciplinas, en particular, una combinación de la química de la producción (caracterización del fluido), la hidrodinámica de múltiples fases, la termodinámica y la ciencia de materiales. A esto se añade la necesidad de tener una sólida comprensión de las limitaciones operativas. El aseguramiento de flujo aborda desde el proceso de extracción de petróleo hasta su entrega en la disposición final. Donde se debe incluir varios aspectos claves de la mecánica de fluidos, transferencia de calor, química yacimiento de petróleo, y la instrumentación de procesos y control [1].

3.2.3 Tecnologías de aseguramiento de flujo

Se identificaron las tecnologías que pueden controlar o mitigar los riesgos asociados por los altos valores de viscosidad que se alcanzan durante la producción y transporte de los crudos pesados y extrapesados [9].

En la **Figura 3. 4** se muestran los diferentes métodos que se han desarrollado para mejorar el transporte de crudos pesados, donde se muestran las diferentes opciones, por reducción de viscosidad, por reducción de fricción y por mejoramiento. Los métodos más importantes y que son utilizados actualmente son: calentamiento, dilución, mejoramiento parcial y transporte con el uso de lubricantes (flujo anular y emulsiones de agua y crudo) [7].

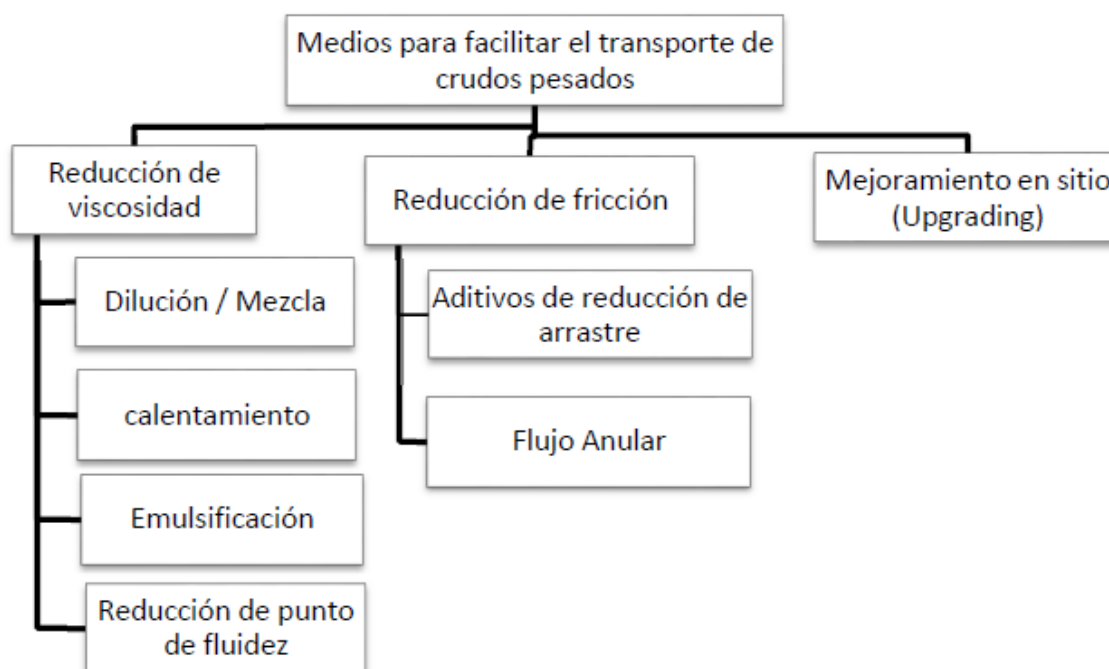


Figura 3. 4. Tecnologías de aseguramiento de flujo

Fuente: [7].

3.2.4 Tecnologías por reducción de viscosidad

3.2.4.1 Método de dilución de crudos

El método de dilución es uno de los métodos más antiguos y sencillos para reducir la viscosidad, y consiste en mezclar el crudo pesado con un crudo de mayor grado API, el cual se comporta como un diluyente, incrementando la distancia intermolecular en el crudo, generando así una reducción de su viscosidad y a su vez una reducción de su densidad. Con el uso de un diluyente liviano como gasolina se pueden obtener grandes reducciones de viscosidad. Cuando se utiliza como diluyente el agua se consigue también reducir los gradientes de presión. Entre los

diluyentes más empleados en el manejo de crudos pesados se tienen la Nafta, kerosene, los crudos livianos, la gasolina y los condensados de gas natural [7].

Para obtener valores aceptables para el transporte, se requiere un porcentaje hasta del 30% de diluyente por volumen haciendo necesario aumentar la capacidad del oleoducto, como también pueden surgir problemas por desabastecimiento del diluyente. De esta manera, el transporte de crudos pesados con diluyentes puede ser rentable si los diluyentes utilizados son relativamente económicos, fáciles de conseguir y los volúmenes requeridos por barril de crudo transportado no son tan altos. Este método requiere una inversión considerable en unidades de bombeo y tuberías, debido al incremento del volumen del fluido transportado y la necesidad de separar el diluyente y retornarlo al sitio de producción del crudo [7].

3.2.4.2 Calentamiento de crudos

Es el segundo método más usado para el transporte de crudos pesados, luego del método de dilución. Durante el transporte del crudo, se presenta una pérdida de temperatura, la cual aumenta la viscosidad del fluido transportado. La viscosidad es una propiedad que es muy sensible a los cambios de temperatura, es esta la razón para considerar el método de calentamiento como alternativa para mejorar el transporte de crudo pesado [7].

Existen diferentes tipos de calentamiento, el calentamiento eléctrico y el calentamiento por vapor, además del uso de aislamientos para conservar la temperatura del crudo, hasta que llegue a la siguiente estación de bombeo. Entre las opciones de aislamiento que se tienen están: incluir un material aislante alrededor de la tubería o enterrar la tubería para conservación del calor [7].

a. Calentamiento eléctrico

Existen dos configuraciones disponibles:

Una tubería aislada calentada eléctricamente, donde las corrientes eléctricas fluyen a lo largo de ésta [7], donde la tubería actúa como resistencia.

Dos tuberías concéntricas (pipe in pipe) donde el crudo fluye a través de la tubería interna eléctricamente aislada, la cual es rodeada concéntricamente por una tubería externa eléctricamente conductiva [7].

b. Calentamiento a vapor

La transferencia de calor se da a través de una tubería principal que transporta el crudo y las paredes de las tuberías conocidas como venas de vapor, las cuales se adosan a la tubería principal. Este sistema de tuberías se aísla del exterior con ayuda de un sistema de aislamiento térmico. Bajo estas condiciones se presenta el fenómeno de transferencia de calor, permitiendo un intercambio térmico entre las tuberías de vapor y el oleoducto [7]. Este último haciendo referencia a los intercambiadores de calor, donde el fluido de calentamiento puede ser agua, aceite, etc. El cual es anteriormente calentado por una caldera.

c. Calentamiento a fuego directo

El calentador a fuego directo es un equipo de intercambio térmico en el cual un quemador proporciona gases calientes que permiten la transferencia de energía térmica a un líquido o gas que fluye entre las tuberías instaladas dentro del calentador, existen con capacidades que van desde los 5,000 a los 250,000 BPD [10].

El suministro de calor es proporcionado por un combustible, por lo general el combustible usado se encuentra en estado líquido o gaseoso, este se quema dentro de la cámara de combustión. Los calentadores a fuego directo garantiza una entrada de calor uniforme en cada paso, evitando la degradación térmica, permitiendo elevar los niveles de temperatura y modificar sus características químicas y físicas a las que no se pueden llegar utilizando vapor de agua; para cumplir con las condiciones del proceso. Estos equipos son conocidos también como calentadores u hornos de proceso [10].

d. Intercambiador de calor

Son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclado [11]. Un equipo de intercambio de calor es el que transfiere energía térmica desde una fuente o un fluido a alta temperatura hacia un fluido a baja temperatura con ambos fluidos moviéndose a través del aparato [12].

Para realizar el dimensionamiento de un intercambiador de calor, deben considerarse los siguientes fenómenos térmicos:

La convección forzada de cada uno de los 2 fluidos. La convección es la transmisión calorífica entre una pared y un fluido en movimiento, ambos con una temperatura distinta. En el caso de los intercambiadores térmicos, hablamos de convección forzada ya que se produce por circulación artificial (bombas, turbinas, ventiladores, etc.) [13].

3.2.4.3 Método de Emulsificación

Es uno de los nuevos métodos para transportar crudos pesados vía oleoductos. Éste permite la mezcla de fluidos inmiscibles bajo condiciones normales de manera más o menos homogénea, no se requiere que estos fluidos se encuentren en la misma proporción. Uno de los fluidos se dispersará en el otro en forma de pequeñas gotas y con la ayuda de surfactantes, se logra una emulsión agua crudo estable con una viscosidad reducida [7].

Existen dos fases en el proceso de la emulsificación, la primera es la fase continua o fase dispersante que es la fase del fluido que se encuentra en mayor proporción y la segunda es la fase dispersa que es la del fluido que se encuentra distribuido en forma de gotas en la fase continua [7].

Existen tres tipos de emulsiones inestables: la floculación, la cremación, y la coalescencia [7].

3.2.5 Criterios de diseño de transporte de crudos

Para la realización de un diseño adecuado de un oleoducto, se deben conocer las siguientes condiciones, que afectan el fluido en el oleoducto:

- La relación entre la tubería y la tasa del flujo del fluido (número de Reynolds (Re)).
- Las propiedades físicas del líquido: viscosidad, densidad, presión de vapor, punto de fluidez, compresibilidad y temperatura.
- Las condiciones de operación del oleoducto (caudal, presión, temperatura y pérdidas de presión admisibles en el sistema)
- Las características de la tubería: el diámetro interno (D), la longitud (L), y la rugosidad relativa de la superficie de la pared interna [7].

La topografía, la capacidad del oleoducto y la confiabilidad del suministro de potencia disponible, generan un conjunto único de variables que influyen significativamente en la configuración de las estaciones de bombeo y en la selección del tipo de bomba principal, en el mecanismo de impulsión y los equipos de control de presión de la estación [7].

3.3 OPTIMIZACIÓN

La optimización consiste en la selección de una alternativa mejor, en algún sentido, que las demás alternativas posibles [14].

Las técnicas de optimización se enfocan en determinar la política a seguir para maximizar o minimizar la respuesta del sistema. Dicha respuesta, en general, es un indicador del tipo

“Costo”, “Producción”, “Ganancia”, etc., la cual es una función de la política seleccionada. Dicha respuesta se denomina objetivo, y la función asociada se llama función objetivo [15].

Una política es un determinado conjunto de valores que toman los factores que podemos controlar a fin de regular el rendimiento del sistema. Es decir, son las variables independientes de la función que la respuesta del sistema [15].

Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones [14].

3.3.1 Elementos para optimización

Los problemas de optimización se componen generalmente de estos tres elementos:

Función objetivo: Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Como ejemplo de funciones objetivo se pueden mencionar: la minimización de los costes variables de operación de un sistema eléctrico, la maximización de los beneficios netos de venta de ciertos productos, la minimización del cuadrado de las desviaciones con respecto a unos valores observados, la minimización del material utilizado en la fabricación de un producto, etc. [14].

Variables de decisión: Representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Desde un punto de vista funcional se pueden clasificar en variables independientes o principales o de control y variables dependientes o auxiliares o de estado, aunque matemáticamente todas son iguales. En el caso de un sistema eléctrico serán los valores de producción de los grupos de generación o los flujos por las líneas. En el caso de la venta, la cantidad de cada producto fabricado y vendido. En el caso de la fabricación de un producto, sus dimensiones físicas [14].

Restricciones: Representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, las potencias máximas y mínimas de operación de un grupo de generación, la capacidad de producción de la fábrica para los diferentes productos, las dimensiones del material bruto del producto, etc. [14].

3.3.2 Métodos de optimización

Los métodos de optimización los podemos clasificar en: métodos clásicos (que son los algoritmos que habitualmente se explican en los libros de optimización) y métodos metaheurísticos (que aparecieron ligados a lo que se denominó inteligencia artificial e imitan fenómenos sencillos observados en la naturaleza) [14].

Dentro de los primeros se encuentra la optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, dinámica, etc. que se explican en el documento. En el segundo grupo se incluyen los algoritmos evolutivos (genéticos entre otros), el método del recocido simulado (simulated annealing), las búsquedas heurísticas (método tabú, búsqueda aleatoria, avariciosa, etc.) o los sistemas multiagente [14].

De forma muy general y aproximada se puede decir que los métodos clásicos buscan y garantizan un óptimo local mientras que los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global aunque no garantizan su alcance [14].

3.4 PYTHON

Python es un lenguaje de scripting independiente de plataforma y orientado a objetos, preparado para realizar cualquier tipo de programa, desde aplicaciones Windows a servidores de red o incluso, páginas web. Es un lenguaje interpretado, lo que significa que no se necesita compilar el código fuente para poder ejecutarlo, lo que ofrece ventajas como la rapidez de desarrollo e inconvenientes como una menor velocidad [16].

Ventajas:

- La cantidad de librerías que contiene, tipos de datos y funciones incorporadas en el propio lenguaje, que ayudan a realizar muchas tareas habituales sin necesidad de tener que programarlas desde cero.
- La sencillez y velocidad con la que se crean los programas. Un programa en Python puede tener de 3 a 5 líneas de código menos que su equivalente en Java o C.
- La cantidad de plataformas en las que podemos desarrollar, como Unix, Windows, OS/2, Mac, Amiga y otros.
- Además, Python es gratuito, incluso para propósitos empresariales [16].

3.4.1 Python para optimización

En el ecosistema científico de Python podemos encontrar varias librerías que nos van a ayudar a enfrentar los problemas de optimización, entre las que podemos destacar [17].

- `scipy.optimize`: Este es el módulo de optimización de SciPy, en el cual vamos a poder encontrar varias rutinas numéricas para resolver problemas no lineales de optimización.
- `CVXopt`: Esta es una librería con una interface amigable para resolver problemas de optimización convexa.

- PuLP: Esta librería nos proporciona un lenguaje para modelar y resolver problemas de optimización utilizando programación lineal.
- Pyomo: Esta librería también nos va a proporcionar un lenguaje para modelar problemas de optimización en Python. Tiene una notación similar a la que utilizaríamos en la definición matemática de los problemas [17].

Debemos destacar que tanto PuLP como Pyomo requieren la instalación adicional de diferentes solvers para poder resolver los problemas de optimización. Algunos de los solvers que soportan son: GLPK, COIN CLP/CBC, CPLEX y GURUBI, entre otros [17].

4. METODOLOGÍA

4.1 Descripción del proceso

El presente trabajo es la continuación de una investigación realizada anteriormente sobre la implementación de las plataformas Apaika y Nenke, donde la producción del bloque 31 se transporta hacia las instalaciones del bloque 12 EPF, a través de un ducto de 24 pulgadas recorriendo una distancia de 55km [2].

El fluido pierde temperatura al llegar a la planta de proceso de EPF aumentando la viscosidad del fluido, para lo cual se requiere la transferencia de calor en un inicio al fluido y luego a la fase crudo para permitir la deshidratación y ponerlo en condiciones de exportación [2].

El trabajo mencionado cuenta con un estudio técnico para el calentamiento del fluido del Bloque 31 mediante un intercambiador de aceite térmico.

Se prevé que la producción de Apaika llegará al EPF con una temperatura inferior a 150°F por tal razón, se mezclará con agua caliente de producción a 180°F. Este calentamiento se realizará en mezcladores estáticos con agua del sistema de inyección de agua que toman de los tanques de almacenamiento que inyectarán agua caliente a los mezcladores. Cuando la temperatura del fluido de producción sea igual o mayor a 150°F no será necesario la operación del sistema de calentamiento mencionado. El fluido que sale del separador necesita ser calentado hasta una temperatura de 82,2 °C para poder ingresar al sistema de deshidratación [2].

4.2 Equipos

Los equipos a analizarse son principalmente el intercambiador de calor encargado del calentamiento del crudo y los equipos de bombeo encargados del transporte del fluido.

4.2.1 Características del intercambiador de calor

Las características técnicas del intercambiador de calor se detallan en el la **Tabla 4. 1**

Tabla 4. 1. Datos técnicos del intercambiador de calor

Variable	Lado de la coraza (crudo)		Lado de tubos (Hot-Oil)	
	Entrada	Salida	Entrada	salida
Temperatura (°C)	65,50	82,20	187,20	142,70
Presión (Pa)	270274,46	250279,66	342669,40	340600,98
Caudal (m ³ /s)	0,067		0,036	
Flujo másico (kg/s)	61,40		32,06	

Fuente: [2].

4.2.2 Características de los equipos de bombeo

El sistema de bombeo de aceite térmico opera con una bomba en el rango de flujo desde 250 a 400 m³/h con una altura de 35 a 75 metros, de acuerdo a la curva del fabricante. En nuestro caso las bombas del sistema boiler entregan 0,078 m³/s a una altura de 42 m, para el número de revoluciones de 3500 rev/min y un diámetro de 200 mm [2].

4.3 Variables de investigación

En la **Tabla 4. 2** se describe las variables dependiente e independiente:

Tabla 4. 2. Variables de la investigación

Variable Independiente	Temperatura
Variable Dependiente	Costo de Operación de bombeo y calentamiento del transporte de crudo (Costo total)

Fuente: Valeria Molina

4.4 Matriz de relación de variables

Las variables de mayor importancia en el estudio son la viscosidad, densidad y gradiente de presión, mismas que fluctúan en función de la temperatura del fluido. Siendo de esta manera que los costos totales de operación dependen directamente de la temperatura del crudo (**Tabla 4. 3**).

Tabla 4. 3. Matriz de relación de variables

VARIABLES	TEMPERATURA
Viscosidad	Al incrementarse la temperatura la viscosidad disminuye, por lo que sus condiciones reológicas lo vuelven un fluido de fácil transporte, es necesario tomar datos experimentales para determinar una relación no lineal entre estas variables

Densidad	Es una relación de masa con el volumen, la masa es una variable siempre constante lo que no pasa con el volumen, el cual al incrementarse la temperatura incrementa el volumen del fluido, haciendo que con el incremento de temperatura la densidad disminuya.
Gradiente de presión	En una tubería debido a su longitud existe pérdidas de carga por fricción, que están relacionadas directamente con la viscosidad, al disminuir la viscosidad con el incremento de temperatura también disminuye la pérdida de carga en el sistema.
Costo de operación del sistema de bombeo	Una adecuada temperatura proporciona facilidad a la bomba en el proceso de succión y descarga, por que esta le tomaría realizar el mismo trabajo en menor tiempo de operación, haciendo reducir los costos en el sistema de bombeo
Costo de operación del sistema de calentamiento	El costo del calentamiento es directamente proporcional a la temperatura, de modo que por cada grado centígrado que se desee calentar incrementa la potencia requerida por el sistema, del mismo modo incrementa los costos de operación.
Costo total de operación	Es la suma de los costos de los sistemas involucrados en el transporte de fluidos, si la temperatura es muy baja el sistema de bombeo consume más energía eléctrica, en cambio, al incrementar la temperatura los costos de bombeo disminuyen por las facilidades de transporte y se incrementa el costo de calentamiento, este último desperdicia energía a altas temperaturas dado que la viscosidad ya no sufre cambios significativos, por lo que se busca una temperatura de equilibrio para determinar el costo mínimo de ambos sistemas y el transporte de crudo sea eficiente.

Fuente: Valeria Molina

4.5 Algoritmo

Previo a realizar un método de cálculo o aplicación se debe conocer cuáles son las herramientas disponibles y los resultados que se desea obtener, de este modo se elabora un algoritmo que permite seguir una secuencia hasta obtener el resultado.

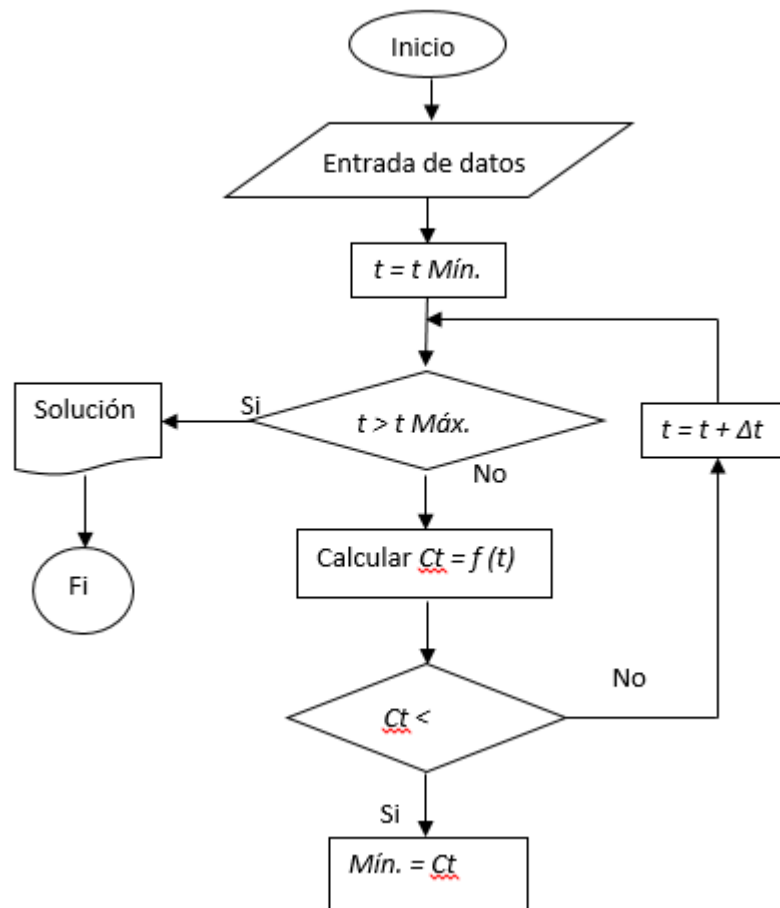


Figura 4. 1. Algoritmo del método de cálculo

Fuente: [2].

El diagrama resume el siguiente proceso: se ingresan los datos al método de cálculo o aplicación, donde t es la temperatura con la cual el crudo ingresa al sistema, siendo la temperatura mínima. Si esta temperatura es mayor a la temperatura máxima registrada entonces no necesita ingresar al proceso de calentamiento, caso contrario mediante las formulas determinadas de costo total en función de la temperatura se busca el costo total mínimo de operación, si se ha obtenido el costo mínimo mediante la optimización entonces la temperatura es la óptima para transporta, si no es el costo mínimo entonces incrementa la temperatura hasta encontrar un costo total mínimo.

4.6 Definición de variables

Las variables que intervienen en el caso de estudio con sus respectivas unidades se presentan en la Tabla 5.

Tabla 4. 4. Variables de operación del sistema de transporte

Variable crítica	Símbolo	Unidades
Temperatura del fluido antes de ser transportada	T_s	°C
Temperatura optima de calentamiento	T_e	°C
Viscosidad	μ	kg/m.s
Densidad	ρ	kg/m ³
Gradiente de presión	ΔP	Pa
Gradiente de temperatura	ΔT	°C
Velocidad del fluido	v	m/s
Longitud de la tubería	L	m
Diámetro de la tubería	D	m
Capacidad de transporte de la bomba	Q	m ³ /h
Flujo masico	\dot{m}	kg/s
Calor específico	C_p	J/kg.°C
Volumen a transportar	V	m ³
Índice de flujo	n	N/A
Diferencia de altura	ΔZ	m

Fuente: Valeria Molina

4.7 Planteamiento de ecuaciones

Las ecuaciones expuestas a continuación son el producto de la investigación del proyecto Apaica-Nenke del apartado 4.1, obtenidas mediante experimentación, mismas que pueden ser utilizadas exclusivamente para el tipo de crudo analizado. Las ecuaciones a usarse en el método de cálculo son las siguientes:

4.7.1 Propiedades del fluido

Ecuaciones de las propiedades que intervienen en el comportamiento del flujo multifásico. Mediante estos modelos se pueden simular los valores de las propiedades que relacionan dicho combustible para variaciones de la temperatura y del gradiente de velocidad, de esencial aplicación en la obtención de la temperatura óptima de bombeo, teniendo en cuenta el intercambio térmico del sistema [2].

4.7.1.1 Densidad en función de temperatura

Se obtuvo mediante experimentación del crudo a transportar, la formulas presentadas en este procedimiento fueron definidas en la investigación mencionada en la descripción del proceso en el apartado 4.1

Un flujo se clasifica como compresible o incompresible, dependiendo del nivel de variación de la densidad del fluido en ese flujo. La incompresibilidad es una aproximación y se dice que el flujo es incompresible si la densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo [6]. En la ecuación (4. 1) se obtiene que la densidad se encuentra en función de la temperatura, por la tanto el crudo se trata de flujo compresible.

La densidad es una propiedad de fácil medición que se puede correlacionar con otras propiedades claves para evaluar el desempeño de los combustibles, como el poder calorífico. Adicionalmente, la densidad es uno de los parámetros más importantes en el almacenamiento, transporte y comercialización de los combustibles [18].

Mediante datos obtenidos experimentalmente en el estudio de Apaika Nenke, se utilizaron dichos valores para estimar funciones de densidad, calor específico, coeficiente de conductividad térmica del crudo.

$$\rho = -7,62 \cdot \ln(t) + 1012 \quad (4. 1)$$

Donde: ρ – densidad del combustible; $\left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot t$ –temperatura a la que se desea conocer la densidad; ($^{\circ}C$).

4.7.1.2 Calor específico del crudo en función de la temperatura

La cantidad de energía necesaria para incrementar en un grado la temperatura de una masa unitaria del flujo multifásico [11].

El poder calorífico de crudo o su derivado es una propiedad importante para la evaluación del comportamiento del combustible, puesto que este se encuentra sujeto a cambios de temperatura y presión constantes [18].

$$c_p = 8,56 \cdot t + 1483 \quad (4. 2)$$

Donde t –temperatura a la que se desea conocer la densidad; ($^{\circ}C$).

4.7.1.3 Coeficiente de conductividad térmica del crudo en función de la temperatura

La capacidad del crudo para conducir calor [11]. La tendencia decreciente de la conductividad térmica se le atribuye a la reestructuración de las partículas dispersas en el combustible, efecto relacionado con la variación del comportamiento reológico y la densidad [2].

$$kp = (-0,13 \cdot t + 149,1) \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

Donde t –temperatura a la que se desea conocer la densidad; ($^{\circ}C$).

4.7.1.4 Viscosidad en función de la temperatura

Capacidad de resistencia a la fluencia (1.4.4). Incorporando los parámetros reológicos ajustados, se obtuvo el modelo que describe el comportamiento de la viscosidad aparente del fluido multifásico, para variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad; siendo estas las variables con mayor incidencia en los cambios de la viscosidad aparente para un fluido pseudoplástico [2].

Su aplicación puede incidir en la correcta descripción del consumo energético de las instalaciones, al conocerse el comportamiento del fluido ante variaciones de la temperatura, la velocidad y el diámetro de la tubería [2].

$$\mu_a = \frac{1,75}{e^{0,003t}} \cdot \left(\gamma\right)^{-0,36} \quad (4.4)$$

Donde t –temperatura a la que se desea conocer la densidad; ($^{\circ}C$).

4.7.2 Propiedades del aire

Estas propiedades son necesarias para el cálculo del intercambio de calor durante el transporte del combustible por tuberías [2]

4.7.2.1 Coeficiente de conductividad térmica del aire; ($W/m \cdot ^{\circ}C$)

La capacidad del aire para conducir calor [10] en función de la temperatura peculiar calculada en el punto 4.7.2.5

$$k = 0,0244 + 0,6763 * 10^{-4} \cdot t_p \quad (4.5)$$

4.7.2.2 Densidad del aire; (kg/m³).

Cantidad de masa por unidad de volumen, definida mediante experimentación en función de la temperatura peculiar calculada en el punto 4.7.2.5

$$\rho_a = \frac{353,44}{t_p + 273,15} \quad (4.6)$$

4.7.2.3 Capacidad calorífica del aire a presión constante; (J/kg·°C)

La cantidad de energía necesaria para incrementar en un grado la temperatura del aire en función de la temperatura peculiar calculada en el punto 4.7.2.5

$$Cp_a = 999,2 + 0,1434 \cdot t_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot t_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot t_p^3 \quad (4.7)$$

4.7.2.4 Coeficiente dinámico de viscosidad del aire; (Pa·s)

Resistencia del aire a la fluencia en función de la temperatura peculiar calculada en el punto 4.7.2.5

$$\mu = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot t_p \quad (4.8)$$

4.7.2.5 Temperatura del peculiar; (°C)

Variable auxiliar de cálculo para las propiedades del aire.

$$t_p = \frac{t_s + t_a}{2} \quad (4.9)$$

Donde t_a - temperatura del aire; (°C) y t_s - temperatura de la superficie; (°C).

4.7.3 Constantes de cálculo

Con el objetivo de conocer constantes que definen las condiciones del sistema y el tipo de flujo, se toma en consideración la modelación teniendo en cuenta las configuraciones de las tuberías (véase en la figura 7), las que se encuentran soterradas sin aislamiento térmico donde la temperatura y humedad del terreno influyen significativamente; además se toma como referencia las propiedades de los materiales y los fluidos que intervienen en el proceso de transporte [2].

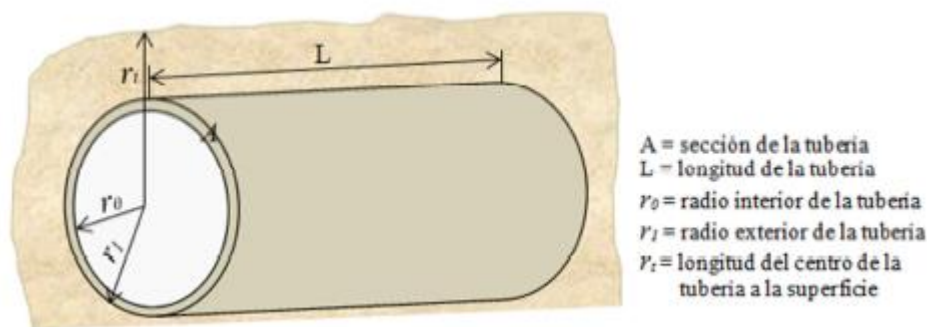


Figura 4. 2. Radios de la sección transversal de la tubería de transporte

Fuente: [2]

4.7.3.1 Numero de Reynolds para fluidos pseudoplásticos

Especifica el tipo de flujo del crudo especificado en el apartado 1.4.6, ecuación obtenida experimentalmente.

$$Re^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{k_p} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (4. 10)$$

4.7.3.2 Coeficiente de convección de combustible

Constante de transferencia de energía entre una superficie sólida y el combustible [11], obtenida mediante experimentación.

El coeficiente de convección para fluido multifásico, tanto en convección forzada como natural, se determina por la expresión propuesta por Laurencio [2].

$$h = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D} \quad (4. 11)$$

Dónde: Pr = número de Prandt; (adimensional). D = diámetro de la tubería; (m).

k_p = coeficiente de conductividad térmica del hidrocarburo; (W/m·°C).

4.7.3.3 Numero de Prandt

Constante de difusividad térmica [6] la cual define si el calor se difunde rápidamente en comparación con la velocidad de flujo del rudo.

El número de Prandtl, que describe la característica termofísica del agente portador de calor [2].

$$Pr = \frac{\mu_a \cdot c_p}{kp} \quad (4.12)$$

4.7.4 Gradiente de temperatura

Facilita determinar las variaciones de temperaturas del fluido al ser transportado por tuberías, y posibilita conocer si estas variaciones son significativas [2]

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_i - t_e)}{Q_p \cdot \rho_p \cdot c_{pp} \left(\frac{1}{r_0 \cdot 0,023 \cdot Re_p^{0,8} \cdot Pr_p^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D_i}} + \frac{1}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{k_B} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{k_C} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{r_3 \cdot 0,245 \cdot Re_a^{0,6} \cdot \frac{k_a}{D_e}} \right)} \quad (4.13)$$

Dónde: t_i = temperatura del fluido en el interior de la tubería; (°C). t_e = temperatura exterior del terreno; (°C). L = longitud de la tubería; (m). r_0 = radio interior de la tubería; (m). r_1 = radio exterior de la tubería; (m). r_2 = Longitud desde el centro de la tubería a la superficie; (m). k_A = coeficiente de conductividad térmica de la tubería (W/m·°C). k_B = coeficiente de conductividad térmica de la tierra (W/m·°C) [2].

4.7.5 Gradiente de presión

El gradiente de presión longitudinal total en la tubería se divide en cuatro componentes:

$$\frac{dp}{dx} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_v + \left(\frac{dp}{dx}\right)_m + \left(\frac{dp}{dx}\right)_a + \left(\frac{dp}{dx}\right)_G \quad (4.14)$$

El primer componente es el gradiente de presión en la tubería debido al esfuerzo viscoso del fluido, el segundo componente es el gradiente de presión adicional por efectos de mezclado entre las capas de flujo en la tubería, el tercer componente es el gradiente de presión debido a los cambios de densidad por variaciones de temperaturas en el fluido durante su transporte y el cuarto componente es debido a los cambios de energía potencial como consecuencia de los cambios de pendiente en la tubería [2].

Del análisis realizado y mediante la sustitución de las ecuaciones, se obtiene la expresión del gradiente de presión para el transporte del combustible pesado por tuberías. El modelo cumple con el comportamiento de un fluido seudoplástico, lo que queda explícito como [2]:

$$\Delta p = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^n + \frac{0,14}{Re^{*0,2}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \right] \quad (4.15)$$

4.7.6 Costos de operación

Los costos más representativos del sistema son los costos de operación de bombeo y los costos de calentamiento, los cuales se analizarán mediante el método de cálculo para determinar un costo total mínimo de operación.

4.7.6.1 Costo de la operación de bombeo

El costo de operación de una bomba viene dado por la siguiente fórmula:

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{n_m \cdot n_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3} \quad (4.16)$$

Donde: C_{bom} – costo de bombeo de la instalación; (\$/año). N_h – potencia hidráulica; (W). t_{el} – tarifa eléctrica; (\$/kW·h). t_t – tiempo de trabajo del equipo; (h/año). n_b – rendimiento de la bomba; (adimensional). n_m – rendimiento del motor eléctrico; (adimensional) [2].

Para cualquier fluido, la potencia hidráulica necesaria para su transporte por una tubería será:

$$N_h = Q \cdot \Delta p \quad (4.17)$$

Donde: Q - flujo volumétrico; (m³/s). Δp - caída de presión; (Pa).

Finalmente el costo de bombeo se expresaría con la siguiente ecuación:

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{n_m \cdot n_b} \cdot Q \cdot \Delta p \cdot 10^{-3} \quad (4.18)$$

4.7.6.2 Costo del calentamiento

El calentamiento del fluido es el método más utilizado para disminuir la viscosidad del combustible pesado y mejorar la efectividad del proceso de separación. Para determinar el costo de calentamiento del combustible se propone la ecuación siguiente [2]

$$C_{cal} = C_v \cdot k_t \cdot \Delta t \cdot t_t \cdot 3600 \quad (4. 19)$$

Donde: C_{cal} – costo por calentamiento del combustible; (CUC/año). C_v – costo específico del vapor; (CUC/kg). m_v – Flujo másico de vapor; (kg/s).

$$m_v = k_t \cdot \Delta t \quad (4. 20)$$

Donde: Δt – diferencia de temperatura del combustible a la entrada y a la salida del intercambiador de calor; (°C). k_t – coeficiente de proporcionalidad del intercambiador de calor, el cual se obtiene por experimentación (0,0326) [2].

$$m = 0,0326 \cdot (t_e - t_s) \quad (4. 21)$$

Siendo: t_e – temperatura del combustible a la entrada del intercambiador de calor, (°C). t_s – temperatura del combustible a la salida del intercambiador de calor, (°C).

4.7.6.3 Costo total

Para un sistema de transporte de combustible, es importante considerar la temperatura y presión de operación, la configuración del sistema de impulsión, la longitud y diámetro de la tubería con el costo del material, relacionados estos factores con la velocidad del fluido y sus propiedades físicas y reológicas. El análisis de los costos de operación del sistema de transporte bajo los factores antes mencionados, conduce a la determinación de los parámetros racionales de operación, ya sea, la velocidad racional, el diámetro económico de la tubería o la temperatura racional de transporte, para el caso del trasiego de fluidos de elevada viscosidad [2]

$$C_{total} = C_{bom} + C_{cal} \quad (4. 22)$$

4.8 Descripción de variables

En el desarrollo del método de cálculo se tienen tres tipos de datos, los primeros son datos que pueden variar conforme el diseño de la estructura del proceso de transporte como longitud y diámetro, los segundos son constantes de los equipos que se utilizan para el diseño de este proyecto Apaika-Nenke como son el coeficiente de conductividad térmica del intercambiador utilizado, estos valores no cambiarán. Por último las variables calculadas a través del modelo matemático, las cuales son directamente las propiedades del fluido y aire, gradientes de presión y temperatura, costos totales.

4.8.1 Variables solicitadas

Son aquellas constantes que pueden variar conforme al tramo que se está estudiando tales como las que se muestran en la **Tabla 4. 5**. Y aquellas constantes que dependen de las condiciones políticas, sociales, ambientales, etc. Que se muestran en la **Tabla 4. 6**.

Tabla 4. 5. Datos del sistema de transporte

Tramo	L: Longitud de la tubería (m)	D: Diámetro de la tubería (m)	e: Espesor de la tubería (m)	Q: Flujo volumétrico (m³/s)
Apaika-Nenke	5200	0.4572	0.0103	0.036
Nenke-ECB	21100	0.4572	0.0103	0.096
ECB-EPF	32500	0.6096	0.0127	0.096

Fuente: [2].

Tabla 4. 6. Parámetros de los equipos instalados y otras condiciones

Parámetro	nm: Rendimiento del motor	nb: Rendimiento de la bomba	tel: Tarifa eléctrica (\$/kW.h)	(tt): Tiempo de trabajo (horas/año)	Cv: Costo de aporte de calor (\$/kg)
Valor	0.95	0.74	0.13	8784	0.003

Fuente: [2]

4.8.2 Constantes utilizadas en el diseño del método de calculo

Son aquellas que fueron usadas para el diseño del modelo matemático pertenecientes a las instalaciones y equipos utilizados en estas instalaciones y para el tipo de crudo tratado, y permanecen constantes para todos los tramos, los cuales se muestran en la **Tabla 4. 7**.

Tabla 4. 7. Constantes de las instalaciones, equipos, ambiente.

n: Índice de flujo	g: Gravedad (m²/s)	ΔZ: Altura geodésica (m)	kA: Coeficiente de conductividad térmica de la tubería	kB: Coeficiente de conductividad térmica de la tierra	kt: Conductividad del intercambiador
0.92	9.8	6	60.5	0.035	0.0326

Fuente: [2]

4.8.3 Variables calculadas a través del método de calculo

Son las detalladas en el apartado 4.7. Las cuales fueron obtenidas mediante experimentación de

crudo en un laboratorio, cabe recalcar que estas formulas representan el comportamiento de un solo tipo de crudo y solo en las instalaciones mencionadas (Véase en el apartado 4.1).

Mediante una tabla en Excel se ha realizado el cálculo de las variables mostradas en la tabla 9 en cada uno de los tramos estudiados en este proyecto.

Tabla 4. 8. Variables de comportamiento del proceso

VARIABLE	TRAMO 1 APAIIKA- NENKE	TRAMO 2 NENKE-ECB	TRAMO 3 ECB-EPF
Temperatura (Tf)	69	73	53
Densidad (ρ)	979.7361084	979.3066991	981.7463756
Calor especifico del crudo (Cp)	2073.64	2107.88	1936.68
Coefficiente de Conductividad termica del crudo (kp)	0.14013	0.13961	0.14221
Viscosidad (ua)	0.154099873	0.136676027	0.249024467
Indice de consistencia masica (K)	0.220872518	0.195898787	0.356928658
Numero de Reynolds (Re)	765.2603012	2214.520073	1525.536348
Numero de Prandt (Pr)	2280.365811	2063.581868	3391.327643
Coefficiente de conveccion de combustible (h)	14.54123992	32.89639814	21.6502037
Gradiente de presion (Δp)	102861.7987	602699.1369	447352.5941
Costo de bombeo (Cb)	6015.018531	93983.61742	69759.20901
Gradiente de temperatura (Δt)	1.068656022	1.761960998	0.951221028
Costo de calentamiento (Ccal)	3305.00119	87186.64304	44127.20132
Costo total (Ct)	9320.019721	181170.2605	113886.4103

Fuente: Valeria Molina

Los valores mostrados en la **Tabla 4. 8** presentan todas las variables que deben ser calculadas para obtener las gradientes de presión y temperatura, con las cuales se obtienen los costos de bombeo, de calentamiento y el costo total del transporte del crudo para los tres tramos solicitados. Los valores de la tabla 9 serán corroborados por el programa desarrollado en Python y posteriormente serán analizados en conjunto.

4.9 Selección de herramientas matemáticas

Para el desarrollo del método de cálculo se ha analizado software con los cuales trabajar, entre ellos Python y Matlab, puesto que Python posee librerías de optimización de funciones y herramientas matemáticas más desarrolladas y es de uso libre, la aplicación se realizara en dicho programa utilizando las siguientes herramientas matemáticas.

En el desarrollo de la aplicación se utilizó las siguientes herramientas:

Math: Librería utilizada para definir valores de constantes numéricas como pi, e.

Numpy: permite trabajar con funciones matemáticas de alto nivel como los valores de pi y e dentro de matrices y vectores, las cuales son constantes que se encuentran presentes en la función objetivo de este proyecto.

Tkinter: permite desarrollar la interfaz gráfica para mostrar ventanas, botones, texto e imágenes de los resultados.

Matplotlib: permiten realizar la gráfica de la función objetivo, haciendo visible el punto mínimo que es el costo de operación, sirviendo como comprobación visual del proceso (**Figura 4.3**).

Diagrama de comportamiento de Costo Vs Temperatura

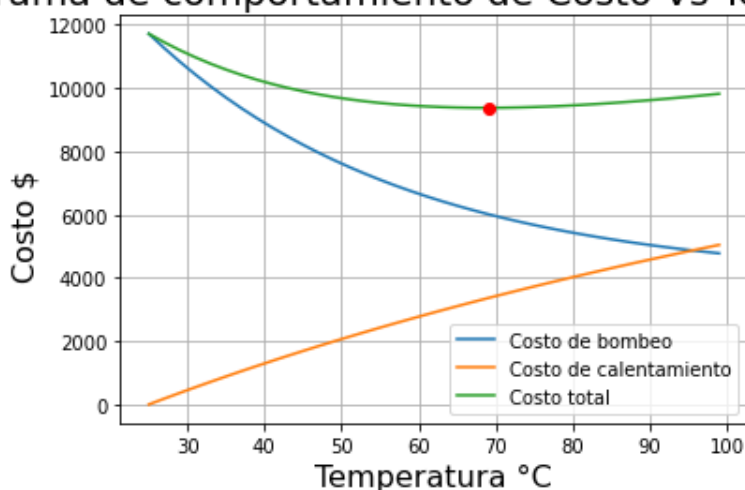


Figura 4.3. Costos del sistema de transporte

Fuente: Valeria Molina

4.10 Desarrollo del método de cálculo

Progreso seguido en Python, también puede observar el manual de usuario en el Anexo C.

1. Librerías importadas necesarias para el desarrollo del programa

```
import math

import numpy as np #librería para el uso de herramientas de cálculo
matemático y símbolos

import matplotlib.pyplot as plt #librería usada para graficar la función en
estudio

plt.style.use('ggplot')

from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg

from tkinter import *

import tkinter as tk
```

2. Creación de la interfaz gráfica principal

```

root = Tk()

root.title("Optimización de transporte de crudo")

root.geometry("1366x768")

titulo = Label(root, text = "UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI\nINGENIERÍA EN
ELECTROMECAÁNICA\nMolina Bautista Valeria Lisseth", fg='blue',
font=('arial',16,'bold'))

titulo.grid(row=0,column=3)

```

3. Rotulación y creación de pantallas para el ingreso de las variables usadas en el programa

```

D_p = Label(root, text = "Diámetro[m]", fg='green', font=('arial',12))
pantalla1 = Entry(root, width=7, bg="black", fg="white", borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

D_p.grid(row=2,column=0)
pantalla1.grid(row=2, column=2)

L_p = Label(root, text = "Longitud [m]", fg='green', font=('arial',12))
pantalla2 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

L_p.grid(row=3,column=0)
pantalla2.grid(row=3, column=2)

e_p = Label(root, text = "Espesor de la tubería [m]", fg='green',
font=('arial',12)) pantalla3 = Entry(root,
width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,font=('arial', 12, 'bold'))

e_p.grid(row=4,column=0)
pantalla3.grid(row=4, column=2)

DZ_p = Label(root, text = "Altura geodésica [m]", fg='green',
font=('arial',12)) pantalla4 = Entry(root,
width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,font=('arial', 12, 'bold'))

DZ_p.grid(row=5,column=0)
pantalla4.grid(row=5, column=2)

rt_p = Label(root, text = "Longitud del centro\n de la tubería a la\n
superficie [m]", fg='green', font=('arial',12))

```

```

pantalla5 = Entry(root, width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,font=('arial', 12, 'bold'))

Tmin_p.grid(row=9,column=0)

pantalla6.grid(row=9, column=2)

Tmax_p = Label(root, text = "Temperatura máxima de bombeo [°C]",
fg='green',font=('arial',12))

pantalla7 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

Tmax_p.grid(row=10,column=0)

pantalla7.grid(row=10, column=2)

Ts_p = Label(root, text = "Temperatura de la superficie [°C]",fg='green',
font=('arial',12))pantalla8 = Entry(root,width=7,
bg="black",fg="white",borderwidth=0,font=('arial', 12, 'bold'))

Ts_p.grid(row=11,column=0)

pantalla8.grid(row=11, column=2)

nm_p = Label(root, text = "Rendimiento del motor" ,fg='green',
font=('arial',12))

pantalla9 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

nm_p.grid(row=12,column=0)

pantalla9.grid(row=12, column=2)

nb_p = Label(root, text = "Rendimiento de la
bomba",fg='green', font=('arial',12))

pantalla10 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

nb_p.grid(row=13,column=0)

pantalla10.grid(row=13, column=2)

Tt_p = Label(root, text = "Tiempo de trabajo [horas]" ,
fg='green',font=('arial',12))

pantalla11 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

Tt_p.grid(row=15,column=0)

pantalla11.grid(row=15, column=2)

```

```

Tel_p = Label(root, text = "Tarifa eléctrica [$/kW/h]", fg='green',
font=('arial',12))

pantalla12 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

Tel_p.grid(row=16,column=0)

pantalla12.grid(row=16, column=2)

Cac_p = Label(root, text = "Costo de aporte de calor", fg='green',
font=('arial',12))

pantalla13 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

Cac_p.grid(row=17,column=0)

pantalla13.grid(row=17, column=2)

Q_p = Label(root, text = "Flujo másico",fg='green',font=('arial',12))

pantalla14 = Entry(root, width=7, bg black ,fg="white", borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

pantalla15.grid(row=19, column=5)

pantalla16 = Entry(root,width=7,bg="black",fg="white",borderwidth=0,
font=('arial', 12, 'bold'))

pantalla16.grid(row=18, column=5)

Label(root, text="El costo mínimo es de: ",font=('arial',
12,'bold')).grid(row=19, column =4)

Label(root, text="La temperatura Óptima de bombeo es: ",font=('arial',
12,'bold')).grid(row=18, column =4)

```

- Definición de la función que permite limpiar las pantallas de ingreso y muestreo de datos. Además se creó el botón (Limpiar) que hace posible esta acción.

```

def despejar():

    pantalla1.delete(0, END)

    pantalla2.delete(0, END)

    pantalla3.delete(0, END)

    pantalla4.delete(0, END)

    pantalla5.delete(0, END)

    pantalla6.delete(0, END)

    pantalla7.delete(0, END)

```

```

pantalla8.delete(0, END)

pantalla9.delete(0, END)

pantalla10.delete(0, END)

pantalla11.delete(0, END)

pantalla12.delete(0, END)

pantalla13.delete(0, END)

pantalla14.delete(0, END)

pantalla15.delete(0, END)

pantalla16.delete(0, END)

boton_despejar = Button(root,text="Limpiar",width=25,height=2,bg="deep sky
blue",fg="black",borderwidth=1,cursor="hand2",command=despejar,font=('arial',16
,'bold')).grid(row=20, column=0, padx=1, pady=1)

```

- Definición de la función que obtiene los datos escritos en cada una de las pantallas (variables), continuando con la resolución de la optimización que se muestra después de presionar el botón CALCULAR.

```

def operacion():

    global D, L, e, DZ, rt, tmin, tmax, ts, nm, nb, tt, Tel, Cac

    D = pantalla1.get()

    D = float(D)

    L = pantalla2.get()

    L = float(L)

    e = pantalla3.get()

    e = float(e)

    DZ = pantalla4.get()

    DZ = float(DZ)

    rt = pantalla5.get()

    rt = float(rt)

    tmin = pantalla6.get()

    tmin = float(tmin)

    tmax = pantalla7.get()

    tmax = float(tmax)

    ts = pantalla8.get()

```

```

ts = float(ts)

nm = pantalla9.get()

nm = float(nm)

nb = pantalla10.get()

nb = float(nb)

tt = pantalla11.get()

tt = float(tt)

Tel = pantalla12.get()

Tel = float(Tel)

Cac = pantalla13.get()

Cac = float(Cac)

Q = pantalla14.get()

Q = float(Q)

Tbo = np.arange(tmin, tmax, 2) #Temperatura de bombeo (°C)

u = 1.718 * 10**-5 + 4.620 * 10**-8 * tp#Coeficiente dinámico de
viscosidad

# CONSTANTES DE CÁLCULO

v = 4*Q/(math.pi * D**2)

# print(v)

Re = ((8**(1-n)) * (D**n) * (v**(2-n))*df / kp) * (4*n/(3*n+1))**n

Pr = (ua*Cp)/kp#Número de Prandtl

h = 0.023* Re**0.8 * Pr**0.3 * kp/D#Coeficiente de convección del
combustible

# GRADIENTE DE PRESIÓN

DP = (2*K*L)*(((3*n+1)/n)*(4/(math.pi * D**2)))**n*((2/D)**(n+1))*Q**n
+ (0.14/(Re**0.2)) * (8*L*df*(Q**2))/(math.pi*math.pi*(D**5))+(16*(Q**2)
/math.pi*math.pi*(D**4))*(df-di) + df*g*DZ

#COSTO DE BOMBEO

Cbom = ((Tel*tt)/(nm*nb))*Q*DP*(10**-3)

#GRADIENTE DE TEMPERATURA

DT = (2 *math.pi * L * (Tbo - ts))/(Q*df*Cp*(1/(r0*h) * (1/ka) *
math.log(r1/r0) + (1/kb) * math.log(rt/r1)))

Ccal = Cac*kt*DT*tt*3600

```

```

CTotal = Cbom+Ccal

A = np.array([[Tbo] , [CTotal]])

CTmin = np.min(CTotal)

num = np.where(CTotal==CTmin)

Tbomin = Tbo[num]

pantalla15.insert(0, CTmin)

pantalla16.insert(0, Tbomin)

#DESARROLLO DE LA GRAFICA

ax.plot(Tbo,Cbom,label="Costo de bombeo")

ax.plot(Tbo,Ccal,label="Costo de calentamiento")

ax.plot(Tbo,CTotal, label="Costo total")

ax.set_title("Diagrama de comportamiento de Costo Vs Temperatura",
size=15)

ax.set_xlabel("Temperatura °C", size = 12,)

ax.set_ylabel("Costo $ ", size = 12,)

ax.plot(Tbomin,CTmin,marker="o",color="r")

ax.legend()

ax.grid(True)

line.draw()

boton1 = Button(root,text = "CALCULAR >>>>>>",width=15, bg='red', fg =
'gray',command=operacion, font=('arial',18,'bold')).grid(row = 10, column =3)

```

6. Código para mostrar la gráfica en la ventana principal

```

right_frame =tk.Frame(root, bg='#C0C0C0', bd=1.5)

right_frame.place(relx=0.57, rely=0.1, relwidth=0.41, relheight=0.5)

figure = plt.Figure(figsize=(5.1,6.2), dpi=100)

ax = figure.add_subplot(111)

ax.grid(True),ax.set_xlabel("Temperatura °C", size = 12,),ax.set_ylabel("Costo
$ ", size = 12,)

line = FigureCanvasTkAgg(figure, right_frame)

line.get_tk_widget().pack(side=tk.LEFT, fill=tk.BOTH,expand=1)

mainloop()

```

7. Definición de la función que permite salir del programa y su respectivo botón(Cerrar) que permite la ejecución de la acción.

```
def quit():  
    root.destroy()  
  
    boton_cerrar = Button(root, text="Cerrar", width=15, height=2, bg="red",  
fg="black", borderwidth=0, cursor="hand2", command=quit, font=('arial', 16, 'bold')).  
grid(row=20, column=5)
```

4.11 Herramientas y técnicas utilizadas**Tabla 4. 9.** Herramientas y técnicas de la investigación

Procedimiento	Herramientas y técnicas
Determinación de variables del proceso	Investigación de trabajos relacionados y componentes disponibles mencionados en el apartado 4.1.
Planteamiento de las fórmulas de gradiente de presión, variables y costos.	Investigación y análisis sistémico del trabajo mencionado en el apartado 4.1 Deducción matemática.
Desarrollo del método de cálculo o aplicación	Investigación de software de optimización, seleccionando Python como la opción idónea por sus librerías y fácil acceso. Librerías para facilidades matemáticas (Numpy y Math) y librerías de graficación (Matplotlib) Excel para determinar por medio de asignación de valores la gráfica de comportamiento de costos de bombeo, costos de calentamiento y costo total de operación, para ratificar la resolución de optimización de Python.
Selección de valores óptimos de transporte de crudo.	Los datos de las constantes como diámetro, longitud, caudal etc., están definidos en el trabajo anterior a esta investigación, en el estudio del transporte de crudo en el bloque 31 - bloque 12. Son datos tomados en campo y ciertos datos experimentales, otros vienen dados por las capacidades de los equipos instalados.

Fuente: Valeria Molina

5. ANALISIS Y RESULTADOS

Se detalla a continuación el análisis de resultados de los costos totales de transporte de crudo del bloque 31 al bloque 12, los cuales se realizan en tres tramos que serán calculados con los respectivos datos característicos de los mismos tanto en Excel como en Python.

Se presentaran las gráficas pertenecientes a las gradientes de presión y temperatura, el cual muestra el comportamiento de las variables en función de la temperatura, y una gráfica donde se resumen los costos de bombeo, de temperatura y totales, con los cuales se seleccionara la temperatura mínima de transporte. También se realizara un análisis del comportamiento de las variables más influyentes en los costos totales.

5.1 Análisis del sitio de trabajo e instalaciones

En la **Figura 5. 1** se muestra el trayecto de las tuberías de transporte de crudo desde el bloque 31 hasta el bloque 12, incluyendo los tres tramos mencionados y la longitud de tubería. Los valores correspondientes a las instalaciones y equipos se encuentran descritas en la **Tabla 4. 5** y **Tabla 4. 6**, las cuales deberán ser ingresadas en el programa desarrollado en Python.



Figura 5. 1. Sistema de ductos para transporte del fluido multifásico del bloque 31-bloque 12

Fuente: [2].

5.2 Comportamiento de las propiedades del crudo en función de la temperatura de bombeo

La ecuación de comportamiento de densidad detallada en la ecuación (4. 1), muestra un comportamiento descendiente como se muestra en la **Figura 5. 1**, siendo la misma curva de comportamiento para los tres tramos ya que esta se encuentra en función de la temperatura de bombeo.

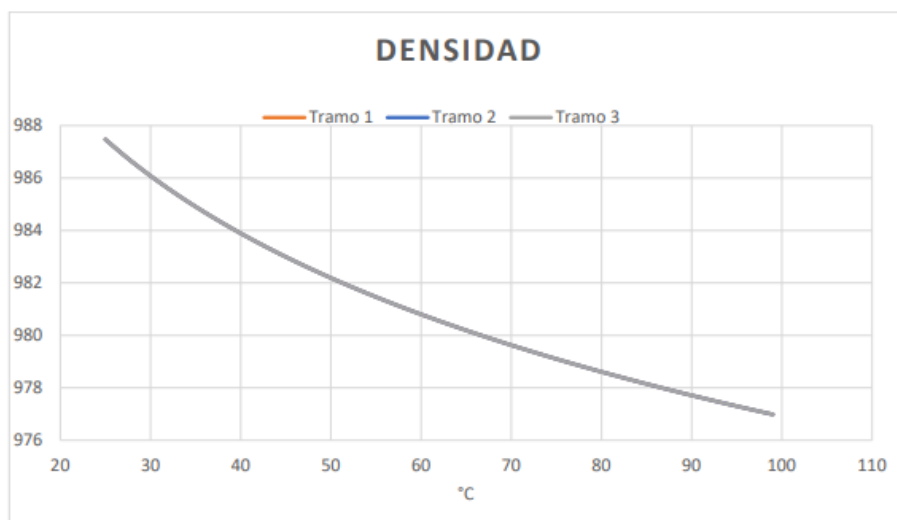


Figura 5. 2. Curva de comportamiento de la densidad de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

De la misma manera, el comportamiento de las propiedades del crudo, cuya única variable es la temperatura de bombeo, tienen la misma curva de comportamiento para los tramos, véase el comportamiento del calor específico del crudo (**Figura 5. 3**), curva de comportamiento del coeficiente de conductividad térmica del crudo (**Figura 5. 4**) e índice de consistencia másica (**Figura 5. 5**). Estas son las únicas curvas que dependen únicamente y directamente de la temperatura de bombeo del crudo.

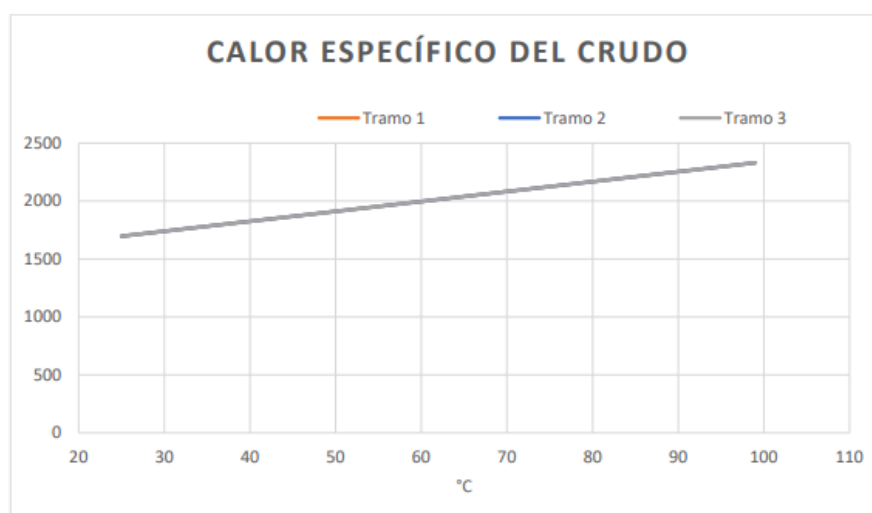


Figura 5. 3. Curva de comportamiento de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

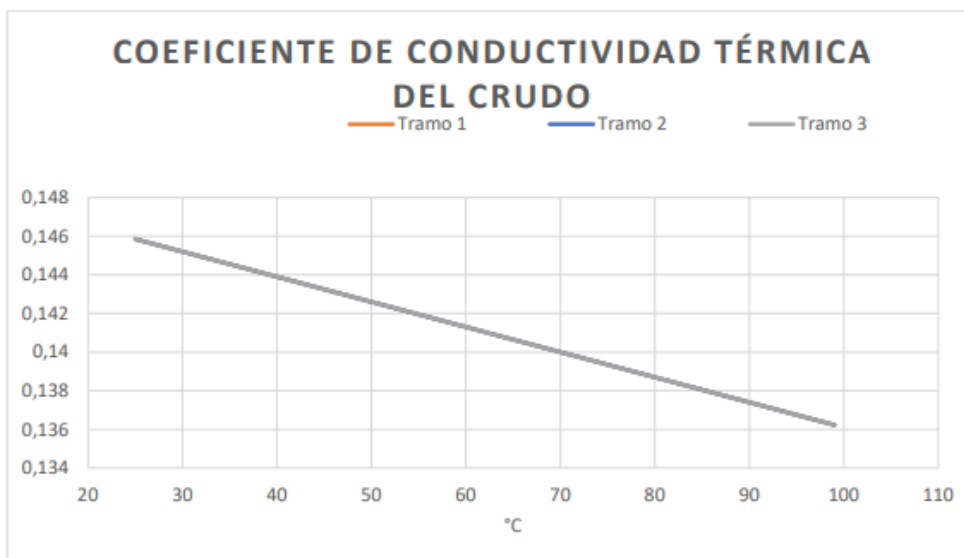


Figura 5. 4. Coeficiente de conductividad térmica del crudo de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

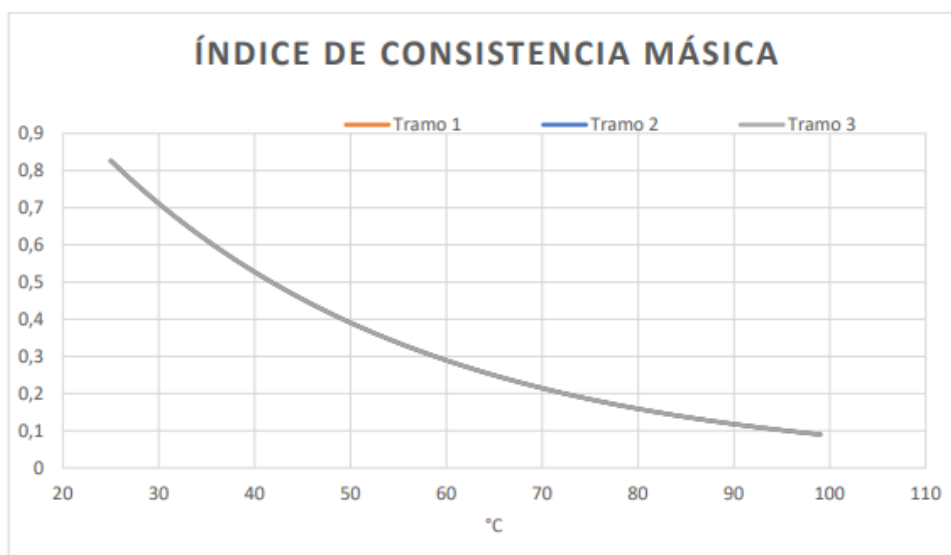


Figura 5. 5. Índice de consistencia másica de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

5.3 Comportamiento de las constantes que rigen el modelado del proceso de transporte de crudo

Las constantes que rigen el comportamiento del crudo dan a conocer el tipo de flujo, velocidad, difusividad térmica. Estas son las principales integrantes de los gradientes de presión y temperatura.

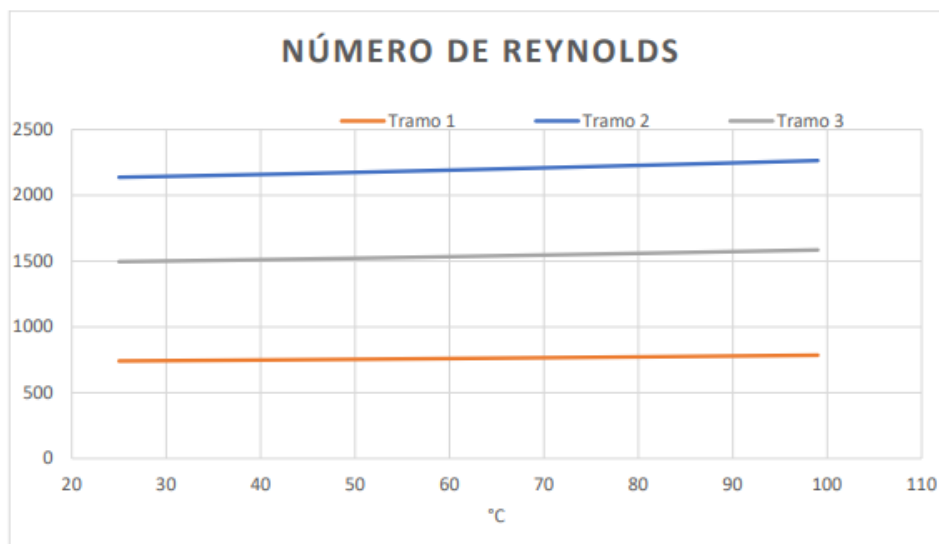


Figura 5. 6. Número de Reynolds de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

El comportamiento del número de Reynolds mostrado en la **Figura 5. 6**, presenta variación para cada uno de los tramos, siendo que está en función del diámetro, densidad, coeficiente de conductividad térmica e índice de flujo, de los cuales solo el diámetro presenta diferentes valores para cada tramo, esto indica que el diámetro es una variable decisiva y representativa en el cálculo de los costos finales de bombeo, calentamiento y totales de transporte.

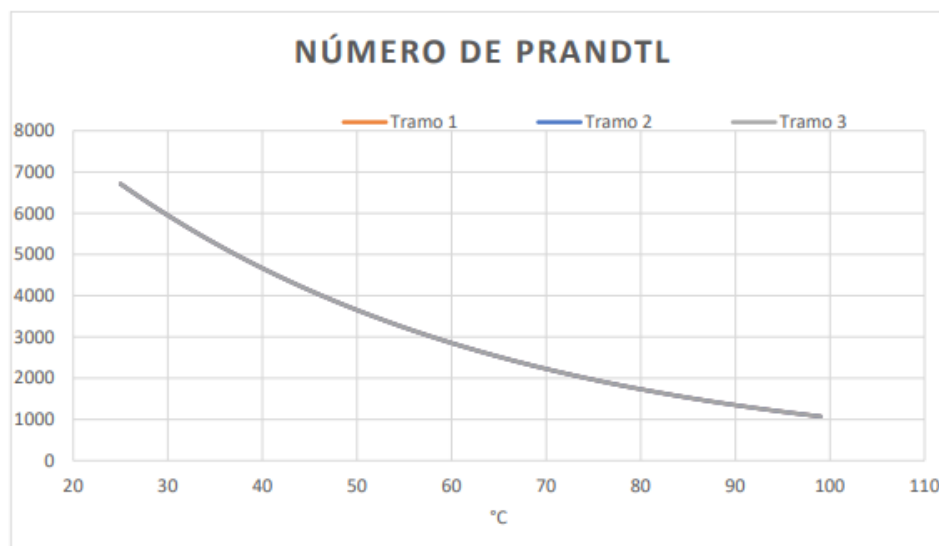


Figura 5. 7. Numero de Prandt de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

El número de Prandt (**Figura 5. 7**), muestra la difusividad térmica y la pérdida de velocidad en las tuberías, al encontrarse en función de la viscosidad, calor específico y coeficiente de

conductividad térmica, mismos que se encuentran en función de la temperatura de bombeo, por lo tanto la curva de comportamiento del número de Prandt es el mismo para los tres tramos estudiados.

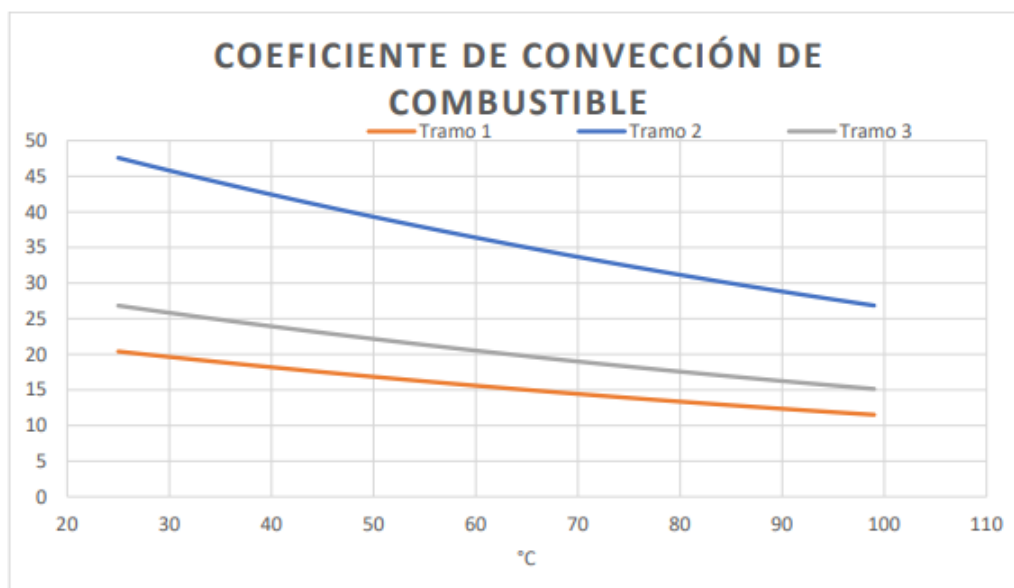


Figura 5. 8. Coeficiente de convección de combustible de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

El coeficiente de convección de combustible mostrado en la **Figura 5. 8** muestra que se incrementa en cada tramo, al encontrarse en función del número de Reynolds, Prandt y diámetro, concluimos que el diámetro es un parámetro decisivo en el cálculo de los costos.

5.4 Análisis de gradientes de presión y temperatura

En las ecuación (4. 13) y ecuación (4. 15) de los gradientes de presión y temperatura indican que son directamente proporcionales a la longitud, es así que los mismos incrementan su valor cuando se incrementa el valor de la longitud, véase en las **Figura 5. 9** y **Figura 5. 10**, se puede observar que los valores menores en ambos gradientes corresponden a la longitud de 5200m, también se puede observar que los valores más altos en los gradientes corresponden a la longitud 2 de 21100, esto se debe a la diferencia entre los flujos volumétricos y diámetros de la tubería, mientras que en la longitud 3 con valor de 32500 se encuentra en el medio, si se analiza la diferencia entre los valores de las tres longitudes, existe cierta similitud entre la longitud 2 y la longitud 3, mientras que la longitud 1 es muy baja. El valor del diámetro de las tuberías de los tramos 1 y 2 son los mismos, y el diámetro del tramo 3 es mayor que la de los dos anteriores, siendo que la longitud del tramo 3 es la más extensa, se puede deducir que a un mayor diámetro en una longitud extensa el proceso de transporte se facilita.

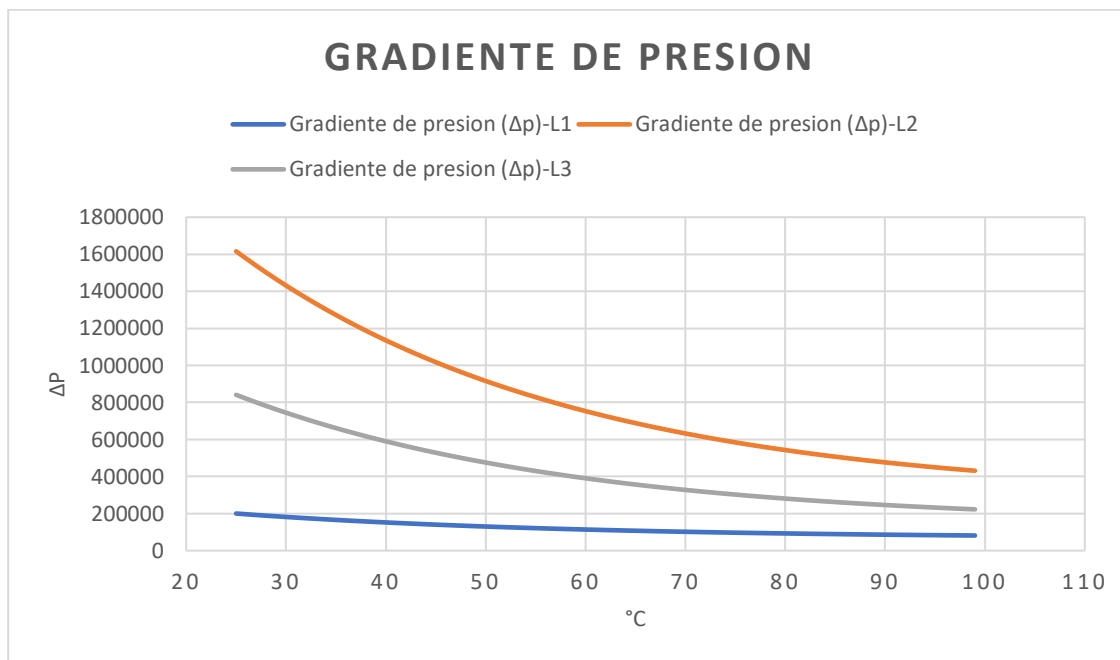


Figura 5. 9. Gradiente de presión de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

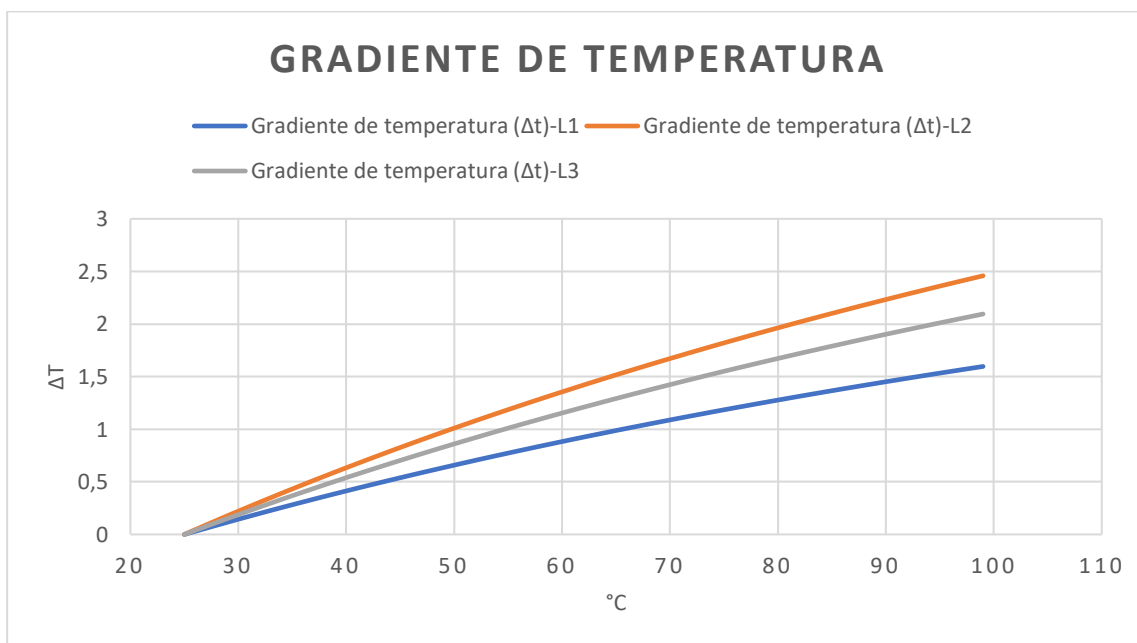


Figura 5. 10. Gradiente de temperatura de los tres tramos

Fuente: Valeria Molina

5.5 Análisis de gradientes, costos de bombeo, costos de calentamiento y costos totales

En el primer tramo correspondiente a Apaika-Nenke de longitud de 5200m, diámetro de

0,4572m y flujo volumétrico de 0,036 m³/s, se obtienen los siguientes resultados tanto en Excel como en el programa desarrollado en Python.

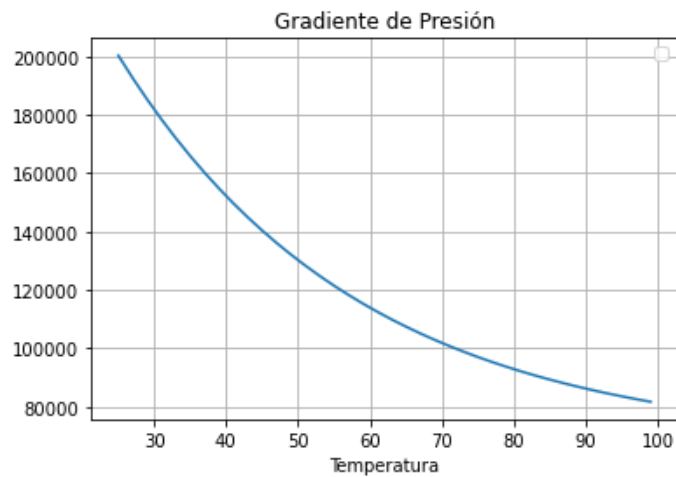


Figura 5. 11. Gradiente de Presión en función de la temperatura de bombeo (Python)

Fuente: Valeria Molina

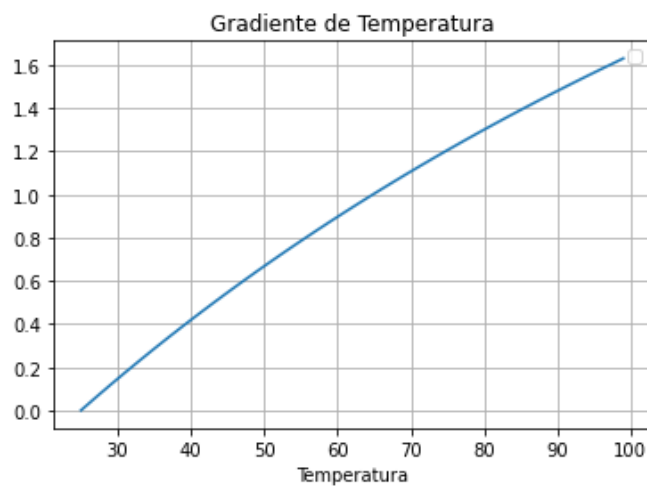


Figura 5. 12. Gradiente de temperatura del tramo 1 (Python)

Fuente: Valeria Molina

Diagrama de comportamiento de Costo Vs Temperatura

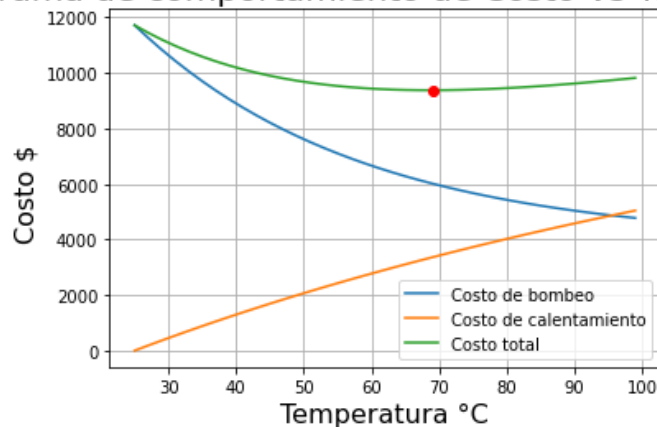


Figura 5. 13. Resumen de costos del sistema en el primer tramo (Python)

Fuente: Valeria Molina

Realizando el análisis con el código de programación de Python tenemos como resultado que: el costo mínimo de bombeo es de: \$9374.62, el cual se obtiene al transportar el crudo a la temperatura de 69 °C. En la **Figura 5. 13**, se pueden observar el costo de bombeo, el costo de calentamiento y, el costo total; además, el punto de menor costo del sistema de bombeo a la temperatura indicada. También en la **Figura 5. 11** y **Figura 5. 12**, podemos observar que los gradientes de presión y temperatura influyen directamente con el comportamiento de las curvas de costos individuales obtenidos. En la **Figura 5. 14** se tiene un resumen de los costos de transporte de crudo en el tramo 1 del tramo 1, donde se puede corroborar los resultados del programa realizado.

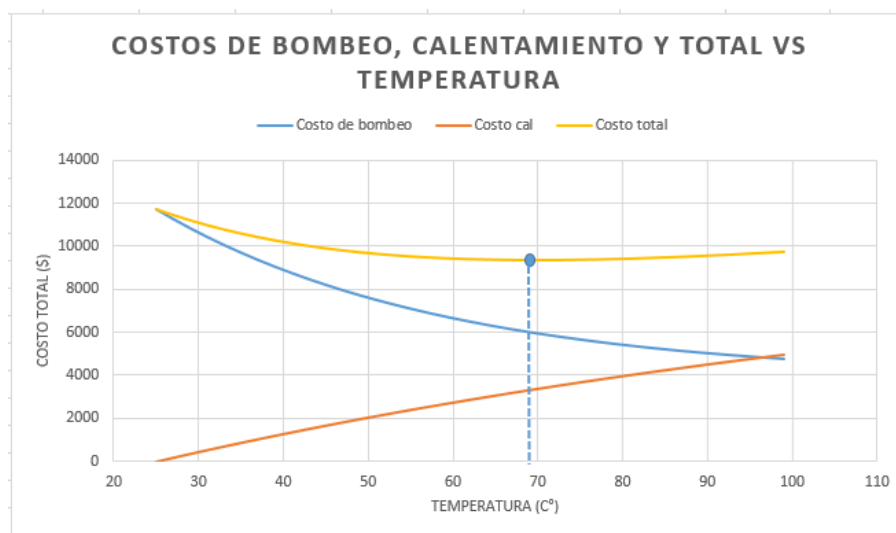


Figura 5. 14. Resumen de costos de transporte del tramo 1

Fuente: Valeria Molina

El valor de la temperatura óptima del primer tramo obtenida en la simulación en Excel se muestra en la tabla 4.8 siendo de 69°C y un costo mínimo de \$9320,02. Donde el error relativo se calcula:

$$e = \frac{|valor\ verdadero - valor\ aproximado|}{valor\ verdadero} \cdot 100\%$$

$$e = \frac{|\$9374,62 - \$9320,02|}{\$9374,62} \cdot 100\%$$

$$e = 0,58\%$$

En el segundo tramo de Nenke-ECB, de longitud 21100m, diámetro de 0,4572m y flujo volumétrico 0.096 m³/s, se obtienen costos más altos que el tramo 1, debido al incremento del diámetro y flujo volumétrico. Los resultados obtenidos en el programa de Python son los siguientes.

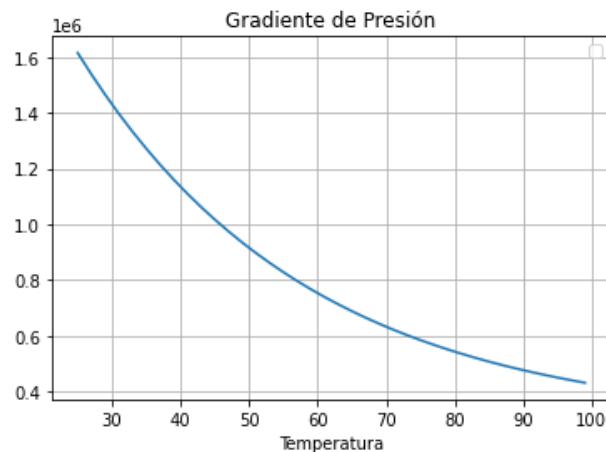


Figura 5. 15. Gradiente de Presión en función de la temperatura del tramo 2

Fuente: Valeria Molina

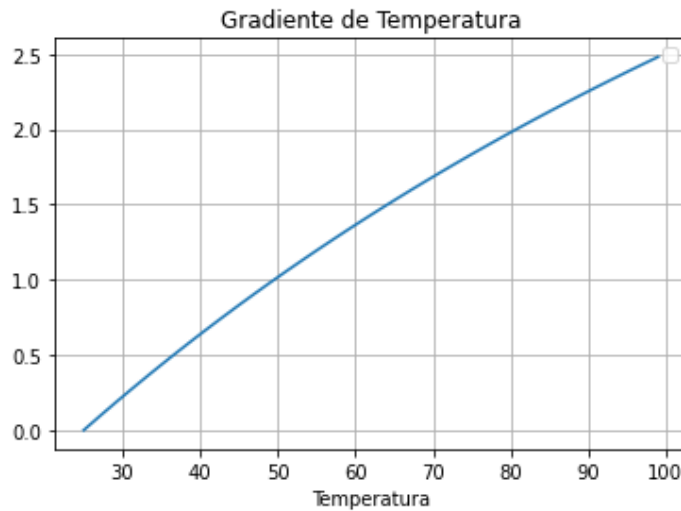


Figura 5. 16. Gradiente de temperatura del tramo 2

Fuente: Valeria Molina

Diagrama de comportamiento de Costo Vs Temperatura

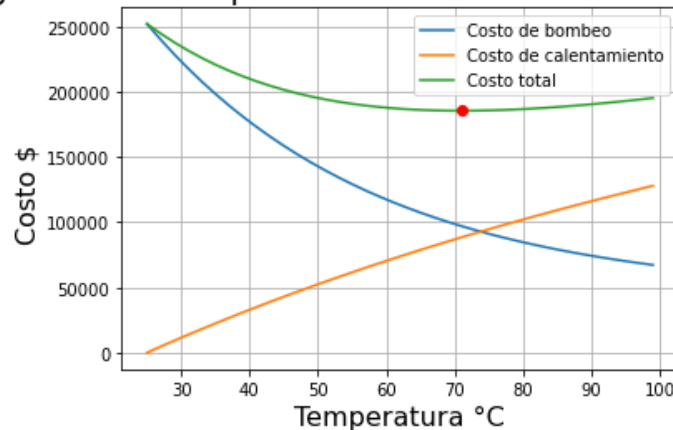


Figura 5. 17. Resumen de costos del sistema en el segundo tramo

Fuente: Valeria Molina

EL costo mínimo de bombeo es de: \$181803.31, el cual se obtiene al transportar el crudo a la temperatura de 73°C. En la **Figura 5. 17**, se puede observar el costo de bombeo, el costo de calentamiento y, el costo total; además, el punto de menor costo del sistema de bombeo a la temperatura indicada. También en la **Figura 5. 15** y la **Figura 5. 16**, podemos observar que los gradientes de presión y temperatura influyen directamente con el comportamiento de las curvas de costos individuales obtenidos. La **Figura 5. 18** muestra los resultados obtenidos del tramo 2 realizado en Excel.

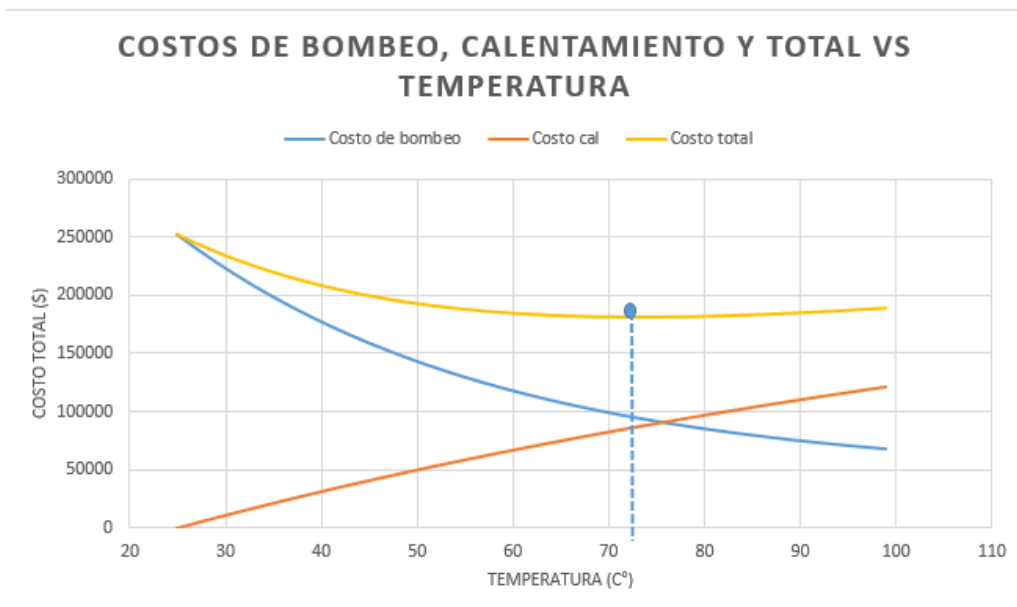


Figura 5. 18. Resumen de costos del tramo 2

Fuente: Valeria Molina

El valor de la temperatura óptima del segundo tramo obtenida en la simulación en Excel se muestra en la tabla 4.8, siendo de 73°C y un costo mínimo de \$181170,26. Donde el error relativo se calcula:

$$e = \frac{|valor\ verdadero - valor\ aproximado|}{valor\ verdadero} \cdot 100\%$$

$$e = \frac{|\$181803,31 - \$181170,26|}{\$181803,31} \cdot 100\%$$

$$e = 0,35\%$$

Finalmente en el tercer tramo de ECB-EPF, de longitud 32500m, diámetro de 0,6096m y flujo volumétrico de 0,096 m³/s, el cual muestra resultados inferiores al segundo tramo, debido a los cambios en el flujo que es superior, que posibilita un mejor proceso. Los resultados obtenidos en Python son los mostrados a continuación.

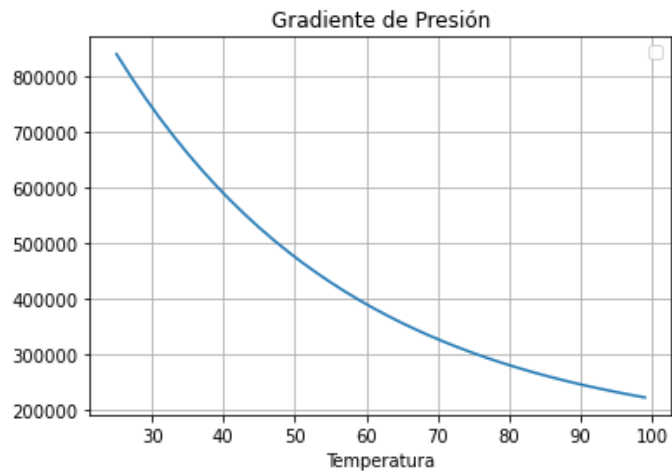


Figura 5. 19. Gradiente de Presión en función de la temperatura de bombeo del tramo 3

Fuente: Valeria Molina

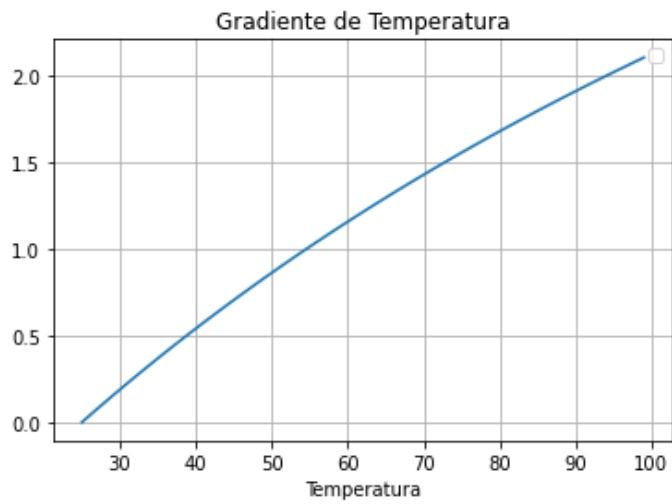


Figura 5. 20. Gradiente de temperatura del tramo 3

Fuente: Valeria Molina

Diagrama de comportamiento de Costo Vs Temperatura

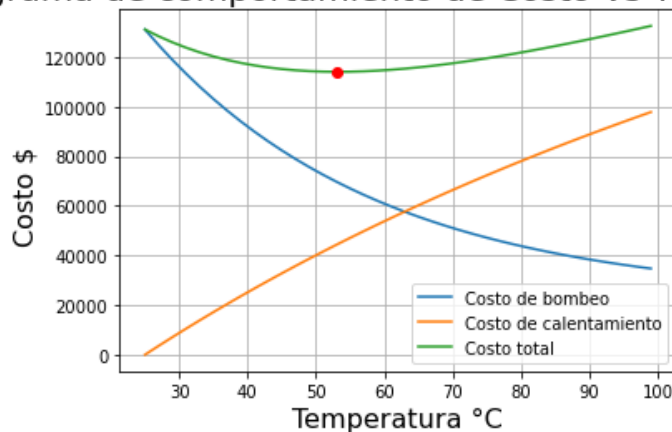


Figura 5. 21. Resumen de costos del sistema en el tercer tramo

Fuente: Valeria Molina

EL costo mínimo de bombeo es de \$ 114083.58, el cual se obtiene al transportar el crudo a la temperatura de 53°C. En la **Figura 5. 21**, se pueden observar el costo de bombeo, el costo de calentamiento y, el costo total; además, el punto de menor costo del sistema de bombeo a la temperatura indicada. También en la **Figura 5. 19** y la **Figura 5. 20**, podemos observar que los gradientes de presión y temperatura influyen directamente con el comportamiento de las curvas de costos individuales obtenidos. En la figura **Figura 5. 22** se encuentran reflejados los valores obtenidos en Excel correspondientes al tercer tramo.

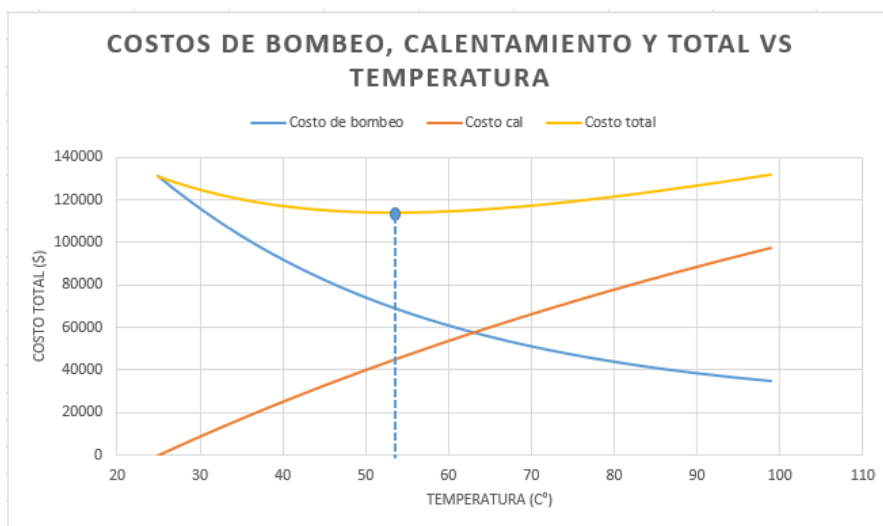


Figura 5. 22. Resumen de Costos del tramo 3

Fuente: Valeria Molina

El valor de la temperatura óptima del tercer tramo obtenida en la simulación en Excel se muestra en la tabla 4.8 siendo de 53°C y un costo mínimo de \$113886,41. Donde el error relativo se

calcula:

$$e = \frac{|valor\ verdadero - valor\ aproximado|}{valor\ verdadero} \cdot 100\%$$

$$e = \frac{|\$114083,58 - \$113886,41|}{\$114083,58} \cdot 100\%$$

$$e = 0,17\%$$

Mediante la deducción de las fórmulas de costos de bombeo se sabe que la potencia necesaria para realizar el trabajo depende directamente de la gradiente de presión, la cual se disminuye con el incremento de temperatura, esto quiere decir que a mayor temperatura menor costo de bombeo. Sin embargo, esta reducción de costos se debe a la reducción de densidad, la cual no disminuye gradualmente más bien lo hace de forma logarítmica, lo que se entiende que a temperaturas mayores de 80 grados centígrados la disminución de los costos de bombeo son mínimos.

Del mismo modo los costos de calentamiento están directamente relacionados con la potencia de calentamiento, la cual depende de la diferencia de temperatura entre la inicial y la óptima, a mayor temperatura más altos son los costos de operación del intercambiador, sin embargo ya se mencionó que en temperaturas altas los beneficios en el costo de bombeo son mínimos.

Los costos totales de operación son el resultado de la suma de los costos de bombeo y los costos de calentamiento. Para obtener un costo total mínimo de operación se busca un equilibrio en el calentamiento, siendo que una temperatura optima produzca los beneficios necesarios para el bombeo sin exceder en costos de calentamiento.

Para los procesos de optimización es necesario conocer a detalle las variables que forman parte del estudio a realizar, tomando en cuenta que se planteará una transformación del lenguaje verbal de funcionamiento del sistema hacia un lenguaje matemático que nos permita simular el proceso lo más próximo posible.

Existen varias librerías que permiten realizar procesos de optimización (detalladas en el marco teórico), para el estudio de la función objetivo de costos de transporte de crudo la librería usada para minimizar costos es Math.

Es fundamental conocer y manejar de manera adecuada la estructura de programación que se pretenden usar. Además, es de gran ayuda cotejar los valores obtenidos de la herramienta Math y Numpy en la optimización de la función objetivo con ayuda de otro software, o mediante

cálculos manuales.

5.6 Análisis de costos en función de la longitud

El parámetro de la longitud es directamente proporcional a los gradientes de presión y temperatura, por lo cual a mayor longitud mayor costo total de transporte de crudo, como se muestra en la **Figura 5. 23**, en la cual se expone tres longitudes y los mismos parámetros de cálculo faltantes, se puede observar que a mayor longitud el costo total de transporte de crudo se incrementa en miles de dólares.

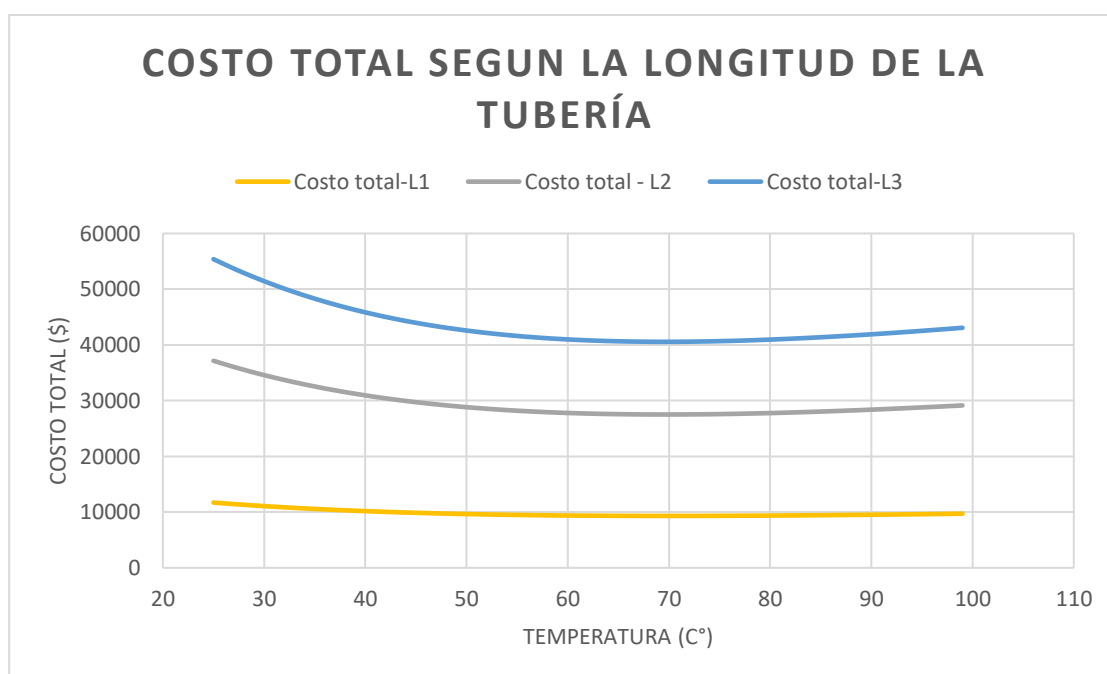


Figura 5. 23. Costo total según la longitud de la tubería

Fuente: Valeria Molina

5.7 Análisis de costos en función del diámetro

El diámetro es uno de los parámetros más delicados del modelo matemático, puesto que influye en ambos gradientes, en la **Figura 5. 24** se puede observar que los costos de transporte de crudo ascienden cuando se incrementa el diámetro, sin embargo, también se debe tomar en cuenta la distancia de enterramiento.

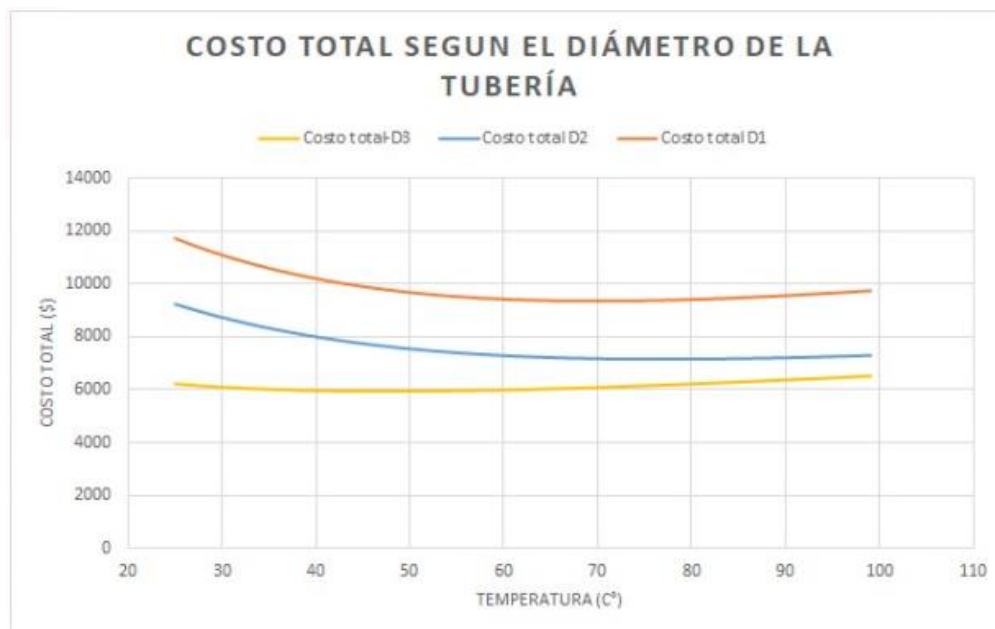


Figura 5. 24. Costo total según el diámetro de la tubería

Fuente: Valeria Molina

5.8 Análisis de costos en función de la gradiente de velocidad

Según el modelo matemático propuesto el gradiente de velocidad puede variar según la

Tabla 5. 1, en donde los valores tienen una pendiente alta de diferencia. Sin embargo en la **Figura 5. 25**, se puede observar que no influyen en los costos totales de transporte, por lo cual se ha optado por trabajar con un gradiente de velocidad crítico de 90 1/s.

Tabla 5. 1. Gradiente de velocidad obtenida por experimentación

No.	Gradiente de velocidad $\dot{\gamma}$ (1/s)	Esfuerzo de corte τ (Pa)		
		15 °C	25 °C	35 °C
1	90	20,1	16,2	11,3
2	150	29,0	19,1	18,5
3	250	41,1	27,0	20,1
4	400	59,0	39,5	26,3
5	650	70,1	44,6	37,2
6	800	82,5	60,1	45,1
7	999	95,0	65,6	52,3
8	1230	111,3	80,0	65,2
9	1550	136,0	100,3	76,0

Fuente: [2].

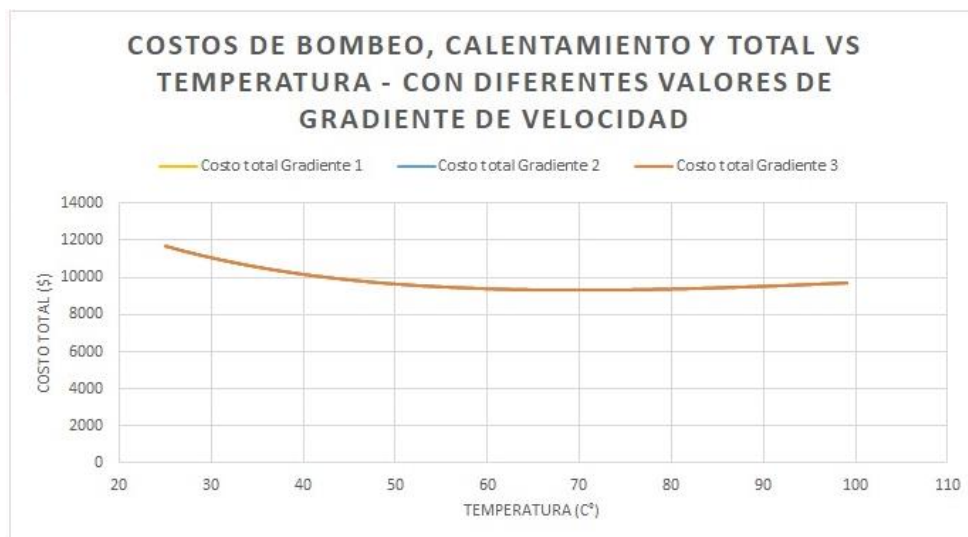


Figura 5. 25. Costos según la gradiente de velocidad

Fuente: Valeria Molina

5.9 Análisis de los resultados obtenidos en Python

La **Figura 5. 13**, **Figura 5. 17** y **Figura 5. 21** muestran el punto mínimo de la función del costo total de operación con respecto a la temperatura, estas ratifican de forma visual que existe un equilibrio entre el costo de bombeo (a mayor temperatura menor costo de bombeo) y el costo de calentamiento (a mayor temperatura mayor costo de operación del intercambiador de calor), el punto de equilibrio se presenta cuando la variación de la viscosidad ya no es significativa en la reducción del costo de bombeo, esto se debe a que su comportamiento es exponencial decreciente, comparado con el incremento lineal del costo de operación del intercambiador de calor, este fenómeno ocurre entre los 40°C y 80°C.

5.10 Análisis de costos totales en Excel

Utilizando los graficadores se Excel se estima la temperatura óptima de transporte, reemplazando en la función objetivo valores de temperatura en pasos de 2°C, usando los valores antes descritos de transporte de oleoducto.

La tabla de valores obtenidos en Excel se presenta en el ANEXO B, donde CT es el costo total de operación del sistema y C_b, C_i son los costos de operación de la bomba y el intercambiador respectivamente. Los resultados de los costos totales se muestran anteriormente en la **Figura 5. 14**, **Figura 5. 18** y **Figura 5. 23**.

6. PRESUPUESTO

GASTOS DIRECTOS			
DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Recopilación de información bibliográfica	1	\$50,00	\$50,00
Recursos técnicos para la elaboración			
Computadora	1	\$50,00	\$50,00
Impresora	1	\$20,00	\$20,00
Asesoría externa en Python	1	\$100,00	\$100,00
PHYTON	1	\$100,00	\$100,00
<i>TOTAL</i>			\$320,00
GASTOS INDIRECTOS			
DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
 Materiales y suministros			
Resmas de papel bond	3	\$2,50	\$7,50
Esferos	4	\$1,00	\$4,00
Carpetas	2	\$3,00	\$6,00
Lápices	4	\$0,80	\$3,20
Transporte	indeterminado	\$10,00	\$10,00
Energía eléctrica	indeterminado	\$50,00	\$50,00
Servicio de Internet	indeterminado	\$30,00	\$30,00
Gastos varios	indeterminado	\$100,00	\$100,00
<i>TOTAL</i>			\$210,70
<i>GASTOS IMPREVISTOS</i>			\$200,00
<i>TOTAL DE PRESUPUESTO</i>			\$730,70

7. ANÁLISIS DE IMPACTOS

7.1 Impacto económico

El objetivo principal del proyecto es encontrar un método tecnológico de cálculo de temperatura óptima de transporte para reducir el costo de operación en el transporte de fluido en la plataforma Apaika-Nenke, el cual daría como resultados costos mínimos de operación y mantenimiento anuales para la empresa que opte por implementarlo, siendo un ahorro significativo.

Según [7], la temperatura de calentamiento habitual para el transporte de crudo es de 200°F, que corresponde a 93,3°C. Con el cual se ha realizado una comparación con los costos obtenidos en el ANEXO B a dicha temperatura.

En el primer tramo el costo de calentamiento a la temperatura habitual es de \$9586,17 mientras que a la temperatura óptima de 69°C el costo mínimo de transporte es de \$9320,02. Donde el ahorro anual es de:

$$\text{Ahorro anual} = \text{Costo a la temperatura habitual} - \text{Costo minimo optimizado}$$

$$\text{Ahorro anual} = \$9586,17 - \$9320,02$$

$$\text{Ahorro anual} = \$266,15$$

Se ahorran \$266,15 al año, tomando en cuenta que el tramo es de tan solo 5200m siendo el tramo de menor extensión del proyecto.

En el segundo tramo el costo de calentamiento a la temperatura habitual es de \$186043,46 mientras que a la temperatura óptima de 73°C el costo mínimo de transporte es de \$181170,26. Donde el ahorro anual es de:

$$\text{Ahorro anual} = \text{Costo a la temperatura habitual} - \text{Costo minimo optimizado}$$

$$\text{Ahorro anual} = \$186043,46 - \$181170,26$$

$$\text{Ahorro anual} = \$4873,20$$

Se tiene un ahorro de \$4873,20 al año, siendo un tramo de 21100m de extensión.

En el tercer tramo el costo de calentamiento a la temperatura habitual es de \$128391,36 mientras que a la temperatura óptima de 53°C el costo mínimo de transporte es de \$113886,41. Donde el ahorro anual es de:

$$\text{Ahorro anual} = \text{Costo a la temperatura habitual} - \text{Costo minimo optimizado}$$

$$\text{Ahorro anual} = \$128391,36 - \$113886,41$$

$$\text{Ahorro anual} = \$14504,95$$

Se tiene un ahorro de \$14504,95 al año, siendo un tramo de 32500m de extensión. El ahorro total anual de los tres tramos es de \$19644,30.

La implementación de los resultados de esta investigación, garantiza de forma racional y eficiente la manipulación de variables como la temperatura del fluido multifásico, el flujo volumétrico y el flujo másico de aceite térmico en los intercambiadores de calor, los que se relacionan directamente con rendimiento de transporte de fluidos por tuberías. La implementación de los modelos matemáticos en software, humaniza el trabajo de cálculo para la predicción de los consumos energéticos de las instalaciones de bombeo. Los aportes en ahorro de energía significan de forma clara, recursos que los sistemas no necesitan y pueden ser dedicados a otros fines sociales [2].

7.2 Impacto tecnológico

El uso de software libre que son utilizados para la investigación puede ser aprovechado para el mejoramiento de la industria, como es Python. Siendo un punto de partida para futuras investigaciones en la industria petrolera y en otras que opten por mejorar el proceso de transporte de fluidos.

Gracias al uso de software libre, el usuario puede prescindir de otros software pagados en los cuales el costo de las licencias puede variar cientos a miles de dólares, por ejemplo la licencia del software Matlab que también puede ser usado para optimización tiene un costo aproximado de \$2350.

Al ser desarrollado de este trabajo se lo realizó como propuesta tecnológica, este puede ser mejorado o utilizado por los mismos estudiantes de la UTC o de otra institución a fin de obtener una mejor percepción de campo y desarrollar habilidades tecnológicas a futuro, así como aplicaciones ideales a los campos petrolíferos.

7.3 Impacto ambiental

Un ahorro en costos de operación está dada principalmente por el ahorro de energía, el cual se traduce como eficiencia energética y es una operación amigable con el medio ambiente. Se obtienen también menor cantidad de desechos de operación y de mantenimiento.

Al definirse una temperatura óptima de transporte se pueden evitar procedimientos nocivos para el medio ambiente, como el uso de más recursos no necesarios para el proceso y evitar la contaminación.

7.4 Impacto social

Genera conciencia en las empresas que trabajar con un equipo eficiente representa para ellos un ahorro económico considerable a largo plazo y fomenta en las generaciones venideras al desarrollo de nuevas tecnologías con herramientas de acceso libre.

El uso de los recursos tecnológicos de uso libre no es común en el área laboral, solo se los utiliza en el campo de la investigación. Con este proyecto se demuestra que con software libre es posible desarrollar propuestas tecnológicas de alto nivel para el uso de las diferentes áreas técnicas, fomentando a estudiantes y trabajadores hacer investigación, dando importancia a la educación superior y capacitaciones.

8. CRONOGRAMA

N.-	ACTIVIDAD	MESES											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Planteamiento del tema del proyecto.	■											
2	Estudio de la fundamentación teórica sobre los sistemas de bombeo y el software de programación PHYTON		■										
3	Recopilación de fundamentos teóricos			■									
4	Identificación del problema, objetivo general, específicos, hipótesis y marco teórico				■								
5	Determinación de la metodología a través de las variables para establecer los procedimientos adecuados para cumplir los objetivos específicos					■							
6	Identificar el presupuesto a utilizar en la investigación a través de costos directos, indirectos e imprevistos que se pueden presentar					■							
7	Elaboración de la propuesta tecnológica a través de la simulación de la función objetivo en el software de programación PHYTON						■						
8	Identificación de resultados en la implementación de la propuesta de investigación en relación con el problema.							■	■	■			
9	Elaboración de conclusiones y recomendaciones en relación al cumplimiento de los objetivos planteados.										■	■	
10	Defensa de la propuesta												■

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Se verificó que los diversos estudios de métodos de transporte de crudos pesados, cuyas características reológicas difieren de un sector a otro, siendo las gradientes de presión y temperatura las características más significativas y estudiadas en el mejoramiento y optimización del transporte de crudos.
2. Las ecuaciones planteadas en este proyecto fueron obtenidas experimentalmente, es así que solo se pueden utilizar para el tipo de crudo estudiado y para las condiciones antes analizadas.
3. Se desarrolló una ecuación final de costos totales de transporte de crudo usando las ecuaciones mencionadas en el apartado 4.7, las cuales presentan un comportamiento logarítmico y exponencial en su mayoría.
4. En el desarrollo de la aplicación se utilizó librerías destinadas a resolver problema de optimización matemática mediante el cálculo por interacciones (Numpy) para determinar puntos máximos y mínimos de una función no lineal.
5. Según la gráfica de viscosidad-temperatura, el punto óptimo de calentamiento de crudo para transporte se encuentra entre los 40°C y 80°C, que demuestra que el calentamiento de crudo se lo realiza en base a la experiencia en otros procesos similares, mas no en el análisis de las características del oleoducto y el crudo en cuestión.
6. El método de calentamiento solo es viable económicamente para recorrer distancias mayores de 10km, al mismo tiempo, a temperatura mayores de 50°C tampoco es viable puesto que no existe una variación significativa en la estructura molecular del crudo que beneficie notoriamente su transporte.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda usar los métodos de cálculo para flujo laminar, debido a que para el caso de estudio de fluidos de transporte la velocidad de circulación es contante haciendo de los factores de flujo turbulento aproximarse a cero.
2. Para simular otro caso de transporte de fluidos es necesario tener en cuenta que los cálculos realizados para desarrollar la aplicación fueron para oleoductos de régimen

horizontal sobretierra y diámetro para oleoducto.

3. Para el desarrollo del programa es necesario que todos los valores de las variables y sus unidades estén acorde a lo solicitado, se recomienda verificar antes de ingresarlos. Además, confirmar que los valores se obtengan de placas o datos técnicos entregados por los fabricantes de los equipos.
4. El código de programación está dispuesto para realizar modificaciones en las funciones acerca del comportamiento de viscosidad y densidad-temperatura, de acuerdo al tipo de fluido que se requiera estudiar.
5. Para el correcto uso de la aplicación de optimización se recomienda leer el manual de usuario descrito en el Anexo C

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Armijos and M. Alexandra, “Aseguramiento de flujo en el transporte de petróleo pesado-disminución de caudal,” pp. 73–81, 2015.
- [2] H. Laurencio and M. X. Rodríguez, “Evaluación del régimen de temperatura del fluido multifásico para la optimización energética del proceso de bombeo hacia la separación, en el campo Edén Yuturi, bloque 12, de la empresa Petroamazonas EP,” UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI, 2015.
- [3] V. Chow, *Hidraulica de canales abiertos*. Santafe de Bogota: McGraw W-Hill, 1994.
- [4] G. G. A. 2021, “Equipo y sistemas para el tratamiento de fluidos industriales,” 2021. <https://www.gea.com/es/oil-gas-energy/industrial-fluids/index.jsp>.
- [5] J. Pérez González, B. M. Marín Santibañez, and F. Rodríguez González, “Bienvenidos al Laboratorio de Reología y Física de la Materia Blanda.” <https://www.esfm.ipn.mx/servicios-externos/reologia.html>.
- [6] J. Çengel, Yunus. Cimbala, *Mecânica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones*, Cuarta. México: McGraw W-Hill, 2017.
- [7] E. M. BERNAL OSPINA and F. A. GONZÁLEZ VARELA, “ANÁLISIS DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE OLEODUCTOS PARA EL TRANSPORTE DE CRUDOS PESADOS,” UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2016.
- [8] H. Laurencio Alfonso, A. Gilbert Hernández, and Y. Retirado Mediaceja, “Modelado de la viscosidad aparente de un petróleo crudo de 11°API con comportamiento no newtoniano,” *Ingeniare*, vol. 25, no. 4, pp. 674–680, 2017, doi: 10.4067/S0718-33052017000400674.
- [9] M. Perez, “Tecnologías para el aseguramiento de flujo para transporte de crudos pesados y extrapesados en instalaciones costa afuera,” 2017. <https://www.linkedin.com/pulse/tecnologías-para-el-aseguramiento-de-flujo-transporte-miguel-perez/>.
- [10] K. E. Gonzales Meza and M. A. Gonzales Bautista, “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO PARA EL TRANSPORTE DE CRUDOS PESADOS,” INSTITUTO POLITÉCNICO

NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS, 2020.

- [11] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, Séptima., vol. 7. México: McGraw W-Hill, 2011.
- [12] J. Cabanzón Labat, “DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR,” UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, 2018.
- [13] Solucion, “Cómo dimensionar un intercambiador de calor,” 220AD. <https://t-solucion.com/que-es-y-como-dimensionar-un-intercambiador-de-calor/>.
- [14] P. Sánchez and P. Linares, “Modelos Matemáticos de Optimización,” 0, vol. 0, no. 0, pp. 5–7, 2010, [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34357607/modelado_en_gams.pdf?1407141287=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMODELOS_MATEMATICOS_DE_OPTIMIZACION.pdf&Expires=1614208773&Signature=AKejhDWG6XBD4b-0IEMOIW17kyPBWp1xkdAOWE0Lr0tDx9zi5yZQkIFo.
- [15] E. G. Baquela and A. Redchuk, *Optimización Matemática con R. Volumen I: Introducción al modelado y resolución de problemas*. 2013.
- [16] M. A. Alvarez, “Qué es Python,” 2003. <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>.
- [17] R. E. Lopez Briega, “Problemas de Optimización con Python,” 2017. <https://relopezbriega.github.io/blog/2017/01/18/problemas-de-optimizacion-con-python/>.
- [18] C. M. Benjumea, P. N., Chaves, G., & Vargas, “Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional.,” vol. c, Colombia, p. 10, 2006.