



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TEMA:

“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, DURANTE EL AÑO 2015”. PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OPERACIÓN DE RENDIMIENTO EFICIENTE.

Autor:

.....
RODRÍGUEZ, Marco Xavier

Tutor:

.....
PhD. Ing., Héctor Luis, Laurencio Alfonso

LATACUNGA – ECUADOR

Mayo – 2016

AVAL DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe del Proyecto de Investigación y Desarrollo de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el posgraduado: Rodríguez Marco Xavier, con el título de tesis: **“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, DURANTE EL AÑO 2015”. PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OPERACIÓN DE RENDIMIENTO EFICIENTE**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa.

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

Latacunga, mayo del 2016

Para constancia firman:

.....
MSc. EDWIN MOREANO
PRESIDENTE

.....
PhD. ENRIQUE TORRES
MIEMBRO

.....
PhD. ILIANA GONZÁLES
MIEMBRO

.....
MSc. EFREN BARBOSA
OPONENTE

CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Programa de Maestría en GESTIÓN DE ENERGÍAS, nombrado por el Honorable Consejo Académico de Posgrado.

CERTIFICO:

Qué: el Trabajo de Investigación “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, DURANTE EL AÑO 2015”. PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OPERACIÓN DE RENDIMIENTO EFICIENTE, presentado por el Maestrante Marco Xavier Rodríguez con cédula de ciudadanía N°. 0501834923, egresado del programa de Maestría en Gestión de Energías cohorte 2013, reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal examinador que el Honorable Consejo Académico de Posgrado designe.

Latacunga, mayo del 2016

.....

PhD. Ing., Héctor Luis, Laurencio Alfonso

Tutor

AUTORÍA DE TESIS

El proyecto de tesis de maestría denominado “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, DURANTE EL AÑO 2015”. PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OPERACIÓN DE RENDIMIENTO EFICIENTE, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en las páginas correspondientes, cuya fuente se incorpora en la bibliografía.

Consecuentemente, este trabajo es de mi autoría.

En virtud de la declaración me responsabilizo del contenido, veracidad, alcance científico del proyecto de tesis, en mención.

Latacunga, mayo 2016

.....

Marco Xavier Rodríguez

CI: 0501834923

AGRADECIMIENTO

A DIOS por sus bendiciones.

A los profesores por los conocimientos impartidos y en especial a mi tutor por la orientación y permanente ayuda en el desarrollo del presente trabajo.

Marco Xavier Rodríguez.

DEDICATORIA

A mi madre por la vida y el apoyo permanente e incondicional.

A mi esposa que sigue siendo el pilar para la consecución de todos los logros alcanzados, y

A mis hijos Dayana, Roderick y Kevin, que son fuente de energía y la razón de mi vida.

Marco Xavier Rodríguez.

INDICE GENERAL

AVAL DEL TRIBUNAL DE GRADO	ii
CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DEL TUTOR.....	iii
AUTORÍA DE TESIS.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
INDICE GENERAL	vii
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS.....	xi
A. INTRODUCCIÓN.....	1
B. ELEMENTOS DEL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	3
a. Situación problemática:	3
b. Justificación de la investigación:	3
c. Objeto y problema de la investigación:	4
d. Campo de acción y objetivo general:.....	5
e. Hipótesis y desarrollo de la investigación:	5
f. Objetivos específicos	5
g. Sistema de tareas.....	6
h. Paradigma o enfoque epistemológico:.....	6
i. Nivel de la investigación:	6
j. Alcance de la investigación:	7
CAPÍTULO 1: MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO	8
1.1 Clasificación de los hidrocarburos.....	8
1.1.1 Clases de combustibles crudos ecuatorianos	11
1.2 Trabajos relacionados con estudios reológicos de fluidos.....	12
1.3 Modelo reológico del combustible ecuatoriano.....	16
1.4 Factores que influyen sobre el comportamiento reológico.....	18
1.4.1 Efecto del campo electromagnético.....	19
1.4.2 Efecto de la emulsificación.....	19
1.4.3 Efecto de la presión	20
1.4.4 Efecto de los aditivos.....	20
1.4.5 Efecto de la temperatura	21

1.5	Trabajos relacionados con el transporte de fluidos complejos por tuberías.....	22
1.6	Modelos utilizados en el cálculo de transporte de fluidos seudoplásticos	27
1.7	Flujo tecnológico y aplicación del transporte de combustibles por tuberías.....	30
1.7.1	Ventajas del transporte por sistemas de tuberías	31
1.8	Conceptos relacionados a la investigación	33
1.9	Marco legal referente a la investigación.....	34
1.10	Conclusiones del capítulo	35
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA		36
2.1	Modalidad de la investigación	36
2.2	Descripción del objeto de estudio.....	36
2.2.1	Consideraciones para el sistema de aceite caliente.....	39
2.2.2	Características de los equipos de bombeo empleados	40
2.3	Declaración de variables del proceso	40
2.3.1	Matriz de operacionalización de variables	43
2.4	Gradiente de presión en tuberías conductoras de fluidos multifásicos.....	44
2.5	Expresiones para la determinación de pérdidas de presión por resistencias locales.....	48
2.6	Expresiones para la determinación de costos y potencia hidráulica de transporte	49
2.7	Modelo de la variación de temperatura del fluido en la tubería	52
2.8	Técnicas experimentales utilizadas e Instrumentos.....	54
2.8.1	Instrumentación utilizada.....	58
2.8.2	Sistema de adquisición de datos	59
2.9	Conclusiones del capítulo	60
CAPÍTULO 3: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		61
3.1	Características fisicoquímicas del fluido multifásico.....	61
3.1.1	Resultados experimentales del comportamiento reológico del fluido multifásico	62
3.2	Análisis de la influencia de la temperatura en las propiedades del fluido multifásico.....	65
3.3	Análisis del comportamiento de la variación de temperatura en la tubería	69
3.3.1	Análisis de la variación de la temperatura del fluido multifásico en la tubería	72

3.4	Análisis del modelo del gradiente de presión	73
3.5	Proceso para la obtención de la temperatura óptima de transporte por tuberías.....	76
3.5.1	Obtención de la temperatura óptima de transporte del fluido multifásico, estudio de casos	77
3.6	Conclusiones del capítulo	83
CAPÍTULO 4: PROPUESTA.....		84
4.1	Título de la propuesta	84
4.2	Justificación de la propuesta.....	84
4.3	Objetivos de la propuesta.....	85
4.4	Estructura de la propuesta.....	85
4.5	Desarrollo de la propuesta	87
4.5.1	Comprobación del tipo de bomba; velocidad específica	87
4.5.2	Determinación del comportamiento de las propiedades reológicas y termofísicas del fluido multifásico	88
4.5.3	Comportamiento del gradiente de temperatura en las tuberías.....	90
4.5.4	Comportamiento del gradiente de presión y potencia hidráulica en las tuberías conductoras	91
4.5.5	Determinación del costo de bombeo y de calentamiento del fluido... ..	92
4.5.6	Comprobación del espesor de aislamiento de tubería.....	95
4.6	Beneficio.....	97
4.7	Impacto económico, social y ambiental.....	97
4.7.1	Económico	98
4.7.2	Social	99
4.7.3	Impacto ambiental	100
4.8	Conclusiones del capítulo	102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		103
CONCLUSIONES		103
RECOMENDACIONES		104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		105
BIBLIOGRAFÍA.		111
ANEXOS		112

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 <i>Clasificación de los petróleos según su densidad.</i>	10
Tabla 2.1 <i>Corrientes de entrada al intercambiador</i>	40
Tabla 2.2 <i>Matriz de operacionalización de variables</i>	43
Tabla 2.3 <i>Equipos utilizados en ensayos de laboratorio.</i>	55
Tabla 3.1 <i>Características fisicoquímicas del fluido multifásico de hidrocarburo</i>	61
Tabla 3.2 <i>Resultados obtenidos del estudio reológico.</i>	63
Tabla 3.3 <i>Correlaciones de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad</i>	64
Tabla 3.4 <i>Parámetros reológicos obtenidos y coeficiente de correlación múltiple</i>	64
Tabla 3.5 <i>Datos del sistema de transporte de Apaika a EPF.</i>	70
Tabla 3.6 <i>Especificaciones técnicas de los ductos de recolección del Bloque 31.</i>	71
Tabla 3.7 <i>Parámetros característicos del fluido en las tuberías.</i>	71
Tabla 3.8 <i>Comparación de las variaciones de la temperatura en la tubería.</i>	72
Tabla 3.9 <i>Relación de parámetros de las instalaciones.</i>	78
Tabla 4.1 <i>Clasificación de las máquinas hidráulicas según la velocidad específica</i>	88
Tabla 4.2 <i>Datos que se deben considerar de las especificaciones técnicas de la instalación.</i>	96
Tabla 4.3 <i>Comportamiento de los costos para la temperatura de operación en la instalación en estudio.</i>	98
Tabla 4.4 <i>Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.</i>	100
Tabla 4.5 <i>Identificación de riesgos e impactos ambientales asociados al transporte del fluido multifásico por tuberías.</i>	101

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 <i>Curvas de flujo típica: (a) newtoniano; (b) seudoplástico; (c) dilatante; (d) plástico ideal (Bingham); (e) plástico real.</i>	18
Figura 2.1 <i>HMI Planta de Procesos.</i>	37
Figura 2.2 <i>Esquema del proceso de calentamiento de aceite térmico.</i>	39
Figura 2.3 <i>Punto de trabajo de las bombas del sistema Hot Oil.</i>	40
Figura 2.4 <i>Diagrama causa – efecto</i>	42
Figura 2.5 <i>Esquema estructural utilizado en la obtención del modelo.</i>	44
Figura 2.6 <i>Radios de la sección transversal de la tubería de transporte.</i>	52
Figura 2.7 <i>Sistema de adquisición de datos.</i>	59
Figura 3.1 <i>Curvas de flujo del fluido multifásico en función de la temperatura.</i> .	63
Figura 3.2 <i>Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.</i>	65
Figura 3.3 <i>Comportamiento de índice de consistencia másica en función de la temperatura.</i>	66
Figura 3.4 <i>Correlación entre la densidad del combustible y la temperatura.</i>	67
Figura 3.5 <i>Correlación entre la capacidad calorífica del combustible y la temperatura.</i>	68
Figura 3.6 <i>Correlación entre la conductividad térmica del combustible y la temperatura.</i>	68
Figura 3.7 <i>Sistema de ductos para transporte del fluido multifásico.</i>	70
Figura 3.8 <i>Distribución de temperatura simulada por cada tramo.</i>	73
Figura 3.9 <i>Índice de consistencia másica en función de la longitud de tubería.</i> ..	74
Figura 3.10 <i>Comportamiento de la densidad en función de la longitud de tubería.</i>	74
Figura 3.11 <i>Dependencia del número de Reynolds con la longitud de tubería.</i> ...	75
Figura 3.12 <i>Influencia de la temperatura en las pérdidas específicas de presión.</i>	76
Figura 3.13 <i>Simulación de costos en función de la temperatura real del fluido; tramo Apaika-Nenke.</i>	79
Figura 3.14 <i>Simulación de costos en función de la temperatura inicial de 25 °C del fluido; tramo Apaika-Nenke.</i>	79

Figura 3.15 <i>Simulación de costos en función de la temperatura real del fluido; tramo Nenke-ECB.</i>	80
Figura 3.16 <i>Simulación de costos en función de la temperatura inicial de 25 °C del fluido; tramo Nenke-ECB.</i>	81
Figura 3.17 <i>Simulación de costos en función de la temperatura real del fluido; tramo ECB-EPF.</i>	81
Figura 3.18 <i>Simulación de costos en función de la temperatura inicial de 25 °C del fluido; tramo ECB-EPF.</i>	82
Figura 4.1 <i>Diagrama para la obtención de la temperatura racional de transporte.</i>	87
Figura 4.2 <i>Relación entre la temperatura, el flujo volumétrico y el diámetro de tubería.</i>	95
Figura 4.3 <i>Gráfico de comportamiento de costos para la selección de espesor de aislamiento.</i>	96
Figura 4.4 <i>Relación entre espesor de aislamiento y costos.</i>	97



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

Latacunga – Ecuador

TEMA: “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, DURANTE EL AÑO 2015”. PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OPERACIÓN DE RENDIMIENTO EFICIENTE.

Autor: Rodríguez, Marco Xavier

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio teórico y experimental, donde se proponen relaciones funcionales para variaciones de presión en tuberías, considerándose el flujo no estacionario durante el transporte del fluido multifásico extraído del bloque 31 de la empresa Petroamazonas EP, durante el año 2015. La revisión bibliográfica soporta las aplicaciones de los trabajos analizados, en cuanto a desarrollo de modelos matemáticos y correlaciones empíricas que permitan evaluar los efectos simultáneos de la fuerza viscosa y de mezcla durante el bombeo del fluido. A partir del estudio experimental se realizó la caracterización del fluido considerando el comportamiento reológico, notándose poca influencia de las variaciones de temperatura en los resultados obtenidos del índice de flujo, con el valor de 0,64 como promedio; en ella se modela el comportamiento de la viscosidad aparente con relación al gradiente de velocidad y la temperatura, observándose que el fluido presenta un comportamiento pseudoplástico para las diferentes temperaturas experimentadas. Se proponen modelos que conforman una metodología apropiada para la evaluación y obtención de la temperatura óptima de bombeo del fluido multifásico. La metodología propuesta, posibilita la simulación de pérdidas de presión y potencia hidráulica para fluidos pseudoplásticos mediante una aplicación informática. En cuanto a costo de operación, se demuestra el aporte que da el calor interno del pozo en el proceso de transporte, dando como resultado que para el sistema en general se deja de consumir 113913,40 \$/año.

Palabras claves: Caracterización, Comportamiento pseudoplástico, Fluido multifásico, Flujo no estacionario, Fuerza viscosa.



TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

DIRECTION OF GRADUATE PROGRAMS

Latacunga – Ecuador

THEME: “ASSESSMENT SCHEME DURING MULTIPHASE FLUID TEMPERATURE FOR ENERGY PUMPING OPTIMIZATION PROCESS TO SEPARATION, IN THE EDEN YUTURI FIELD, BLOCK 12, OF THE PETROAMAZONAS PE COMPANY, DURING THE YEAR 2015”. PROPOSAL FOR A METHODOLOGY FOR EFFICIENT OPERATING PERFORMANCE.

Author: Rodríguez, Marco Xavier

ABSTRACT

This theoretical and practical study was developed during the year 2015 and propose functional relations for pressure variations of pipes transporting the multi-phase non-stationary fluid extracted from the Block 31 operated by Petroamazonas EP. The literature review is consistent with the work developed including the mathematical models and the empirical correlations used for evaluating the simultaneous effects of the viscosity and mixing during pumping. From an experimental study the characterization of the fluid using rheological behavior was developed. This study discovered that the changes in the temperature has few influence in the flow index, with an average percentage of 0.64. The fluid characterization was used for simulating the viscosity changes as a function of the velocity and temperature. This characterization discovered that the fluid exhibits a pseudo-plastic behavior within the temperature range analyzed. This project proposed several models to obtain the optimum temperature for the multi-phase fluid pumping. This work presented a method to simulate the pressure losses and hydraulic power for pseudo-elastics fluids by using computational analysis. In addition, this project also included the analyses of the operational costs and demonstrated that the fluids high temperature from the reservoirs represents a saving of approximately 113,913.40 USD per year.

Keywords: Characterization, Pseudoplastic behavior, Multiphase fluid, Non-stationary flow, Force viscose.

A. INTRODUCCIÓN

El sector petrolero constituye el mayor productor de portadores energéticos, por lo que ocupa en el Ecuador un lugar importante en los lineamientos para la economía. El adecuado rendimiento de los equipos electromecánicos en las instalaciones industriales y el uso racional de los recursos energéticos disponibles, inciden considerablemente en la reducción de los costos productivos.

En este escenario, un incremento del costo relativo de producción del barril de petróleo crudo causado por el desaprovechamiento de recursos, repercute en la reducción de la rentabilidad y recortes a todo nivel, por tal situación se hace necesaria la disminución de los costos de producción, tomando parte prioritaria la operación eficiente de los procesos más relevantes.

La transportación de los fluidos petrolíferos en los campos y plantas de tratamiento, cobra importancia primaria en el trasiego por sistemas de tuberías. Estos sistemas difundidos mundialmente, cuando operan en los parámetros de máxima eficiencia, son de gran efectividad económica y ambiental con respecto a los demás medios de transporte de combustibles pesados (Somoza y García, 2002).

Los sistemas de tuberías para el transporte de petróleos resultan tan eficaces que existen hoy en el mundo miles de kilómetros (Laurencio, 2012). En el Ecuador la aplicación de los oleoductos para la transportación, son un claro reflejo del desarrollo actual entre las inversiones ejecutadas en la industria petrolera.

El mayor problema en el transporte de los petróleos y sus acompañantes, radica en que estos son fluidos de alta 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.

El fluido petrolífero extraído de los pozos, presenta numerosas dificultades para su transporte y manejo, requiriéndose de técnicas especiales para mejorar sus propiedades como la fluidez. El calentamiento del combustible a una temperatura

adecuada para el bombeo, constituye la alternativa más usual y viable aplicada en la actualidad.

Por otra parte, se conoce que las teorías para la determinación de las propiedades reológicas y de transporte de líquidos y mezclas no conducen a un método teórico de estimación, sino a 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. En tal sentido se han identificado las siguientes deficiencias:

- Desconocimiento de las propiedades de transporte del fluido, debido a la carencia o actualización de estudios en este campo.
- Falta de datos para la proyección, selección y obtención de los parámetros racionales de transporte del fluido multifásico.
- Los métodos de cálculo disponibles para el estimado de los parámetros energéticos en instalaciones de transporte han sido elaborados a partir de datos experimentales, obtenidos para sistemas particulares y no existe un método apropiado para determinar los parámetros racionales de transporte del combustible.
- En las condiciones actuales de operación, no se garantizan los parámetros adecuados para el desempeño eficiente del proceso de transporte del fluido multifásico.

La metodología aplicada parte de una investigación inicial, apoyada de sustentos de estudios técnicos realizados, datos informativos claves del personal operativo y de datos obtenidos de campo de fases de observación y mediciones en sitio, datos de pruebas en laboratorio, registros, formulaciones y análisis de datos.

Los métodos utilizados para la estimación de las pérdidas de carga en tuberías se basan en estudios y correlación de datos experimentales.

Para la solución de las deficiencias mencionadas, se requiere de estudios que permitan determinar las propiedades y parámetros eficientes para el transporte del fluido petrolífero, a partir de su naturaleza reológica y de la determinación de los gradientes de presión en las tuberías; por lo que este trabajo se convierte en un aporte para el funcionamiento racional de las instalaciones de bombeo hacia la planta de tratamiento.

B. ELEMENTOS DEL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

a. Situación problemática:

En este escenario se enmarca la situación problemática asociada a que no se ha avanzado a profundidad en el estudio y perfeccionamiento de métodos apropiados para los diferentes sistemas de bombeo para transporte de los petróleos y fluidos acompañantes extraídos en Petroamazonas EP, lo que dificulta en gran medida la selección y evaluación a nivel industrial de estos sistemas. A pesar de las disímiles limitaciones se busca mejorar la eficiencia de los procesos productivos y los medios de producción relacionados con el tema en cuestión.

Dada la situación planteada, se observa cierta desactualización de estudios y falta de un continuo seguimiento de las propiedades de los petróleos y fluidos acompañantes extraídos de las locaciones remotas y sus regularidades ante las variaciones de temperatura, dificultándose la correcta selección y el establecimiento de los parámetros eficientes en el sistema de transporte, lo que conduce al aumento del consumo energético e ineficiencia en las instalaciones de bombeo. Como consecuencia de la irracionalidad para la selección de temperaturas de flujo, en la mayoría de los casos se han encontrado propuestas de temperaturas de bombeo muy superiores a la óptima.

b. Justificación de la investigación:

El presente estudio y evaluación de parámetros tendrá una utilidad práctica y metodológica que ayudará a determinar el valor del régimen de temperatura óptimo para proceso de separación del fluido proveniente de las locaciones remotas (Apaika y Nenke) del bloque 31 en las facilidades de EPF, consiguiendo

con ello la optimización energética (uso adecuado de la energía), optimización de recursos (reducción de la utilización de combustibles y química), reducción del impacto ambiental (reducción de gases CO y CO₂) producto de la quema de combustible para el calentamiento y a su vez obtener un producto dentro de especificaciones.

De la misma forma, se pretende dar un aporte sustancial para los estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi y la sociedad, proporcionando la información necesaria en lo referente al régimen térmico óptimo de operación en el proceso de tratamiento del petróleo crudo.

Se considera un proyecto factible, ya que por medio de la racionalización se permitirá reducir costos operacionales.

Para determinar el punto óptimo del régimen de temperatura en la operación a diferente carga se aplicaran los métodos de observación, inductivo y analítico y las técnicas de observación, experimentación, medición de parámetros, cálculos, la modelación y simulación.

c. Objeto y problema de la investigación:

El problema a investigar queda delimitado al sistema de bombeo hacia el tratamiento de flujo, en el campo Edén Yuturi del bloque 12 en la empresa Petroamazonas EP, durante el 2015.

Problema de la investigación

¿Cómo incide el régimen de temperatura del fluido multifásico extraído del B-31 en la optimización energética del proceso de bombeo hacia la separación en el campo Edén Yuturi, Bloque 12 de Petroamazonas EP?

Objeto de estudio

Sistema de procesamiento del petróleo crudo.

d. Campo de acción y objetivo general:

Campo de acción

Eficiencia energética en sistemas de bombeo para procesos de separación de crudo.

Objetivo general

Determinar el régimen de temperatura óptimo del fluido multifásico, garantizando la eficiencia energética en el proceso de bombeo para separación del fluido multifásico, en la empresa Petroamazonas EP, Campo Edén – Yuturi del Bloque 12 durante el 2015.

e. Hipótesis y desarrollo de la investigación:

Si se establecen las principales propiedades físicas y reológicas del fluido multifásico en función de la temperatura y las expresiones matemáticas que describan las regularidades del proceso de flujo por tuberías; es posible obtener parámetros óptimos del proceso de bombeo para separación, incluyendo variables tales como la temperatura, la caída de presión y condiciones de flujo.

f. Objetivos específicos

1. Realizar las investigaciones teóricas y experimentales de las propiedades y parámetros de transporte del combustible.
2. Analizar la influencia de la temperatura en las propiedades del combustible y en el proceso de separación.
3. Proponer un método de cálculo conformado por un conjunto de ecuaciones, que tenga en cuenta las características reológicas y fenomenológicas del sistema de flujo.
4. Contribuir a la racionalización de los costos de transportación, sobre la base de la mejora de los métodos de cálculo, al tenerse en cuenta los efectos reales de flujo del fluido en tuberías.

g. Sistema de tareas

1. Caracterización del flujo multifásico y pruebas de viscosidad.
2. Identificación de las ecuaciones para simulación de la velocidad del flujo de la línea proveniente del Bloque 31 al ingreso a la Planta.
3. Medición de parámetros (Volumen, presión y temperatura) del fluido multifásico al ingreso del proceso y en los intercambiadores a diferentes cargas.
4. Valoración de los impactos asociados al proceso en estudio.

h. Paradigma o enfoque epistemológico:

Paradigma es un grupo de creencias que se comparten en una comunidad científica en cuanto a los métodos, técnicas y formas de investigar.

El enfoque de este proyecto tuvo el carácter experimental y cuanti – cualitativa, en razón, que se utilizó la observación, registro y análisis de las variables que intervienen en la investigación; cuantitativa porque en la investigación de campo se realizará en el lugar donde se producen los hechos, bloque 31 (locaciones Apaika, Nenke), Bloque12 (planta de procesos de EPF); y cualitativa ya que en función de los datos obtenidos se estableció condiciones y recomendaciones sobre las variables de investigación con el apoyo del marco teórico.

i. Nivel de la investigación:

El nivel de una investigación viene dado por el grado de profundidad y alcance que se pretende con la misma. De acuerdo a la naturaleza de la investigación, reúne por su nivel las características de un estudio que alcanza todos los niveles de investigación:

Exploratorio.- Porque se estuvo en contacto con la realidad, observación y análisis preliminar en el campo del área, elementos y relaciones del objeto de estudio, y con la ayuda de ingenieros, técnicos y operadores, permitió acercarse a la esencia misma del problema, además por ser un tema nuevo y de la problemática actual.

Descriptivo.- Porque para el proyecto investigativo fue necesario describir ciertas características del proceso, identificar ciertos parámetros operativos y su comportamiento para los diferentes puntos, de modo de comprobar las relaciones entre las variables de la investigación.

Correlacionado.- Porque existen ciertos estudios al respecto y con los datos medidos en campo nos permitió identificar asociaciones entre variables y establecer relaciones estadísticas.

Explicativo.- Porque el fenómeno presentado intuitivamente tiene cierto grado de explicación a la problemática de la investigación, en la cual se pretende experimentalmente comprobar su hipótesis, es decir; si se establecen las principales propiedades físicas y reológicas del fluido multifásico (variables independientes), obtener parámetros eficientes para la optimización energética del proceso de bombeo para la separación (variables dependientes).

j. Alcance de la investigación:

La presente investigación, tiene como alcance establecer los rangos de temperaturas adecuadas para minimizar el consumo de energía en el sistema de transporte del fluido multifásico para el proceso de separación del petróleo crudo a diferentes cargas; la determinación del punto óptimo del régimen de temperatura de calentamiento de dicho fluido, se establece bajo un modelamiento matemático que describe el comportamiento no estacionario del fluido, lográndose proponer soluciones para la mejora de la eficiencia energética.

El procedimiento identificado con las regularidades del proceso de calentamiento del fluido multifásico, empleado para la evaluación de los parámetros de operación, influye en la optimización de la operación y el rendimiento del sistema de tratamiento del petróleo crudo para la eficiencia energética.

Como propuesta se establece una metodología a partir del modelamiento matemático en el cual se determinan los regímenes óptimos de temperatura de operación para el proceso de flujo.

CAPÍTULO 1: MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO

El papel que desempeñan los sistemas de transporte en las industrias petrolíferas es considerable en los tiempos actuales. La instalación de un nuevo oleoducto requiere de estudios previos significativos, en los cuales, se tienen en cuenta todas las variantes que pudieran acortar o beneficiar el proceso de transporte. El análisis riguroso de estudios en este campo, permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que se manifiestan entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos relacionados con el transporte de petróleos pesados por sistemas de tuberías. En tal sentido, se declara como objetivo del capítulo:

- Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionada con las propiedades de fluidos y su transporte por tuberías.
- El objetivo está orientado a la fundamentación de la investigación del bombeo de petróleos y los fluidos acompañantes extraídos en Petroamazonas EP.

1.1 Clasificación de los hidrocarburos

A los hidrocarburos se les define como compuestos químicos de carbono 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 (Momemer, 2004).

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.

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.

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 (Ocampo *et al.*, 1997).

Según el predominio de uno de los compuestos característicos, los petróleos se pueden clasificar en:

1. Petróleo de base parafínicas

- Predominan los hidrocarburos saturados o parafínicos.
- Son muy fluidos de colores claros y bajo peso específico (aproximadamente 0,85 kg/l).
- Por destilación producen abundante parafina y poco asfalto.
- Proporcionan mayores porcentajes de nafta y aceite lubricante.

2. Petróleo de base asfáltica o nafténica

- Predominan los hidrocarburos etilénicos y diétilínicos, cíclicos ciclánicos (llamados nafténicos) y bencénicos o aromáticos.
- Son muy viscosos, de coloración oscura y mayor peso específico (aproximadamente 0,950 kg/l).
- Por destilación producen un abundante residuo de asfalto. Las asfaltitas o rafealitas argentinas fueron originadas por yacimientos de este tipo, que al aflorar perdieron sus hidrocarburos volátiles y sufrieron la oxidación y polimerización de los etilénicos.

3. Petróleo de base mixta

- De composición por bases intermedias, formados por toda clase de hidrocarburos: saturados, no saturados (etilénicos y acetilénicos) y cíclicos (ciclánicos o nafténicos y bencénicos o aromáticos).
- La mayoría de los yacimientos mundiales son de este tipo.

En la práctica es común hablar de clases de petróleos crudos de acuerdo al peso específico, expresado en una escala normalizada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute). En la tabla 1.1 se muestra la clasificación de los petróleos crudos en términos de su densidad, aunque hay que enfatizar que la producción de diversos yacimientos productores está asociada a un solo tipo (Ávila, 1995).

Tabla 1.1 *Clasificación de los petróleos según su densidad.*

	Petróleo crudo	Densidad (g/cm ³)	Densidad (grados API)
1	Extra pesado	≥ 1,0	≤ 10,0
2	Pesado	1,01 ÷ 0,92	10,1 ÷ 22,3
3	Mediano	0,91 ÷ 0,87	22,4 ÷ 31,1
4	Ligero	0,86 ÷ 0,83	31,2 ÷ 39
5	Súper ligero	< 0,83	> 39

Fuente: Ávila (1995).

Esta escala es llamada densidad API, o comúnmente conocida como grados API (Ávila, 1995), donde:

$$^{\circ} API = \frac{141,5}{\rho_{15^{\circ}C}} - 131,5 \quad . \quad . \quad . \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Siendo: $\rho_{15^{\circ}C}$ = densidad a 15,6 °C; (kg/m³).

Para asegurar un mejor valor económico de los hidrocarburos en propósitos comerciales, los combustibles crudos vendidos nacional e internacionalmente son en general mezclas de petróleos de diferentes densidades.

1.1.1 Clases de combustibles crudos ecuatorianos

En el Ecuador se han explotado dos clases de crudos, donde existen dos zonas de influencias para la explotación petrolera, la Península de Santa Elena y la región amazónica. En la región amazónica en cambio los yacimientos encontrados han sido grandes, lo que ha permitido la explotación de crudo, pero no es hasta finales de los años 60 que se los encuentra, lo que da lugar, a la era petrolera del Ecuador, encontrándose dos clases de crudo:

1. Crudo oriente

Denominado "Crudo Intermedio" esto debido a su densidad.

2. Crudo napo

Es el crudo pesado y agrio, también es de menor valor en el Mercado Mundial debido a su exceso contenido de azufre lo cual dificulta el proceso de refinación.

Las características fisicoquímicas de los petróleos crudos ecuatorianos varían en un amplio rango con respecto a los petróleos de producciones internacionales. En ocasiones estos petróleos se muestran como fluidos multifásicos, los que pueden presentar inestabilidad durante el transporte.

Según Trapeznikov (2011), la inestabilidad y la incompatibilidad son fenómenos interrelacionados y tradicionalmente son identificados por:

- Inestabilidad: es la tendencia de un combustible a formar sedimentos por calentamiento o por envejecimiento, últimamente se ha ampliado esta definición a la tendencia del combustible a efectuar otros cambios tales como el aumento de su viscosidad.
- Incompatibilidad: es la tendencia de un combustible a formar sedimentos cuando se mezcla con otros combustibles. Así, dos combustibles estables por separados, pueden formar sedimentos al mezclarse.

Los fenómenos de inestabilidad provocan dificultades por la formación de sedimentos en intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento y tuberías de transporte. A mayor contenido de azufre en el combustible crudo, se observa un incremento en el contenido de asfaltenos y una disminución del contenido de carbono (Prieto, 2008).

1.2 Trabajos relacionados con estudios reológicos de fluidos

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la mecánica de los fluidos se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseulle, interesado en la circulación de la sangre. Sobresalieron también en el aspecto teórico Julios Weibach y Gottlieb Hagen, y se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Ventura y Pitot entre otros (Ochoa, 2011).

El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e independientemente al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se les conoce como ecuaciones de Navier-Stokes. En Ecuador el desarrollo de los estudios de fluidos no newtonianos no se promueve hasta finales del siglo pasado, y han devenido una de las bases principales del progreso científico-técnico en este campo de la ciencia.

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, muchos han sido los autores que abordan esta temática, de vital importancia, en el desarrollo de la investigación del flujo de fluidos.

En este aspecto resultan interesantes los trabajos de De la Paz (2002); Caldiño y Salgado (2004), que presentan una metodología para obtener funciones reológicas en forma simplificada, de utilidad para ajustar modelos de cálculo para fluidos con altas concentraciones. En los mismos se observó y evaluó la influencia del componente sólido en el valor de la viscosidad, aunque en ambos casos no se tuvieron en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas, como el

pH y diámetro medio de las partículas, lo que limita la aplicación de la metodología.

Se señala como principal limitación de estos trabajos, no tener en cuenta el comportamiento reológico del fluido para variaciones de la temperatura; siendo esta variable de gran influencia en la estructura y propiedades de la materia, según refieren los resultados obtenidos por diferentes investigaciones (Da Silva *et al.*, 2005; Dak *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2008; Andrade *et al.*, 2009; Vandresen *et al.*, 2009).

Khatib (2006) propone un modelo matemático que correlaciona la viscosidad de fluidos pseudoplásticos con el gradiente de velocidad y el índice de flujo, ajustado por un coeficiente que ha sido determinado de forma experimental, nombrado como constante de tiempo de deformación; este modelo se ha relacionado con la viscosidad del fluido cuando el gradiente de velocidad tiende desde cero hasta infinito.

El avance tecnológico en la industria del petróleo se debe en buena medida a las herramientas y metodologías proporcionadas por la física. En particular, los estudios reológicos y dieléctricos se pueden considerar como los más conocidos y eficaces para estudiar los petróleos parafínicos y asfálticos (Maruska y Rao, 1987).

En los últimos años las herramientas aplicadas al estudio, caracterización y control de crudos asfálticos y parafínicos, aparecen como técnicas altamente promisorias mediante la aplicación de campos eléctricos y magnéticos, ya sea por separado o combinadas sus acciones con el efecto de la temperatura. El comportamiento electrorreológico de los petróleos crudos, debido a la presencia de asfaltenos, es un campo totalmente nuevo que puede desentrañar algunas características aún desconocidas de estos últimos; la aplicación de campos eléctricos en petróleos con contenido de agua puede acelerar el rompimiento entre el enlace de fases dispersas y continuas (Mechetti *et al.*, 2000).

Harms (1991) a partir del estudio reológico de un petróleo parafínico, propuso un método para controlar la acumulación de depósitos de parafina en la tubería de producción y líneas de flujo. La exitosa herramienta previene la obstrucción de la tubería por sedimentos utilizando la caracterización reológica a diferentes temperaturas.

Wang y Dong (1995) realizaron estudios del comportamiento de la viscosidad en diferentes petróleos pesados, comparando la acción de la temperatura y el campo magnético sobre el área de flujo. En todos los casos la viscosidad disminuyó y según sus recomendaciones el generador de campo magnético puede ser conectado a la tubería en el sistema de bombeo mecánico.

Chen *et al.* (1994) investigaron el efecto de la aplicación del campo eléctrico alterno en la viscosidad del petróleo pesado y su emulsión, donde se observó la formación de largas cadenas de gotas entre electrodos, que resulta de los dipolos inducidos en las gotas de agua en presencia del campo eléctrico, similar a lo observado en fluidos electrorreológicos.

Mechetti y Zapana (2000); Mechetti *et al.* (2000), presentan resultados de estudios del comportamiento reológico de petróleos crudos asfálticos a diferentes temperaturas y bajo la acción del campo eléctrico. Investigaron el comportamiento viscosimétrico de un petróleo crudo argentino de baja viscosidad con 7 % de contenido de asfaltenos; donde encuentran una dilatancia atípica para un crudo de baja viscosidad relativa y también una anomalía termorreológica (mayor viscosidad para una mayor temperatura), resultados análogos a lo planteado por Ferro *et al.* (2004). La dilatancia mostrada se explica por la presencia de partículas cargadas en suspensión coloidal, lo que podría atribuírsele en este caso a la presencia de asfaltenos.

Por otro lado Mechetti *et al.* (2001) llevaron a cabo estudios electrorreológicos de petróleos crudos y emulsiones; ellos analizaron el comportamiento de la viscosidad en condiciones de flujo para diferentes velocidades de deformación e intensidades de campo, donde observaron un rompimiento rápido de la emulsión, lo que resulta de gran importancia para el proceso de extracción de agua en los

crudos. Similar al trabajo antes mencionado, en Balan *et al.* (2008) caracterizan el comportamiento reológico de un petróleo crudo al ser tratado mediante variaciones del campo eléctrico y magnético para diferentes temperaturas. Mediante este estudio se demostró la relación de variaciones de la viscosidad para distintas temperaturas e intensidades del campo electromagnético.

En las últimas décadas se han realizado varios estudios comparativos de viscosidad relacionados con el método de emulsión de los petróleos pesados; aunque no es el método más empleado en el transporte de petróleos, se resaltan los resultados obtenidos con la Oriemulsión en Venezuela; se encuentran además los trabajos de Romo (1993), donde se determina que las emulsiones con un 70 % de petróleo pesado y 5 % de sustancia tensoactiva, tienen una alta fluidez porque la viscosidad se ha reducido a menos de 1/10 de la viscosidad del petróleo pesado si se logra formar una emulsión directa.

Vita *et al.* (2001) en sus estudios relacionados con propiedades reológicas de un petróleo pesado mexicano y la estabilidad de sus emulsiones, determinaron que el petróleo mantenía un comportamiento pseudoplástico a diferentes condiciones de temperatura de experimentación. Ellos lograron obtener estabilidades hasta de nueve meses, considerándose resultados satisfactorios al compararse la disminución significativa de la viscosidad de la emulsión con la viscosidad del petróleo sin emulsionar.

Similar a los trabajos antes descritos, en Díaz y Falcón (2004), se encuentran los resultados del estudio reológico al petróleo crudo y la preparación de emulsiones, empleando productos de la pirólisis como agente emulsionante (patente de Falcón *et al.*, 1995), donde se establecen consideraciones sobre el transporte de estas emulsiones por tuberías, sus ventajas y limitaciones.

De igual manera Ferro *et al.* (2004) a partir del estudio reológico realizado a un petróleo crudo, precisan la influencia de determinadas variables en la preparación de emulsiones, emplean productos de la pirólisis para su utilización como pinturas asfálticas. En el trabajo experimental se emplearon dos tipos de agentes

emulsionantes. En los estudios reológicos de los petróleos se observaron comportamientos pseudoplásticos y plástico ideal para todos los casos.

Benítez *et al.* (2004) analizan la influencia de aditivos en las propiedades físicas del crudo. Los resultados mostraron que existe influencia notable en el porcentaje de carbón, cenizas, densidad, viscosidad y valor calórico, alejándose para algunas concentraciones de las normas establecidas para estos parámetros. Demuestran que las propiedades físicas del combustible con las muestras de aditivo presentan cierta variación respecto al combustible, en cuanto a punto de inflamación y porcentaje de agua no existe influencia de los aditivos.

Falcón *et al.* (2006) describen algunos resultados de un estudio llevado a cabo sobre la estabilidad de las mezclas de combustible y su comportamiento reológico. La estabilidad se evaluó por propiedades macroscópicas tales como la viscosidad y la densidad. También se estudió el efecto de los agentes tensoactivos en estas mezclas y la estratificación de las muestras durante el almacenaje.

Laurencio y Delgado (2008) efectúan el estudio reológico a un petróleo crudo y sus emulsiones; se determinó que tanto el petróleo como la emulsión presentaban comportamiento pseudoplástico, por lo que se propusieron los modelos para la estimación de sus parámetros reológicos. Incluyen la influencia de la temperatura en los modelos antes mencionados, obteniéndose un resultado de mayor aplicabilidad práctica.

Resultados similares han sido obtenidos por Cárdenas y Fonseca (2009), en la modelación reológica de asfaltos convencionales y por Balagui *et al.* (2010); Bourbon *et al.* (2010); Chenlo *et al.* (2010); Colby (2010); Risica *et al.* (2010), en la caracterización reológica de sistemas hidrocoloides en diferentes niveles de concentración y de temperatura.

1.3 Modelo reológico del combustible ecuatoriano

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos, a su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos (Skelland, 1970; Perry, 1988; Darby, 2001; Gardea, 2008).

En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante (figura 1.1 **a**), siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad, a diferencia de los no newtonianos (figura 1.1 **b, c, d, e**).

Según estudio preliminar el autor ha determinado que el fluido multifásico presenta un comportamiento no newtoniano del tipo pseudoplástico, partiendo de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantienen la temperatura y otras condiciones constantes. Aunque no se analiza la influencia de la temperatura en el rango de operación de bombeo; se demuestra que su viscosidad disminuye con el incremento del gradiente de velocidad; donde esta comienza a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante $\tau > 0$, (figura 1.1 **b**). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele, (ecuación 1.2):

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy} \right)^n \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Dónde: n = índice de flujo; (adimensional). K = índice de consistencia másica; (Pa·s). $-\frac{dv_x}{dy} = \dot{\gamma}$ = gradiente de velocidad; (1/s).

Según Khatib (2006), la viscosidad aparente de acuerdo con la ecuación 4 viene dada por la relación:

$$\mu_a = K \cdot \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Para los líquidos pseudoplásticos y dilatantes, el gradiente de velocidad en la tubería se puede expresar en función de la velocidad media del fluido (v) y del índice de flujo (n). Al representar gráficamente la relación del esfuerzo de corte como función del gradiente de velocidad, se obtienen las curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo (figura 1.1).

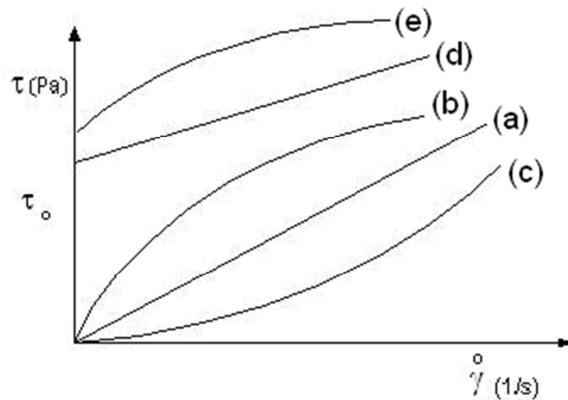


Figura 1.1 Curvas de flujo típica: (a) newtoniano; (b) seudoplástico; (c) dilatante; (d) plástico ideal (Bingham); (e) plástico real.

Fuente: Laurencio (2012).

La clasificación reológica tiene su aplicación fundamentalmente en la correcta selección de métodos aplicables a la evaluación de instalaciones, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido, lo que favorece significativamente al objetivo de la investigación.

1.4 Factores que influyen sobre el comportamiento reológico

En las industrias química, minera y petrolera se presenta el flujo multifásico a través de tuberías, muy complejo de modelar debido a la presencia de varias fases. Estas mezclas de comportamiento no newtoniano, en algunos casos presentan un esfuerzo de corte inicial (Doron y Barnea, 1995); la reología de estos sistemas se ha estudiado por años y desafortunadamente la mayoría de las aproximaciones matemáticas basadas en sistemas ideales, son de uso limitado para definir el comportamiento reológico al variarse diferentes factores.

En los sistemas coloidales, el efecto de las propiedades de superficie se debe fundamentalmente a que el comportamiento reológico es afectado considerablemente por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, lo que influye directamente sobre la interacción neta entre las partículas.

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. Cuando la interacción neta es repulsiva, se observa un comportamiento newtoniano, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva el fluido puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial (Cerpa y Garcell, 1999).

Resulta evidente que el efecto de las propiedades superficiales sobre la reología es un fenómeno de carácter universal, donde diferentes factores pueden influir en su comportamiento. En el proceso de explotación de petróleos, varios factores tienen efecto directo en el comportamiento reológico y en gran medida son aplicados como métodos para mejorar la viscosidad de los mismos. Entre los factores involucrados en el proceso de transporte de petróleos se pueden analizar los efectos del campo electromagnético, la emulsificación, la presión, los aditivos y como factor principal la temperatura.

1.4.1 Efecto del campo electromagnético

En los fluidos con características coloidales, se manifiestan significativamente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales, que pueden ser afectados por la presencia del campo electromagnético. En los fluidos cuya distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se revelan también estos fenómenos, modificándose el equilibrio de atracción-repulsión entre partículas al desplazarse hacia la atracción, debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals (Szymula *et al.*, 2000; Balan *et al.*, 2008). Hasta el momento no se han reportado los efectos del campo electromagnético en las propiedades del fluido multifásico ecuatorial, por resultar muy costosa su aplicación práctica.

1.4.2 Efecto de la emulsificación

Los tipos más comunes de emulsiones de petróleos son aquellas en las que el aceite se dispersa en agua, en cuyo caso el sistema se conoce como emulsiones oleoacuosas o cuando el agua se dispersa en el aceite para formar emulsiones hidrooleosas (Nehal *et al.*, 1999; Momemer, 2004).

El comportamiento reológico de las emulsiones es más complicado que el de las suspensiones sólidas en líquido, ya que las partículas dispersas en las emulsiones son deformables por naturaleza. En la categoría de alta relación de aceite-agua, las emulsiones se comportan como fluidos pseudoplásticos (Laurencio y Delgado, 2008). El comportamiento reológico depende fundamentalmente del diámetro promedio de las gotas de la fase interna, así como de la concentración.

La emulsificación normalmente requiere de la presencia de un tercer componente con actividad interfacial que es adsorbido en la interfase de las gotas en la fase dispersa, denominado surfactante, este facilita la formación de la emulsión y prolonga su estabilidad. El método de formulación de emulsiones de petróleo para su aplicación en el transporte, requiere de equipamientos específicos, que de no realizarse un estudio económico adecuado se encarecería el proceso de transporte.

1.4.3 Efecto de la presión

La viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no está muy afectada para valores moderados de la presión; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, esta última, crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de estimación de la viscosidad y en general de las propiedades reológicas de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones (Hunter, 2007).

1.4.4 Efecto de los aditivos

En ocasiones, distintos tipos de aditivos, capaces de modificar la concentración real de la fase dispersa del sistema, afectan notablemente la reología de este tipo de fluidos (Balagui *et al.*, 2010; Bourbon *et al.*, 2010; Chenlo *et al.*, 2010; Colby, 2010). Además, cualquier sustancia que pueda modificar la carga superficial de la fase dispersa y por tanto su capacidad para atraerse o repelerse modifican drásticamente el comportamiento reológico de los sistemas constituidos por varias fases (Risica *et al.*, 2010).

En las mezclas de petróleo con presencia de aditivos, un papel importante, en muchos casos, lo tiene el orden del mezclado y de la adición de los componentes

de la mezcla, porque la reversibilidad o la ruptura del sistema depende mucho de la estructura que se logre al final de la preparación de la mezcla (cuando se detiene la agitación)

1.4.5 Efecto de la temperatura

En principio, el comportamiento del fluido siempre y cuando no exista ninguna reacción o proceso físico, pudiera seguir un comportamiento de acuerdo con la ley de Arrhenius. En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura (Balagui *et al.*, 2010; Bourbon *et al.*, 2010; Chenlo *et al.*, 2010; Colby, 2010); en el caso de los fluidos seudoplásticos el parámetro más afectado es el índice de consistencia másica, notándose poca incidencia en el índice de flujo (Da Silva *et al.*, 2005; Dak *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2008; Andrade *et al.*, 2009; Vandresen *et al.*, 2009).

La disminución de la viscosidad se debe a dos efectos principales (Laurencio y Delgado 2008):

- Disminución de la viscosidad del medio dispersante.
- Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

Pelaez y Stachenco (1999) plantean que por debajo del punto de enturbiamiento ciertos crudos tienen un rápido aumento de viscosidad debido a la precipitación de parafina y debilitamiento de enlace entre componentes. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de líquidos se representa mediante la ecuación 5 (Andrade *et al.*, 2009):

$$\mu = C \cdot e^{B \cdot t} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Dónde: μ = coeficiente dinámico de viscosidad; (Pa·s). t = temperatura; (°C).

C y B = constantes, cuyos valores dependen de la relación de μ y de t .

De acuerdo con la ecuación 1.4, la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura. En la práctica, la aplicación del efecto de la temperatura para la disminución de la viscosidad del combustible es el método de mayor aplicabilidad, prevaleciendo la dificultad de que la temperatura de transporte se selecciona de manera irracional.

1.5 Trabajos relacionados con el transporte de fluidos complejos por tuberías

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados a casos muy específicos, donde diferentes factores han sido analizados. Un ejemplo de estos estudios es mostrado por Nakayama *et al.* (1980) con la determinación de las caídas de presión a través de una tubería. Se comprobó la presencia de valores altos en las pérdidas de energía atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano del fluido.

En los estudios realizados por Liu y Masliyah (1998) se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; en este caso las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron con el índice de flujo, los números de Reynolds y Hedstrom.

Por otra parte, Pakrovskaya (1985) realiza un amplio estudio teórico-experimental donde se abordan temas muy importantes entre los que se destacan: características, parámetros y regímenes de transportación de hidromezclas de diferentes grados de saturación y la efectividad del transporte de fluidos bifásicos.

Se encuentra como dificultad de los cuatro trabajos anteriormente descritos, que los autores no determinan las relaciones de las propiedades reológicas en sus investigaciones; lo cual dificultaría el escalado a otras condiciones de transporte de los fluidos estudiados al no poder utilizar apropiadamente los criterios de semejanza en la extrapolación del factor de fricción, tanto para el régimen laminar como para el régimen turbulento.

Wojs (1993) al realizar estudios friccionales en tuberías lisas y rugosas con soluciones diluidas de polímeros, desarrolló una ecuación teórico-experimental que aunque concuerda adecuadamente con los resultados experimentales, su aplicación se encuentra limitada por estar el factor de fricción de Darcy implícito en la ecuación.

Ávila *et al.* (2007) plantea modelos matemáticos para el transporte hidráulico de café a través de tuberías de PVC de 88 mm. Propone una nueva ecuación con relación a la pérdida de presión que incluye el efecto de cambios en la concentración de sólidos en la mezcla. Esta ecuación permite la predicción de los gradientes de pérdida de carga para el rango experimentado de velocidades y concentración en transporte de mezcla.

Relacionado con la modelación del flujo de fluidos no newtonianos en general, Davidson *et al.* (2004) muestran un estudio teórico de algunos sistemas de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el comportamiento de ciertas clases de fluidos no newtonianos; obtienen un modelo para fluidos plásticos Bingham, pseudoplásticos y dilatantes en densidad variable, no descrito en trabajos precedentes.

Pedroso *et al.* (2000) a partir del modelo de Ostwald de Waele, obtuvieron la expresión para el cálculo de la velocidad media de transporte de un fluido y los gradientes de velocidad a que son transportadas las mieles y meladuras en un conducto, lo que permitió obtener el perfil universal de distribución de la velocidad a través de la sección de un conducto circular, en dependencia del valor del índice de flujo. Este resultado brinda la posibilidad de representar los diferentes tipos de perfiles de velocidad en el flujo laminar.

Sánchez (2002) realiza un estudio numérico de mecánica de fluidos 2D en una contracción brusca para fluidos no newtonianos tipo ley de potencia de Ostwald de Waele. Se emplean dos métodos de resolución, el método de los volúmenes finitos y el método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de momentum lineal y de continuidad. En ambos métodos se estudia el comportamiento del fluido para diferentes índices de flujo.

Entre las investigaciones relacionadas para el transporte de petróleos pesados por tuberías se pueden encontrar varios trabajos como el de Liang (1999), donde se presentó resultados comparativos de pruebas para transporte de crudo tratado magnéticamente a grandes distancias a través de oleoductos. Las pruebas se corrieron en un aparato de tratamiento magnético para varias intensidades y diferentes configuraciones del campo magnético bajo ciertas temperaturas, flujo y caída de presión. Las deducciones mostraron que los factores más importantes en el tratamiento son la temperatura y el campo magnético.

Placencia y Martínez (2000) arribaron a conclusiones significativas en el sentido de la aplicación de las propiedades reológicas de petróleos ecuatorianos al transportarse por tuberías, a pesar de no tenerse en cuenta los criterios de semejanza, importantes a la hora de extrapolar los resultados a escala industrial. En estos trabajos se realiza el estudio solamente para tuberías de una pulgada.

Resultados reportados por García (2003), muestran diferencias significativas en la predicción del gradiente de presión entre modelos homogéneos, cuya única diferencia es la forma de evaluar la viscosidad de mezcla de petróleo. Haoulo y García (2004), observaron un marcado efecto de la densidad de mezcla en el gradiente de presión debido a los cambios de energía cinética y adicionalmente evaluaron el efecto de la viscosidad del líquido en el gradiente de presión total. Sin embargo, no evaluaron el efecto de las propiedades de mezcla en el gradiente de presión total.

Mansoori (2005) describe la conducta electrocinética de ciertos crudos vinculándolos con la fluidodinámica. Plantea que cuando el crudo ingresa a la tubería se genera una diferencia de carga entre asfaltenos y los demás componentes del petróleo, creándose un campo de potencial entre la pared de la tubería y el fluido; la diferencia de potencial que se opone al movimiento del flujo multifásico. Como resultado de la diferencia de carga, las partículas tienden a contrafluir debido a la transferencia de carga, conocida como corriente de pérdida o potencial espontáneo.

Salazar *et al.* (2005) presentan un análisis teórico del problema de transporte de recortes de perforación en pozos horizontales. La solución del modelo permite evaluar el comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad, la fracción de volumen de recortes total y la relación de la altura del lecho estacionario y del diámetro de la tubería. Los resultados numéricos se compararon con datos experimentales, encontrándose una comparación satisfactoria entre los perfiles medidos y los simulados.

Haoulo *et al.* (2005) evalúan el efecto de la densidad y de la viscosidad dinámica de mezcla en la determinación del gradiente de presión longitudinal de flujo de petróleo bifásico en tuberías horizontales para un fluido pseudohomogéneo. Se evaluaron 16 ecuaciones de viscosidad de mezcla y cuatro ecuaciones de densidad de mezcla. La evaluación del desempeño de los diferentes modelos para determinar el gradiente de presión, se realiza comparando los resultados obtenidos por cada modelo con 93 datos experimentales.

Concha *et al.* (2006) proponen un modelo matemático para predecir el crecimiento de la zona de mezcla que se genera entre combustibles derivados del petróleo como consecuencia de su transporte secuencial por poliductos. La mayor dificultad para aplicar el modelo es el cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de masa, motivo por el cual se han desarrollado diferentes correlaciones empíricas para su cálculo.

García y Haoulo (2007) realizan un estudio experimental y teórico para evaluar diferentes modelos empíricos y mecanicistas utilizados comúnmente para predecir patrones de flujo bifásico de petróleo en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. Se evaluó la precisión de las predicciones de cuatro modelos mecanicistas y dos modelos de correlación utilizados comúnmente en la literatura especializada para determinar patrones de flujo. En general, los modelos seleccionados tienen un porcentaje de acierto mayor al 75 % con respecto al patrón de flujo experimental.

Mediante el estudio realizado por Frigaard *et al.* (2007) se proponen los modelos de desplazamiento por tubería de un petróleo crudo, los mismos son aplicables a

diferentes regímenes de flujo, en consideración con diferentes diámetros de tubería, lo cual amplía el campo de aplicación de los modelos para casos prácticos.

Japper *et al.* (2009) analizan el flujo de polímeros en tuberías, para el caso en estudio se determinó la relación del factor de fricción mediante la experimentación del gradiente de presión, para mezclas newtonianas y no newtonianas del tipo pseudoplásticas. Las correlaciones obtenidas fueron expresadas en función del número de Reynolds, evidenciándose ciertas desviaciones del modelo tradicional en el caso del régimen laminar, atribuidas al efecto de esfuerzos de cortes perpendiculares a la velocidad del fluido en la tubería, manifestado en los líquidos de viscosidad elevada.

Para la optimización de los sistemas de flujo de fluidos por tuberías, la función objetivo es usualmente formulada en términos de costos fijos y pocas veces se tienen en cuenta los costos de energía. Investigadores como Martínez (2007), utilizan sólo los costos de inversión durante la formulación, los cuales no representan resultados satisfactorios de optimización.

Hechavarría (2009) incluyen en la función objetivo los costos energéticos, donde los costos de inversión totales de capital incluyen además de los costos fijos, en función de los diámetros y las longitudes de las tuberías, los costos variables producto del bombeo directo. El objetivo del procedimiento es minimizar los costos anuales de capital y los costos energéticos anuales, donde los costos fijos están restringidos a los costos de inversión de las tuberías.

En tal sentido resulta significativo para el caso de fluidos no newtonianos, el trabajo de Díaz y Hechavarría (1999) realizado a partir de Skelland (1970), ambos presentan una metodología para el cálculo del diámetro óptimo de tubería, aplicable a cualquier tipo de fluido no newtoniano. Plantean que los costos debidos a tuberías y accesorios pueden representar una parte importante de la inversión total de una planta química.

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de equipos de bombeo, se han reportado numerosos resultados que contribuyen al desarrollo de esta esfera de la ciencia.

Según lo planteado por Turiño (1999); Santos y Martín (1999), sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacionales de equipos de bombeo, el método más simple para la obtención de los parámetros de funcionamiento y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el empleo de coeficientes de corrección específico para cada fluido, obtenidos por vía experimental.

La revisión bibliográfica descrita no da respuesta satisfactoria a la problemática tratada. En la mayoría de los casos se trata la fenomenología de fluidos no newtonianos, que aunque sirven de base para la investigación no describen en su totalidad el fenómeno estudiado (el transporte de fluidos a temperaturas superiores a la del ambiente y las irregularidades del flujo en régimen laminar). El planteamiento impone la necesidad de dedicar una investigación que contribuya a la mejora de la eficiencia energética en los sistemas de bombeo a partir del establecimiento de la temperatura óptima del fluido.

1.6 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 (Doron *et al.*, 1997). 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.

- 1) Correlaciones de datos empíricos, usando potencialmente un razonamiento semi-teórico como por ejemplo los resultados de Turian y Yuan (1977).

2) Desarrollo de aproximaciones teóricas basadas en una modelación fenomenológica, tal como los modelos de dos capas de Wilson (1988); Gillies *et al.* (1991) y los modelos de tres capas de Doron *et al.* (1997).

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.

Los números adimensionales principales que permiten establecer el criterio de semejanza en diferentes condiciones del flujo de fluidos (Laurencio, 2012), son:

Número de presión:

$$\left(\frac{H}{v^2} \right) = \left(\frac{\Delta p}{\frac{v^2}{2} \cdot \rho} \right) \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Dónde: H = altura de presión; (m). v = velocidad media del fluido; (m/s). Δp = diferencia de presión; (Pa). ρ = densidad; (kg/m³).

Número generalizado de Reynolds para fluidos pseudoplásticos y dilatantes (Garcell, 2001), el que se describe por (ecuación 1.6):

$$\text{Re}^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Dónde: n = índice de flujo; (adimensional). D = diámetro de la tubería; (m). K = índice de consistencia másica; (Pa·s).

Estos números se suelen ordenar en la forma siguiente (ecuación 1.7):

$$\left(\frac{H}{v^2} \right) = k_1 \cdot \left(\frac{k_0}{D} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^{k_3} \cdot (\text{Re}^*)^{k_4} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Dónde: k_1, k_2, k_3, k_4 = coeficientes de ajuste del modelo. k_0 = rugosidad de la tubería; (m).

Esta expresión evidencia el efecto del escalado al variar las dimensiones de la tubería y condiciones de transporte del fluido, la cual se puede reducir a la ecuación de Darcy-Weibach (ecuación 1.8):

$$\left(\frac{H}{\frac{v^2}{2 \cdot g}} \right) = \lambda \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Dónde: λ = coeficiente de fricción por rozamiento del fluido; (adimensional).
 L = longitud de la tubería; (m).

$$\lambda = k_1 \cdot \left(\frac{k_0}{D} \right)^a \cdot (\text{Re}^*)^c \quad \text{Ecuación 1.9}$$

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos o gráficas propuestas para tal propósito (Gardea, 2008). La información que existe en este sentido, ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y los trabajos que se han realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Ibarz *et al.*, 2001; Vélez, 2003), no relacionan el intercambio térmico y el efecto de mezclado en el transporte del fluido.

De forma similar Darby (2001), tratan el factor de fricción de Fanning (f_F) (para este caso $f = \lambda/4$) mediante la gráfica obtenida por Dodge y Metzner para fluidos que se ajustan a la ley de potencia, en la cual se incluyó el flujo laminar con mezcla.

Según Martínez y Linares (2001) el coeficiente de fricción para el manejo de fluidos pseudoplásticos se puede ajustar a la ecuación 1.10, obtenida por Manssur y Rajie (1988):

$$\lambda^* = \psi \cdot (\text{Re}^* \cdot n) \cdot e^{\beta \cdot (\text{Re}^* \cdot n)} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

En la que los parámetros ψ y β son coeficientes determinados experimentalmente.

Este modelo no incluye los efectos de la rugosidad de la tubería (e/d) para la determinación del coeficiente de fricción de fluidos no newtonianos, lo cual limita su aplicación.

Para el caso de tuberías rugosas, Wojs (1993) propone la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\lambda^*} = A \log \left[\left(\frac{B}{\text{Re}^* \lambda^{*\frac{1-n}{2}}} \right) + \frac{(e/d)}{\alpha} \right] \quad \text{Ecuación 1.11}$$

La ecuación anterior, según plantea su autor, fue derivada del modelo de ley de potencia y generalizada para soluciones diluidas de polímeros, cuya concentración y peso molecular están contenidos en los parámetros A y B , los que son determinados experimentalmente.

1.7 Flujo tecnológico y aplicación del transporte de combustibles por tuberías

El bloque 31 se encuentra ubicado en la provincia de Orellana, actualmente cuenta con dos plataformas de producción Apaika (APK) y Nenke (NNK). La producción de la plataforma de Apaika, al cierre de diciembre del 2015 fue de 19538 bbls de gross (2329.72 m³), al cierre de marzo del 2016 la producción fue de 26010 bbls de gross (3101.35 m³). El fluido extraído es bombeado, con una de las 3 bombas multifásicas instaladas en dicha locación con una presión de salida al alrededor de 505 PSI (3481852 Pa); aproximadamente a 5.2 km de ésta, se suma la producción extraída de la plataforma de Nenke mediante 2 derivaciones de Ø6" (0.1524 m) y Ø10" (0.254 m) impulsada directamente por las bombas electrosumergibles, al cierre de diciembre del 2015 la producción fue de 9761 bbls de gross (1163.91

m³), al cierre de marzo del 2016 la producción alcanzó los 45805 bbls de gross (5461.81 m³), éstos fluidos son transportados por medio de una tubería de Ø18" (0.4572 m) recorriendo aproximadamente 26,3 km hasta la estación central de bombeo (ECB), sitio en el cual se tiene una caída de presión alrededor de 55 PSI (379211.7 Pa), en este punto a un futuro no muy lejano, se unirá el fluido extraído del bloque 43.

Desde ECB por medio de una tubería de Ø24" (0.6096 m), la producción de las plataformas antes mencionadas (Apaika, Nenke) llega a las facilidades de producción de Edén (EPF) para su procesamiento tras recorrer 32.5 km, con una caída de presión alrededor de 35 PSI (241316.5 Pa) y una pérdida de temperatura total alrededor de 30 °F (-1.11 °C).

Para incrementar la temperatura del fluido multifásico para el procesamiento, el fluido arribado, sale del recibidor ST-50118B y pasa a unos mezcladores (*Mixers*) para mezclarse con el agua de producción de los T-2005 y T-2006 que tienen una mayor temperatura, éste fluido mezclado entra al separador V-50120 que es donde se inicia el proceso de separación del petróleo crudo, el petróleo semitratado del separador, pasa a dos intercambiadores de calor de aceite térmico que está recirculando en un circuito cerrado y que éste es calentado por los gases de escape de los motogeneradores de combustión interna, el cual por transferencia de calor del aceite eleva la temperatura del petróleo.

1.7.1 Ventajas del transporte por sistemas de tuberías

El transporte por tuberías tiene una gran aplicación en las industrias y en el laboreo de minas; además, en la industria metalúrgica tiene efectividad para la transportación de concentrados de materiales no ferrosos, carbón, petróleo, gas, materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos (Trapeznikov, 2011).

En la actualidad, en las industrias petroleras, se utilizan diversas formas de transportación, cobrando mayor auge el transporte por tuberías, debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte.

La efectividad del transporte por tuberías progresa principalmente por la aplicabilidad y la posibilidad de simplificar la longitud de la vía según las características del relieve, y se logra una productividad anual de la instalación superior a otros sistemas de transporte. El transporte por tuberías posee significativas ventajas en comparación con el transporte ferroviario, automotriz y marítimo, tales como:

- Garantiza un proceso tecnológico continuo con la disminución considerable del volumen de las operaciones principales.
- Facilidad en la variación de la dirección y superación de obstáculos.
- Ausencia de vías de transporte especiales.
- Eleva la productividad del trabajo.
- Poca necesidad en servicio de personal.
- Posibilita la automatización de todo el proceso de transportación.
- No existen pérdidas del material durante su transportación.
- Las instalaciones y equipos principales son de pequeño tamaño y de poco peso.
- El material puede ser beneficiado simultáneamente durante su transportación.

La desventaja principal de este tipo de transporte se debe a los gastos elevados de energía, asociados a la operación fuera de los parámetros racionales y deposición de sedimentos en las tuberías. Estas desventajas son compensadas con las disímiles ventajas que se ofrecen en el caso de transportar combustibles pesados con el establecimiento de sus parámetros racionales de flujo.

Las investigaciones dentro del transporte por tuberías, específicamente del desplazamiento de flujos líquidos, se han desarrollado en tres direcciones fundamentales (Laurencio, 2012):

- Trabajos experimentales con la posterior generalización de los resultados.

- Trabajos teóricos, donde se trata de hallar la expresión matemática y la aplicación física de los procesos que tienen lugar cuando se trasladan fluidos.
- Trabajos que buscan el enlace de la teoría con los resultados prácticos.

1.8 Conceptos relacionados a la investigación

Con el propósito de orientar definir la investigación a la propuesta se conceptualizan los principales términos que se aplican (Legrá, 2015):

Procedimiento: Es un conjunto de acciones físicas o mentales, naturales o artificiales, flexibles, organizadas y con algún nivel de dirección que permite llevar a cabo (ejecutar) actividades que conducen a la consecución de un objetivo.

Técnicas: Son procedimientos operativos rigurosos, bien definidos, transmisibles y susceptibles de ser aplicados repetidas veces en las mismas condiciones. Forman parte de los Métodos como protagonistas del trabajo de recolección, proceso y análisis de datos. Generalmente (pero no obligatoriamente) las técnicas están relacionadas con el uso de instrumentos y herramientas. Algunas técnicas llegan a adquirir la categoría de método.

Método: Es un conjunto fundamentado de acciones mentales o físicas para conseguir un propósito en ciertos entornos de trabajo. El método es el principio unificador de la teoría y la práctica.

Metodología: Es la ciencia que estudia al método (Ciencia del Método). Está formada por aquellos resultados y conclusiones teóricas obtenidas del estudio de leyes o esencias de “orden superior” que tienen un significado metodológico, al ser aplicados a leyes o esencias de “orden inferior”. Es un sistema de conocimientos que indica (mediante conceptos, leyes, orientaciones, procedimientos y técnicas) como desarrollar de manera eficaz y eficiente determinado proceso para alcanzar los resultados deseados, estableciendo un adecuado sistema de acciones para estructurar dicho proceso.

Como relaciona el concepto anterior, queda argumentado en que momento de la propuesta se refiere a cada término, argumentándose el por qué la propuesta en una metodología.

1.9 Marco legal referente a la investigación

Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. (2012). En la Constitución de la República del Ecuador dispone: “ Los yacimientos de hidrocarburos y sustancias que los acompañan, en cualquier estado físico en que se encuentren situados en el territorio nacional, incluyendo las zonas cubiertas por las aguas del mar territorial, pertenecen al patrimonio inalienable e imprescriptible del Estado. Y su explotación se ceñirá a los lineamientos del desarrollo sustentable y de la protección y conservación del medio ambiente”

Dentro de los artículos fundamentales se encuentran:

Art. 1.- Los yacimientos de hidrocarburos y sustancias que los acompañan, en cualquier estado físico en que se encuentren situados en el territorio nacional, incluyendo las zonas cubiertas por las aguas del mar territorial, pertenecen al patrimonio inalienable e imprescriptible del Estado.

Y su explotación se ceñirá a los lineamientos del desarrollo sustentable y de la protección y conservación del medio ambiente.

Art. 9.- El Ministro Sectorial es el funcionario encargado de formular la política de hidrocarburos aprobados por el Presidente de la República, así como de la aplicación de la presente Ley. Está facultado para organizar en su Ministerio los Departamentos Técnicos y Administrativos que fueren necesarios y proveerlos de los elementos adecuados para desempeñar sus funciones.

La industria petrolera es una actividad altamente especializada, por lo que será normada por la Agencia de Regulación y Control. Esta normatividad comprenderá lo concerniente a la prospección, exploración, explotación, refinación, industrialización, almacenamiento, transporte y comercialización de los hidrocarburos y de sus derivados, en el ámbito de su competencia.

Art. 11.- Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH).- Créase la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, ARCH, como organismo técnico-administrativo, encargado de regular, controlar y fiscalizar las actividades técnicas y operacionales en las diferentes fases de la industria hidrocarburífera, que realicen las empresas públicas o privadas, nacionales, extranjeras, empresas mixtas, consorcios, asociaciones, u otras formas contractuales y demás personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras que ejecuten actividades hidrocarburíferas en el Ecuador.

Art. 93-D.- El Estado velará porque la actividad petrolera no provoque daños a las personas, a la propiedad ni al medio ambiente. Periódicamente se procederá a realizar auditorías socio - ambientales.

1.10 Conclusiones del capítulo

- En la literatura citada, se hace referencia general al estudio de las propiedades reológicas y de flujo de suspensiones acuosas con partículas, pulpas minerales, polímeros, combustibles pesados, extrapesados y emulsiones; encontrándose poca información sobre estos aspectos para las mezclas de combustibles ecuatorianos.
- La esencia física del proceso de flujo por tuberías del combustible ecuatoriano es poco conocida, a esto se añaden las imprecisiones de las teorías científicas existentes para la predicción del gradiente de presión en los sistemas de tuberías, teniendo en cuenta variaciones de temperaturas y mezclado durante el transporte del fluido.
- Es insuficiente la información acerca del establecimiento de los parámetros racionales de transporte del combustible ecuatoriano a través de tuberías; de ahí la necesidad del estudio teórico y experimental de este sistema en particular.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

Los conocimientos teóricos acerca del comportamiento y propiedades de transporte del combustible ecuatoriano, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados a la evaluación energética de los sistemas de transporte por tuberías; en tal sentido los objetivos del capítulo se sintetizan en:

- Establecer la investigación teórica y métodos que posibilitan describir las propiedades y comportamiento de flujo del combustible ecuatoriano.
- Describir las diferentes técnicas experimentales a utilizar en la investigación.

2.1 Modalidad de la investigación

Las investigaciones apropiadas para el desarrollo de este proyecto fueron las siguientes:

Bibliográfica.- Porque el proyecto contiene información obtenida de fuentes bibliográficas actualizadas y especializadas así como de documentos fiables (manuales de equipos del fabricante).

De campo.- Porque se acudió al lugar donde se producen los hechos para obtener información confiable y confrontarlo con la realidad técnica.

Experimental.- Por la utilización de ciertas variables independientes para observar los efectos en las respectivas variables dependientes. El propósito es precisar la relación causa - efecto.

Modalidad Especial - Proyecto Factible.- Porque se plantea una propuesta técnica de solución al problema investigado, lo cual comprende el desarrollo de una metodología, para la obtención del régimen de temperatura óptima para el proceso de bombeo del fluido multifásico para separación a diferentes cargas.

2.2 Descripción del objeto de estudio

Petroamazonas EP ha previsto el desarrollo del bloque 31 mediante la inclusión de dos nuevas plataformas Apaika y Nenke. La primera fase del proyecto contempló

únicamente la producción de Apaika y en la segunda fase el ingreso de la plataforma Nenke. El objetivo es enviar toda la producción del bloque 31 a las nuevas instalaciones existentes en las facilidades de procesamiento EPF (Bloque 12) para su tratamiento, mediante un ducto de 58.8 km de longitud conformado por dos tramos; APK-ECB (26.3 km) de Ø18”, y ECB-EPF (32.5 km) de Ø24”.

Las facilidades de recepción y tratamiento están conformadas por los siguientes sistemas (figura 2.1):

- Sistema de recepción compuesto por trampa recibidora.
- Sistema de regulación de presión de fluido compuesto por válvulas reguladoras de presión.
- Sistema de calentamiento de fluido mediante mezcla directa con agua de producción conformado por mezcladores.
- Sistema de separación constituido por un separador de producción.
- Sistema de intercambio de calor crudo – aceite térmico

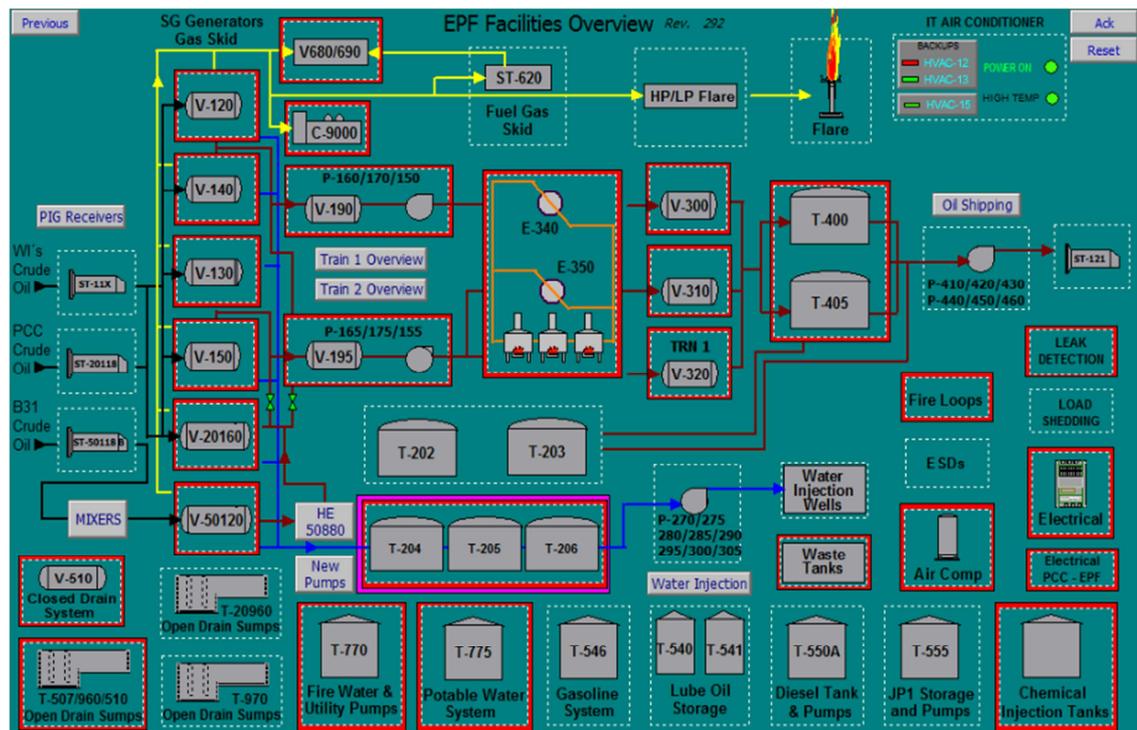


Figura 2.1 HMI Planta de Procesos.

Fuente: HMI Procesos EPF- B12

El objeto de estudio se resume en 58,8 km de longitud de tuberías conductoras, donde el fluido multifásico pierde temperatura al llegar a la planta de proceso en EPF y con mayor viscosidad, para lo cual se requiere incrementar la temperatura perdida, mediante transferencia de calor.

Posterior a un estudio técnico, con la finalidad de ayudar a la deshidratación y ponerlo en condiciones de exportación, se implementó el calentamiento del fluido del bloque 31 en EPF, contemplado en dos etapas; 1) calentamiento del fluido a la entrada del proceso (previo ingreso al separador V-50120), y 2) calentamiento en la fase crudo aguas abajo del separador, para este caso se pretende obtener ahorros en Petróleo Equivalente.

Primera etapa de calentamiento

Inicialmente se preveía que la producción de Apaika y Nenke llegue al EPF con una temperatura inferior a 65,5 °C, por tal razón; se optó por mezclar con agua caliente de producción a 82,2 °C. Este calentamiento se realiza en mezcladores estáticos con agua del sistema de inyección de agua que se toma de los tanques de almacenamiento. Cuando la temperatura del fluido de producción sea igual o mayor a 65,5 °C no será necesario la operación del sistema de calentamiento mencionado.

Segunda etapa de calentamiento

El fluido que sale del separador necesita ser calentado hasta una temperatura de 82,2 °C (figura 2.2) para poder ingresar a la segunda fase del sistema de deshidratación para lo cual se calienta el fluido con un intercambiador de calor crudo – aceite térmico (Sistema de *Hot Oil*).

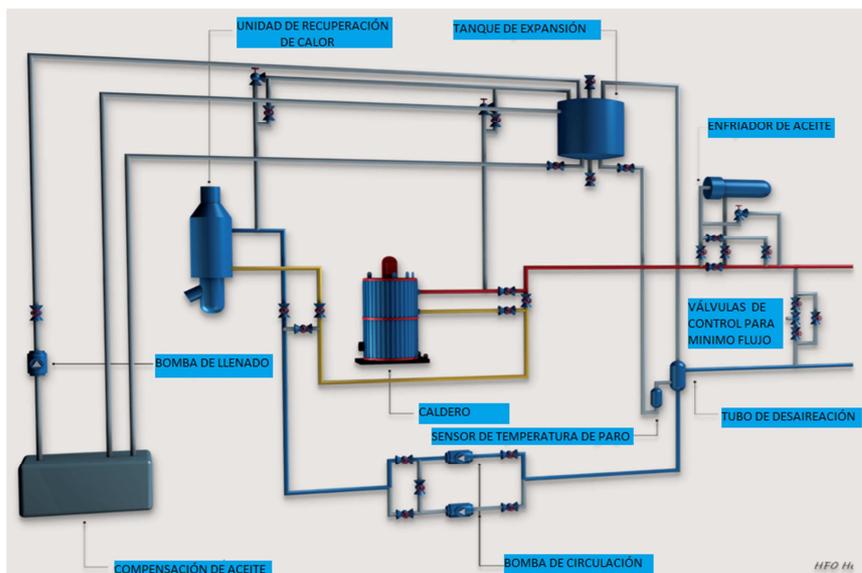


Figura 2.2 Esquema del proceso de calentamiento de aceite térmico.

Fuente: *Presentación de socialización del Proyecto de recuperación de calor EPF*

2.2.1 Sistema de calentamiento de aceite térmico

Esta alternativa permite calentar el crudo de la salida de los separadores, mediante un sistema de recirculación de aceite térmico (Therminol 66).

Los equipos que conforman el sistema son:

- Tanque de expansión, el que fue dimensionado teniendo en cuenta el volumen de expansión.
- Bombas de recirculación de aceite térmico; se considera el flujo máximo del aceite térmico para calentar el flujo de mayor producción y una caída de presión de 365,4 kPa en el sistema.
- Calentadores de aceite térmico, unidades recuperadoras de calor que aprovecha los gases de escape de motores Wartsila 18V32GD.
- Intercambiadores de calor de tubo y coraza, tipo BFU, donde se realiza el intercambio de calor crudo-aceite caliente. El flujo de diseño máximo a calentar es 133916 con un 20 % de sedimento y agua (BS&W).
- Se considera un intercambiador tubo y coraza. Cuya corriente caliente es el aceite térmico (*Therminol 66*) y la corriente fría es el crudo.

Tabla 2.1 Corrientes de entrada al intercambiador

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: Alcoser, J., *Ingeniería de Integración para la Ampliación de Facilidades en el EPF para el B31*. (Doc. 31B016-EPF-10-EST-002). Tecna, 2012.

2.2.2 Características de los equipos de bombeo empleados

El sistema de bombeo de aceite térmico opera con una bomba, manteniendo otra de reserva, su rango de flujo es 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, la que se indica en la figura 2.3.

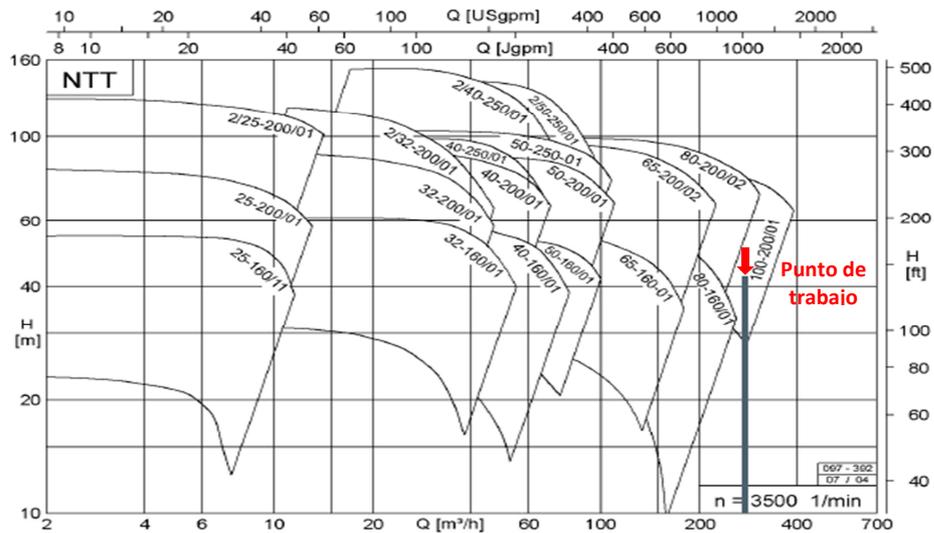


Figura 2.3 Punto de trabajo de las bombas del sistema Hot Oil.

Fuente: Manual del fabricante ALLWEILER. Bombas serie NTT

2.3 Declaración de variables del proceso

En el campo Edén Yuturi, el fluido multifásico bombeado desde las locaciones remotas es tratado mediante el proceso de deshidratación, ésta producción

conforma la producción total del B12 y B31, en la cual una parte de ésta se aprovecha como combustible para la generación de electricidad.

La eficiencia del sistema de bombeo, así como la separación y calidad final del producto del B31, dependen de la temperatura a la cual es transportado y de la temperatura del procesamiento. Para esto se define como variables, las siguientes:

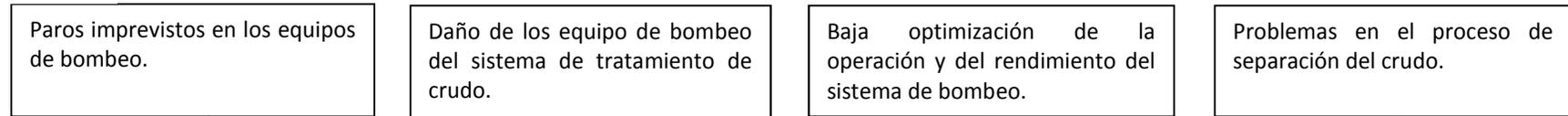
Variable independiente: Parámetros de operación del fluido multifásico.

Variable dependiente: Eficiencia energética en el proceso de bombeo.

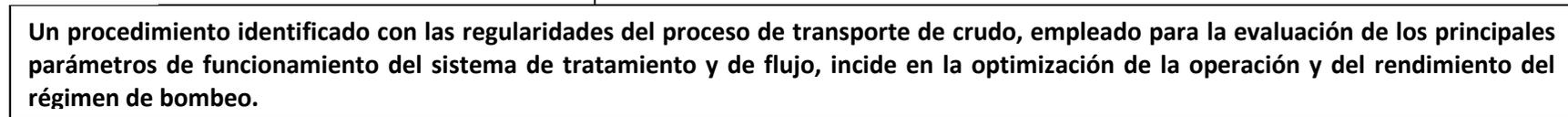
La interacción entre éstas se operacionaliza mediante la relación causas y efectos, mostrados en el esquema de la figura 2.4.

DIAGRAMA CAUSA – EFECTO

Efectos



Problema



Causas

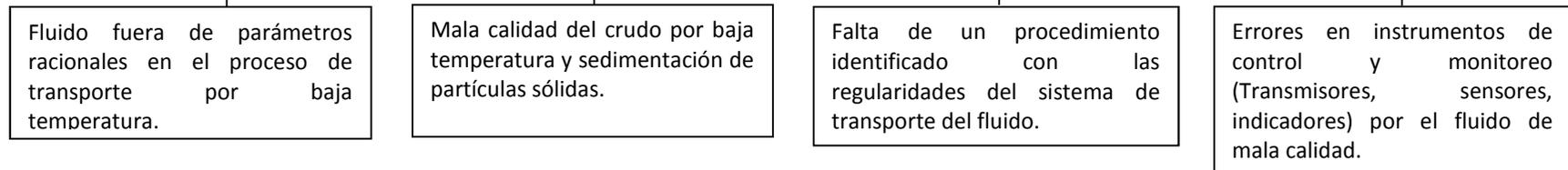


Figura 2.4 Diagrama causa – efecto

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Causa relevante: Falta de un procedimiento identificado con las regularidades del sistema de transporte del fluido.

Efecto relevante: Baja optimización de la operación y del rendimiento del sistema de bombeo.

2.3.1 Matriz de operacionalización de variables

El proceso de operacionalización se inicia con la definición de las variables en función de los factores estrictamente medibles a los que se les llama indicadores.

Mediante la definición conceptual de las variables se rompe el concepto difuso que ella engloba y así se le da sentido concreto dentro de la investigación, en función de ello se procesa a realizar la definición operacional de la misma para identificar los indicadores que permitirán realizar su medición de forma empírica y cuantitativa, al igual que cualitativamente (tabla 2.2).

Tabla 2.2 *Matriz de operacionalización de variables*

Variable Independiente: Parámetros de operación del fluido multifásico.

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítems	Técnicas	Instrumentos
<p>Parámetro.- Valor numérico o dato fijo que se considera en el estudio o análisis de una cuestión. También se conoce como parámetro, al dato que se considera como imprescindible y orientativo para lograr evaluar o valorar una determinada situación.</p>	Variables operacionales	Presión	Pa	Medición	PIT
		Temperatura	°C	Medición	TIT
		Flujo volumétrico	m ³ /s	Medición	FIT
		Densidad	kg/m ²	Medición	Densímetro
		Viscosidad	Pa.s	Medición	Viscosímetro
	Valoración y datos	Valor bajo	Menor óptimo	Cálculo	Ecuaciones
		Valor alto	Superior óptimo	Cálculo	Ecuaciones

Variable Dependiente: Eficiencia energética en el proceso de bombeo

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
<p>Optimización.- Es el proceso de encontrar los mínimos y máximos de una función. También se podría decir que es la mejor manera de realizar una actividad.</p> <p>Rendimiento.- Es el producto o utilidad/beneficio que rinde algo.</p>	Eficiencia energética	Costo de Operación	\$	Cálculo	Ecuaciones
		Reducción de mantenimientos correctivos	%	Software	Base de datos mro Máximo
		Ahorro económico	\$	Medición	Medidor Ecuaciones
		Disponibilidad del equipo	%	Cálculo	Ecuaciones

La eficiencia energética es un concepto asociado a la optimización de los recursos energéticos para alcanzar los objetivos económicos de la empresa. Se mide a través de indicadores de eficiencia energética.	Confiabilidad	IC	%	Software	Ecuaciones
		Ahorro de energía	kW	kW	Ecuaciones
		Costo de Operación	\$	\$	Ecuaciones

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

2.4 Gradiente de presión en tuberías conductoras de fluidos multifásicos

Las expresiones más difundidas en la literatura para el régimen laminar, las cuales relacionan los parámetros antes señalados, presentan ciertas limitaciones que se manifiestan en desviaciones de su predicción en los sistemas de flujo con diámetros relativamente grandes (Laurencio *et al.*, 2011). Es por ello que se hace evidente la necesidad de determinar expresiones y métodos apropiados para la evaluación del transporte de petróleo.

El modelo teórico-experimental para el transporte del combustible se selecciona a partir del uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, de momentum y de energía, considerándose los efectos de los esfuerzos de mezclado entre capas de flujo (Laurencio 2012). Para el análisis de los esfuerzos que intervienen en el flujo del combustible por la tubería, se muestra una sección de tubería inclinada con movimiento del fluido hacia arriba y un ángulo (θ) desde la posición horizontal, según se indica en la figura 2.5.

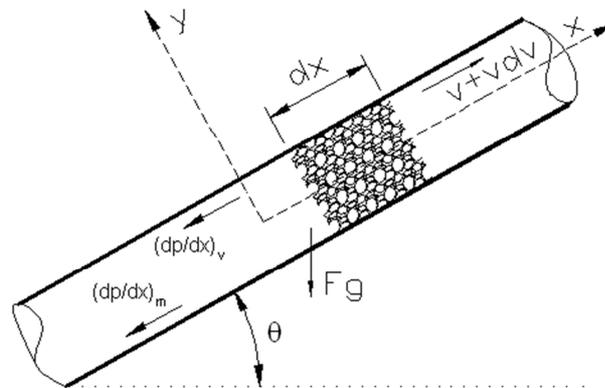


Figura 2.5 Esquema estructural utilizado en la obtención del modelo.

Fuente: *Laurencio (2012)*.

Al modelo de flujo homogéneo referenciado por Haoulo *et al.* (2005), para este caso se le adicionó el gradiente de presión causado por el mezclado entre capas de flujo en la tubería ($(dp/dx)_m$). Las ecuaciones básicas de conservación de masa y de momentum del modelo homogéneo para flujo en tuberías con la modificación propuestas se expresa como:

Continuidad:

$$\frac{d}{dx} \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Momentum:

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dx} - \frac{P \cdot \tau_p}{A} - \left(\frac{dp}{dx} \right)_m - \rho \cdot g \cdot \text{sen} \theta \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde: A = área de la sección transversal; (m^2). P = perímetro de la tubería; (m). θ = ángulo de inclinación de la tubería; (grados sexagesimales). dp/dx = gradiente de presión en la dirección del flujo; (Pa/m). τ_p = esfuerzo de corte en la pared de la tubería; (Pa). g = aceleración de gravedad; (m/s^2). $(dp/dx)_m$ = gradiente de presión adicional en la tubería, (Pa/m).

El gradiente de presión adicional $[(dp/dx)_m]$ es causado por el efecto de mezclado entre las capas de flujo, incrementándose este efecto en el régimen turbulento y en tuberías de diámetros relativamente grande (incremento del recorrido radial de las partículas en la tubería).

Al desarrollar el lado izquierdo de la ecuación 2.2, las derivadas totales también llamadas derivadas materiales, son:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Al trabajar con un flujo permanente, la derivada parcial de la velocidad con respecto al tiempo se anula, lo que resulta:

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Sustituyendo la ecuación 2.4 en 2.2 y presentándola como una ecuación explícita en términos del gradiente de presión, se tiene que:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{P \cdot \tau_p}{A} + \left(\frac{dp}{dx}\right)_m + \rho \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} + \rho \cdot g \cdot \text{sen}\theta. \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En la ecuación 2.5, el gradiente de presión longitudinal total en la tubería se divide en cuatro componentes:

$$\frac{dp}{dx} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_v + \left(\frac{dp}{dx}\right)_m + \left(\frac{dp}{dx}\right)_a + \left(\frac{dp}{dx}\right)_G. \quad \text{Ecuación 2.6}$$

El primer componente $[(dp/dx)_v]$ es el gradiente de presión en la tubería debido al esfuerzo viscoso del fluido, es costumbre asumir a este como la pérdida de carga total de la tubería. Se propone la ecuación para el gradiente de presión debido al esfuerzo de corte viscoso entre el fluido y la pared de la tubería, dada por:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_v = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2}\right)^n \cdot \left(\frac{2}{D}\right)^{n+1} \cdot Q^n. \quad \text{Ecuación 2.7}$$

El segundo componente $[(dp/dx)_m]$ es el gradiente de presión adicional por efectos de mezclado entre las capas de flujo en la tubería, que puede estimarse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, ajustada mediante el factor de fricción adicional (λ^*).

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_m = \lambda^* \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho. \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Dónde: λ^* = coeficiente de fricción por rozamiento adicional del fluido; (adimensional).

En este caso λ^* representará los efectos adicionales del gradiente de presión en régimen laminar, manifestados con mayor incidencia en tuberías de gran diámetro (efecto de mezcla entre capas del flujo que no es contemplado por la ecuación 2.7), el que debe determinarse por experimentación, correlacionándolo con el número de Reynolds generalizado (Re^*), (ecuación 1.6).

$$\lambda^* = \frac{0,14}{\text{Re}^{*0,2}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Al sustituir la ecuación 2.9 en la 2.8 y expresándola en función del flujo volumétrico (Q), resulta:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_m = \frac{0,14}{\text{Re}^{*0,2}} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

El tercer componente $[(dp/dx)_a]$ es el gradiente de presión debido a los cambios de densidad por variaciones de temperaturas en el fluido durante su transporte, considerado por Laurencio (2012) para el cambio de propiedades de fluidos con mezclado bifásico.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_a = \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Dónde: ρ_f y ρ_i = son las densidades final e inicial del combustible durante el transporte por las tuberías cuando existe enfriamiento; (kg/m^3). L = longitud de la tubería; (m).

La ecuación 2.11, es función de la densidad y se debe tener en cuenta para el flujo con intercambio térmico, en el caso que las variaciones de temperatura sean significativas; para variaciones pequeñas de densidad el término puede ser despreciable.

El cuarto componente $[(dp/dx)_G]$ es debido a los cambios de energía potencial como consecuencia de los cambios de pendiente en la tubería (ecuación 2.12). En el caso de tuberías horizontales este gradiente de presión se hace cero.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_G = \rho \cdot g \cdot \text{sen}\theta \quad \text{Ecuación 2.12}$$

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:

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

Ecuación 2.13

2.5 Expresiones para la determinación de pérdidas de presión por resistencias locales

Los trabajos realizados por Darby (2001), tanto en flujo laminar como turbulento, con materiales seudoplásticos y plásticos Bingham, demuestran que las pérdidas por fricción ocasionadas por el flujo de estos fluidos a través de accesorios y válvulas son prácticamente similares a las obtenidas con los fluidos newtonianos.

Aplicando la ecuación 1.7 para la estimación de las pérdidas de presión por resistencias locales se plantea la expresión:

$$\Delta p_{loc} = \xi_{loc} \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Siendo: ξ_{loc} = coeficiente de fricción de pérdidas locales; (adimensional).

Para el cálculo del coeficiente de fricción de pérdidas locales en los codos, Darby (2001) propone el método llamado 2K; aplicable a fluidos seudoplásticos se plantea de la siguiente manera:

$$\xi_{loc} = \frac{Km}{\text{Re}^*} + Kn \quad \text{Ecuación 2.15}$$

A partir de los resultados de Darby (2001) para codos estándar ($r/D = 1$), donde la longitud del codo es: $L_{codo} = 1,57 \cdot D$, se tiene el modelo que describe la caída de presión en el codo para fluido con comportamiento seudoplástico, dada por la relación:

$$\Delta p_{codo} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{850}{Re^*} + \frac{0,199}{D^{0,22}} \right] \cdot v^2 \cdot \rho \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Si los datos se necesitan en forma de longitudes equivalentes (L_{eq}), se sumarán todas esas longitudes equivalentes correspondientes a todos los accesorios y se le añadirá a la longitud total de la tubería (Laurencio, 2012).

$$L_{eq.codo} = \left(\frac{n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{850}{Re^*} + \frac{0,199}{D^{0,22}} \right) \cdot \frac{\rho}{4 \cdot K} \cdot v^{2-n} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Para la estimación de las pérdidas de presión en válvulas de globo y de compuerta, durante el flujo de fluidos pseudoplásticos, se proponen las siguientes correlaciones según Banerjee *et al.* (1994):

Para válvulas de compuerta:

$$\Delta p_{loc} = 1,905 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot Re^{*-0,917 \cdot \delta - 1,98} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Para válvulas de globo:

$$\Delta p_{loc} = 8,266 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot Re^{*-0,610 \cdot \delta - 0,797} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Dónde: δ = posición de apertura de las válvulas; (%).

2.6 Expresiones para la determinación de costos y potencia hidráulica de transporte

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.

Son característicos en la formulación del problema de racionalización del transporte de fluidos, el costo atribuible a las tuberías (costos fijos) y el costo energético en cuanto a costos de explotación (costos variables) (Martínez *et al.*, 2007; Hechavarría, 2009). El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante la siguiente ecuación (Laurencio, 2012):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

Dónde: 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). η_b = rendimiento de la bomba; (adimensional). η_m = rendimiento del motor eléctrico; (adimensional).

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

$$N_h = Q \cdot \Delta p \quad \text{Ecuación 2.21}$$

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

La potencia hidráulica, para el transporte de un fluido pseudoplástico, está dada por la combinación de la ecuación 2.12 y la 2.21, donde se obtiene que:

$$N_h = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot Q}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \cdot Q$$

Ecuación 2.22

Mediante la ecuación 2.22, se determina la potencia que se necesita para transportar un fluido del tipo pseudoplástico.

El rendimiento del conjunto bomba-motor queda expresado por la ecuación:

$$\eta_{isnt.} = \frac{\left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot Q}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \cdot Q}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

Ecuación 2.23

Esta expresión puede utilizarse como herramienta para la evaluación preliminar del rendimiento de una instalación de bombeo, al obtenerse mediante su empleo el rendimiento total del conjunto bomba-motor. Según Martínez *et al.*, 2007, para el análisis energético de la instalación, este criterio puede resultar muy útil sobre todo si se simula su solución mediante softwares adecuados.

Los costos asociados a las tuberías pueden representar una parte importante de la inversión total. En el caso del costo de la instalación de tubería se recomienda la expresión:

$$C_F = \frac{C_{tub}^* + C_{mant}}{V_u} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Dónde: C_F = costo fijo de la red de tuberías; (\$/año·m). C_{tub}^* = costo específico de la tubería; (\$/m). $C_{mat.}$ = costo de mantenimiento de la tubería; (\$/m). V_u = vida útil de la tubería; (año).

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 (Laurencio, 2012):

$$C_{cal} = C_b \cdot m_{at} \cdot t_t \cdot 3600 \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Dónde: C_{cal} = costo por calentamiento del fluido multifásico; (\$/año). C_b = costo de bombeo del aceite térmico. (\$/kg). m_{at} = flujo másico de aceite; (kg/s).

El flujo másico del aceite térmico se obtiene mediante la correlación con el incremento de la temperatura del combustible, a partir de datos experimentales relacionados con el tipo de intercambiador de calor utilizado; los mismos se ajustan a la ecuación 2.26.

$$\dot{m}_{at} = k_t \cdot (\Delta t) \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Dónde: Δt = diferencia de temperatura del combustible a la entrada y la salida del intercambiador de calor; ($^{\circ}\text{C}$). k_t = coeficiente de proporcionalidad del intercambiador de calor; el cual se obtiene por experimentación.

2.7 Modelo de la variación de temperatura del fluido en la tubería

Con el objetivo de conocer las variaciones de temperatura durante el transporte del fluido multifásico, se toma en consideración la modelación teniendo en cuenta las configuraciones de las tuberías (figura 2.6), 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.

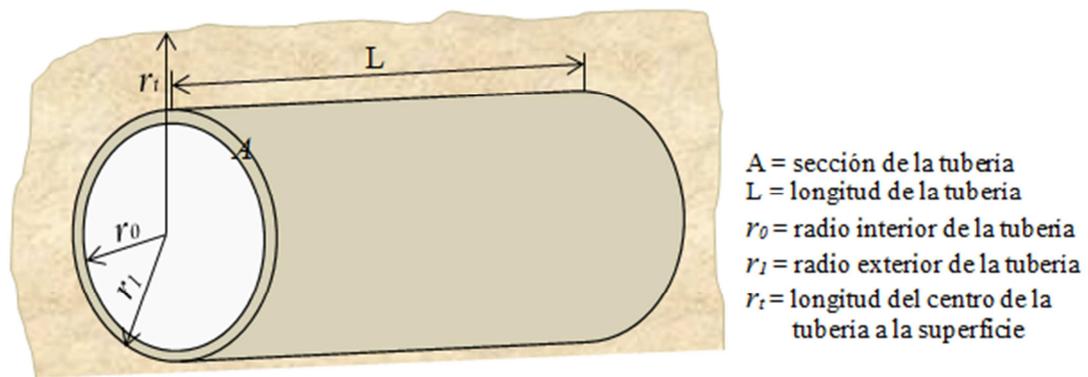


Figura 2.6 Radios de la sección transversal de la tubería de transporte.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Del balance de energía para la tubería (figura 2.5), se obtienen las ecuaciones de conducción para las tres resistencias, donde el calor transferido del interior al exterior del conducto será:

$$q_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot L(t_i - t_e)}{\frac{1}{r_0 \cdot h_c} + \frac{1}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{k_B} \cdot \ln\left(\frac{r_t}{r_1}\right)} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Dónde: h_c = coeficiente de convección del fluido; ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). t_i = temperatura del fluido en el interior de la tubería; ($^\circ\text{C}$). t_e = temperatura exterior del terreno; ($^\circ\text{C}$). L = longitud de la tubería; (m). r_0 = radio interior de la tubería; (m). r_1 = radio exterior de la tubería; (m). r_t = Longitud desde el centro de la tubería a la superficie; (m). k_A = coeficiente de conductividad térmica de la tubería (anexo 1, tabla 1a); ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$). k_B = coeficiente de conductividad térmica de la tierra; (anexo 1, tabla 1b) ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$).

El coeficiente de convección para fluido multifásico, tanto en convección forzada como natural, se determina por la expresión propuesta por Laurencio (2012).

$$h_c = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

Dónde: Pr = número de Prandtl; (adimensional). D = diámetro de la tubería; (m). k_p = coeficiente de conductividad térmica del hidrocarburo; ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$).

El número de Prandtl, que describe la característica termofísica del agente portador de calor (Trapeznikov, 2011), se determina mediante la ecuación:

$$\text{Pr} = \frac{\mu_a \cdot c_p}{k} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Dónde: c_p = capacidad calorífica; ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$).

Para determinar la variación de temperatura en el conducto se utiliza la expresión 2.30, propuesta por Laurencio (2012).

$$t_f - t_i = \frac{q_s}{Q_p \cdot \rho_p \cdot c_{pp}} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

Dónde: c_{pp} = capacidad calorífica del combustible; ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$). Q_p = flujo volumétrico del combustible; (m^3/s). t_f = temperatura final del combustible; ($^\circ\text{C}$). t_i = temperatura inicial del combustible; ($^\circ\text{C}$). L = longitud de la tubería; (m).

Al combinar la ecuación 2.30 con la 2.28 y 2.27 se obtiene la ecuación de variación de temperatura aplicable al transporte del combustible pesados por tuberías.

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_i - t_e)}{Q_c \cdot \rho_c \cdot C_{pc} \left[\frac{1}{r_0 \cdot 0,023 \cdot \text{Re}_p^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D}} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{K_B} \cdot \ln\left(\frac{r_i}{r_1}\right) \right]}$$

Ecuación 2.31

El empleo de este modelo (ecuación 2.31), facilita determinar las variaciones de temperaturas del fluido al ser transportado por tuberías, y posibilita conocer si estas variaciones son significativas.

2.8 Técnicas experimentales utilizadas e Instrumentos

Las técnicas constituyen el conjunto de mecanismos, medios o recursos dirigidos a recolectar, conservar, analizar y transmitir los datos de los fenómenos sobre los cuales se investiga.

- **Obtención de los parámetros reológicos.**

Los resultados del estudio reológico del fluido de petróleo multifásico, se obtuvieron mediante el procedimiento de viscosidad y esfuerzo cortante, donde se determinó la relación del esfuerzo de corte (τ) en función del gradiente de velocidad (γ), mediante el uso del reómetro de marca Brookfield (código del equipo EQ-SDF-07), donde se coloca 16 ml de muestra del crudo, en correspondencia con las temperaturas y condiciones más frecuentes de su transporte por tuberías, según el procedimiento ASTM D 445-96.

- **Número de corridas experimentales.**

Para los niveles de temperaturas programadas, el número de corridas experimentales se determina en correspondencia con lo planteado en la literatura (Laurencio y Delgado, 2008) y los valores prefijados por el viscosímetro;

tomándose nueve niveles del gradiente de velocidad y cinco niveles de temperatura, para tres réplicas de cada experimento.

- **Obtención de las principales propiedades termofísicas y químicas.**

Los resultados de las principales propiedades termofísicas y químicas del combustible se obtuvieron en el laboratorio analítico Centro de Investigaciones Quito.

En la tabla 2.3 se muestran los principales equipos e instrumentos utilizados.

Tabla 2.3 *Equipos utilizados en ensayos de laboratorio.*

ENSAYO	EQUIPO	MARCA	DESCRIPCIÓN	FOTOGRAFÍA
AGUA POR DESTILACIÓN	Manta de calentamiento	Electrothermal	Equipo que permite calentar la mezcla crudo + xileno hasta el punto de ebullición del agua	
	Trampa de agua	Wildmad Glass	Material en el cual se va almacenado y contabilizando la cantidad de agua recuperada en el proceso de destilación	
	Balón de destilación	Wildmad Glass	Material en donde se coloca la mezcla de Crudo + Xileno y se somete a calentamiento	
	Refrigerante	Wildmad Glass	Sirve para enfriar los condensados y los mismos caigan en la trampa de agua para cuantificar la cantidad de agua que tiene la muestra	
SÓLIDOS POR EXTRACCIÓN	Plancha de calentamiento	Thermo Scientific	Equipo que permite calentar al tolueno hasta su punto de ebullición	
	Condensador	Koehler	En este circula agua fría que permite condensar los vapores de tolueno para producir el lavado del dedal	

	Dedal de extracción	Koehler	Recipiente en donde se coloca la muestra de crudo	
	Canasta	Koehler	Material que soporta el dedal y evita que el mismo entre en contacto directamente con el tolueno	
	Estufa	ESCO	Equipo en donde se secan a 110°C los dedales luego de la extracción	
	Balanza Analítica	Cole Parmer	Sirve para determinar el peso del dedal vacío y luego de la extracción. Tiene una resolución de 0.0001 g	
CONTENIDO DE AZUFRE DEL CRUDO	Espectrofotómetro de Rayos x	Horiba	Permite determinar la concentración de azufre que posee una muestra de crudo	
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	Baño de Viscosidad	Koehler	Permite adecuar la muestra de crudo a la temperatura a la que se quiere realizar el ensayo. El baño está lleno de agua destilada	

	Termómetro RTD	Control Company	Termómetro con resolución de 0.01 °C con el cual se determina la temperatura a la que se encuentra en baño	
	Cronómetro	Thomas Scientific	Se utiliza para determinar el tiempo que tarda en fluir la muestra en el capilar de viscosidad	
	Capilar de viscosidad	Cannon Fenske	Material en donde se coloca la muestra y se determina el tiempo que tarda en recorrer cada bulbo para posteriormente realizar al cálculo de la viscosidad cinemática	
DENSIDAD API	Hidrómetro de 19 a 31 °API	LSW	Este material flota en la sustancia y mediante la escala que tiene permite determinar la densidad API del fluido	
	Termohigrómetro	Control Company		

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Para la determinación de estas características mediante la experimentación se aplicaron los siguientes procedimientos:

- Procedimiento ASTM D 240-92. Método estándar para determinar el valor calórico superior, el valor calórico inferior y la capacidad calorífica.
- Procedimiento ASTM D 287-92. Método estándar para determinar la densidad y la gravedad en °API del petróleo crudo y sus productos.
- Procedimiento IP 143-90. Método estándar para determinar asfaltenos (Insolubles en n-heptano).
- Procedimiento ASTM D 129-95. Método estándar para determinar azufre en productos del petróleo (Método general de la bomba),
- Procedimiento ASTM D 95-83 (Reaprobada en 1990). Método estándar para determinar agua por destilación en productos del petróleo y materiales bituminosos.
- Procedimiento ASTM D 189-95. Método estándar para determinar contenido de carbón conradson en productos del petróleo.
- Procedimiento ASTM D 1548-92. Determinación de vanadio en fuel oil pesado,
- Procedimiento ASTM D 93-96. Método estándar para determinar punto de inflamación empleando el equipo de Persky-Martens (cápsula cerrada).

La investigación de los parámetros de transportación se realizó en el intervalo de temperaturas de 66 a 95 °C, tomadas de forma aleatoria. Los datos para la simulación del modelo del gradiente de temperaturas fueron obtenidos para los diámetros 0,457 y 0,610 m.

2.8.1 Instrumentación utilizada.

Las instalaciones cuentan con una instrumentación de control y monitoreo adecuada y calibrada; (transmisores, flujómetros, manómetros, termómetros y vacuómetros, entre otros). (Anexo 2. Instrumentos de medición)

2.8.2 Sistema de adquisición de datos

En la investigación de los parámetros de temperatura adecuada de transportación se analizó la instalación de bombeo del fluido multifásico del campo Edén Yuturi. La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos Factory Talk de Allen Bradley (figura 2.7).

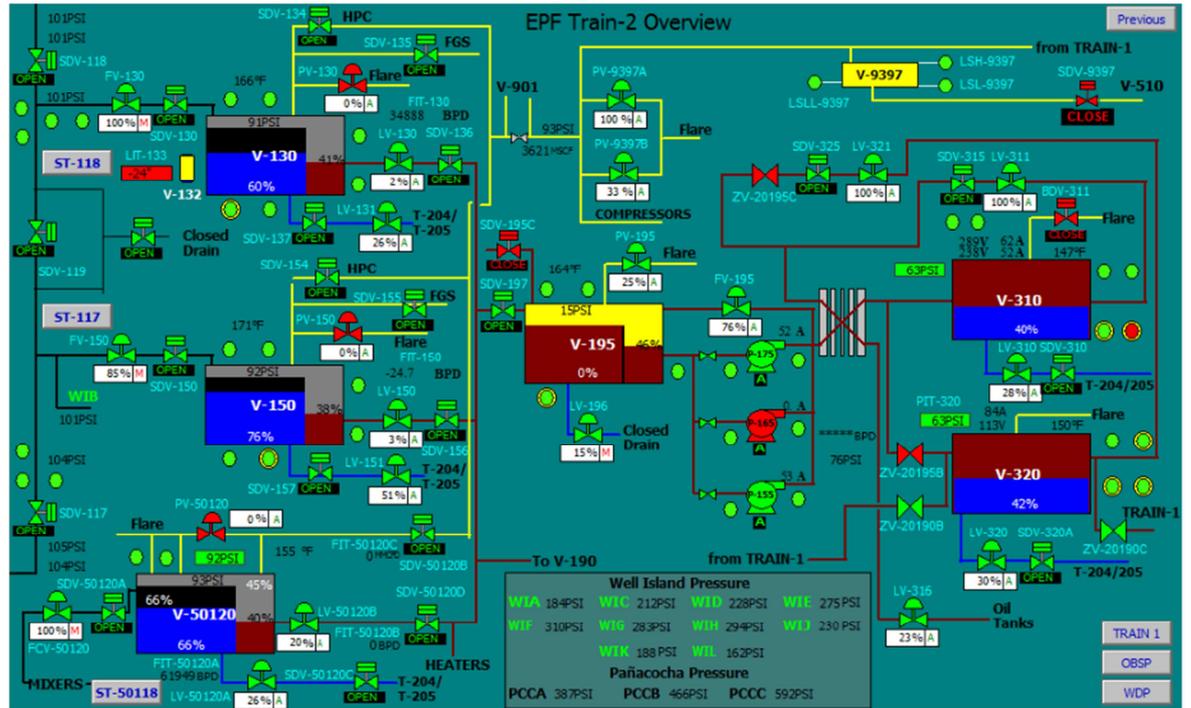


Figura 2.7 Sistema de adquisición de datos.

Fuente: HMI Procesos EPF- B12

La confirmación de la validez de los valores experimentales con los de los modelos, o sea, la diferencia entre el módulo del valor experimental “ X_{exp} ” y el valor teórico “ X_{teo} ” obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento, se reafirma mediante la siguiente ecuación. El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{exp} - X_{teo}}{X_{exp}} \right| \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2.32}$$

En la literatura se hace un examen de los errores y sus posibles fuentes, se especifican los valores satisfactorios de desviación en cálculos de ingeniería, pues en cada error influyen los siguientes factores:

Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser de menor precisión.

- Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- Los valores experimentales son promedios de las réplicas.

2.9 Conclusiones del capítulo

- Los modelos matemáticos del gradiente de presión y la potencia hidráulica de transporte por tuberías, propuestos para la simulación operacional con fluidos pseudoplásticos; se han planteado tomando en consideración el efecto de mezclado, el cambio de densidad del fluido, el efecto viscoso y el efecto de la energía potencial.
- El sistema de ecuaciones propuesto para la simulación del transporte del fluido multifásico y la obtención de temperaturas óptima de bombeo, tiene en consideración los siguientes aspectos: parámetros de rendimiento de la bomba y el motor; variación de la velocidad de transportación; variación del diámetro de la tubería; cambios de las propiedades del fluido en función de la temperatura.
- Quedan expuestas las técnicas experimentales y los métodos que se emplean en la investigación de las propiedades de transporte del fluido y la obtención de parámetros racionales de flujo por tuberías.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los estudios experimentales de las propiedades de transporte del fluido multifásico, posibilitan la confirmación de aplicación de modelos determinados para la obtención de parámetros óptimos de operación y bombeo. El método de correlación, aplicado en parte de los resultados del trabajo, tiene una aplicabilidad universal para conjuntos de datos de toda clase en procesos físicos.

Estas correlaciones empíricas tienen implícito el comportamiento real del fenómeno en estudio, sin embargo, su precisión es adecuada si se utilizan dentro del intervalo de aplicación en el cual fueron desarrolladas. Relacionado con este planteamiento, se proponen como objetivos del capítulo:

- Analizar la dependencia entre los factores influyentes en el comportamiento de las propiedades de transporte por tuberías del fluido multifásico extraído.
- Determinar los comportamientos de operación de la instalación de bombeo del fluido multifásico y su el sistema de calentamiento.

3.1 Características fisicoquímicas del fluido multifásico

En la tabla 3.1 se muestran los principales parámetros característicos del fluido multifásico, obtenidos a partir de los procedimientos planteados en el capítulo 2. Los resultados mostrados, justifican la utilización de las mediciones de presión y temperaturas registradas en la base de datos para diferentes flujos volumétricos.

Tabla 3.1 *Características fisicoquímicas del fluido multifásico de hidrocarburo*

Componente	Unidad	25-Jun 2014	24-Jul 2014	8-Aug 2014	05-Oct 2014	14-Abr 2015	Valor medio
Fe	ppm	4,5	3,7	3,2	4,2	3	3,720
Mn	ppm	0,374	0,397	0,461	0,241	0,08	0,311
Residual fosfonato	ppm	26	25	31	28	30	28,000
Calcio	ppm	343	280	293	226	112	250,800
Cloruros	ppm	8225	7900	7650	6500	5200	7095,000
H ₂ S (agua)	ppm	0,112	0,035	0,008	0,085	0,07	0,062
CO ₂ (agua)	ppm	208	310	214	225	480	287,400
H ₂ S (gas)	ppm	240	95	280	35	420	214,000
CO ₂ (gas)	%	12	7	6	8	8	8,200

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Para las muestras tomadas se analizaron los principales componentes desde 25 de junio del 2014 hasta el 14 de abril del 2015, como se muestra en la tabla 3.1, la mayor componente del fluido son los cloruros, con una concentración media de 7095 ppm, seguidos del calcio y el residual fosfonato. Este resultado demuestra la importancia del tratamiento previo que se debe dar al fluido para ser utilizado como combustible para generación.

3.1.1 Resultados experimentales del comportamiento reológico del fluido multifásico

Mediante la descripción e interpretación del comportamiento reológico del fluido multifásico crudo, se da un adecuado uso práctico en relación con sus parámetros de flujo al ser transportado este a través de las tuberías. El modelado de las propiedades reológicas de estos fluidos ha sido hasta ahora una tarea no abordada, principalmente por la variabilidad y la presencia de diversas fases en su composición. La obtención de los resultados implicó modelos experimentales, además de la obtención de un modelo específico en la interpretación del efecto de la temperatura y el gradiente de velocidad sobre la viscosidad.

A partir del estudio reológico, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.2; en la misma se recoge la dependencia entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad para las temperaturas experimentadas. Con los resultados experimentales, se construyeron las curvas de flujo mediante el empleo de software (MatLab y el tabulador Microsoft Excel 2007), donde se identificaron los parámetros del modelo matemático que relaciona el esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, así como su coeficiente de correlación.

Tabla 3.2 Resultados obtenidos del estudio reológico.

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

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Al representar gráficamente los datos experimentales de τ en función de $\dot{\gamma}$, se trazaron las curvas de flujo (figura 3.1), las mismas permiten realizar el ajuste de los datos mostrados en la tabla 3.2.

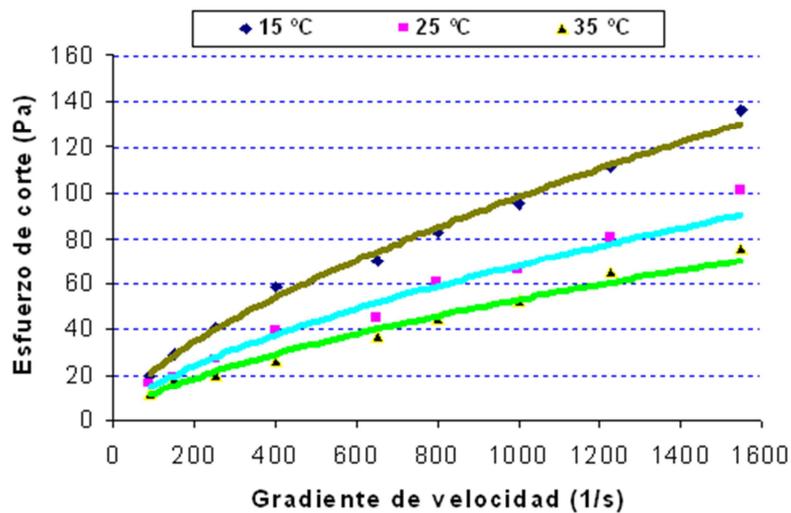


Figura 3.1 Curvas de flujo del fluido multifásico en función de la temperatura.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

En la figura 3.1 se observa que para el rango de temperaturas desde 15 °C hasta 35 °C, el fluido mostró el mejor ajuste para el modelo de fluido pseudoplástico, relacionado este comportamiento a que en los fluidos emulsionados con varias fases, las gotas dispersas son deformables por naturaleza. El comportamiento manifestado, está caracterizado por los parámetros reológicos, índice de

consistencia másica (K) e índice de flujo (n). En cuanto a los parámetros reológicos, fue posible identificar la tendencia respecto a la dependencia de cada factor con la temperatura. Los modelos ajustados para cada temperatura se exponen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 *Correlaciones de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad*

Temperatura	Modelo ajustado
15 °C	$\tau_{x,y} = 1,134 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,646}$
25 °C	$\tau_{x,y} = 0,819 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,640}$
35 °C	$\tau_{x,y} = 0,626 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,643}$

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

En la tabla 3.4, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico.

Tabla 3.4 *Parámetros reológicos obtenidos y coeficiente de correlación múltiple*

No	Parámetros	Temperatura		
		15 °C	25 °C	35 °C
1	K(Pa·s)	1,134	0,819	0,626
2	n(adim)	0,646	0,640	0,643
3	R²	0,998	0,981	0,982

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

El coeficiente de correlación múltiple (R^2) en todos los casos fue superior a 0,998; por lo que se considera satisfactorio el ajuste de los modelos a los datos experimentales, indicativo de que se experimenta un fluido estable. Con el empleo de los resultados mostrados en la tabla 3.4 y sustituyéndolos en la ecuación 1.3, se graficó el comportamiento de la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad (figura 3.2). Los resultados obtenidos posibilitan visualizar el grado de variabilidad de la viscosidad aparente ante variaciones de la temperatura y el

gradiente de velocidad, observándose en todo caso un comportamiento no newtoniano.

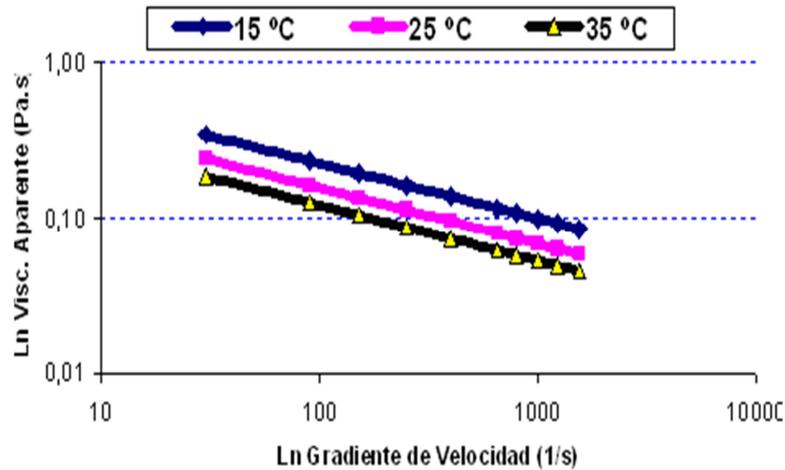


Figura 3.2 Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

En la figura 3.2 se resalta que la viscosidad aparente del fluido disminuye de forma potencial con el aumento de la temperatura. En la misma se puede apreciar que para los menores valores del gradiente de velocidad se manifiesta un mayor cambio de la viscosidad, asociado a cambios de estructuración en el comportamiento de las partículas dispersas en el combustible. Los resultados obtenidos justifican la necesidad de conocer los parámetros reológicos del fluido multifásico para diseñar y evaluar su sistema de transporte, aspecto muy importante al trabajar con este tipo de fluido.

3.2 Análisis de la influencia de la temperatura en las propiedades del fluido multifásico

Al aumentar la temperatura, se observó que los valores del índice de consistencia másica disminuyeron (figura 3.3). El índice de flujo mostró variaciones poco significativas, con el valor promedio de 0,64.

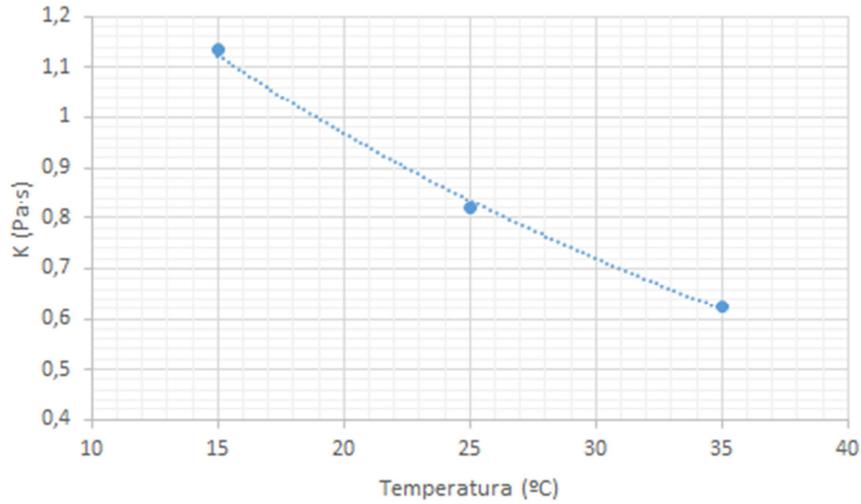


Figura 3.3 Comportamiento de índice de consistencia másica en función de la temperatura.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Realizando el ajuste del comportamiento del índice de consistencia másica (K) a la ley exponencial, se obtuvo la correlación en función de la temperatura (ecuación 3.1) con un coeficiente de correlación múltiple de 0,97. El resultado obtenido (ecuación 3.1) permitió establecer el comportamiento de la viscosidad aparente, a partir de las variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad.

$$K = 1,75 \cdot e^{(-0,03 \cdot t)} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

La función obtenida (ecuación 3.1) posibilita simular el comportamiento del índice de consistencia másica (K) al variar la temperatura (t), teniendo como recomendación que la misma es válida sólo para las condiciones experimentales en la que fue ajustada.

Al sustituir la ecuación 3.1 en la ecuación 1.3, e 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.

$$\mu_a = \frac{1,75}{e^{0,003t}} \cdot \left(\dot{\gamma} \right)^{-0,36} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Mediante el modelo anterior (ecuación 3.2), es posible definir la viscosidad aparente del fluido durante su transporte por tuberías; relacionado con la correcta predicción de la viscosidad al ser un fluido no newtoniano. 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.

Para variaciones de la temperatura la densidad manifestó un comportamiento decreciente con tendencia logarítmica, según indica la figura 3.4.

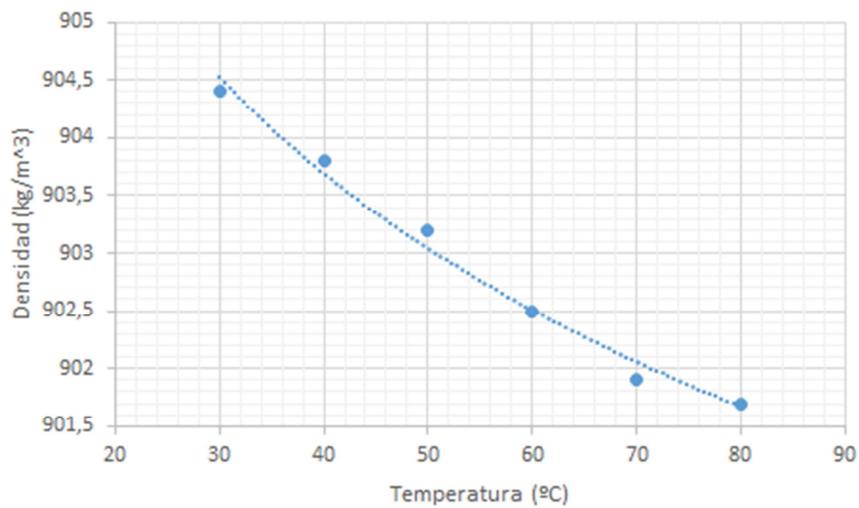


Figura 3.4 *Correlación entre la densidad del combustible y la temperatura.*

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

A partir de los resultados mostrados en la figura 3.4, se correlacionó el comportamiento de la densidad del fluido en función de la temperatura, determinándose según la ecuación 3.3, obtenida con un coeficiente de correlación múltiple de 0,989.

$$\rho = -2,91 \cdot \ln(t) + 914,4 \quad . \quad . \quad . \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Dónde: ρ = densidad del combustible; (kg/m³). t = temperatura a la que se desea conocer la densidad; (°C).

De la misma manera se exponen el comportamiento de los valores de la capacidad calorífica a presión constante y la conductividad térmica (figura 3.5 y figura 3.6).

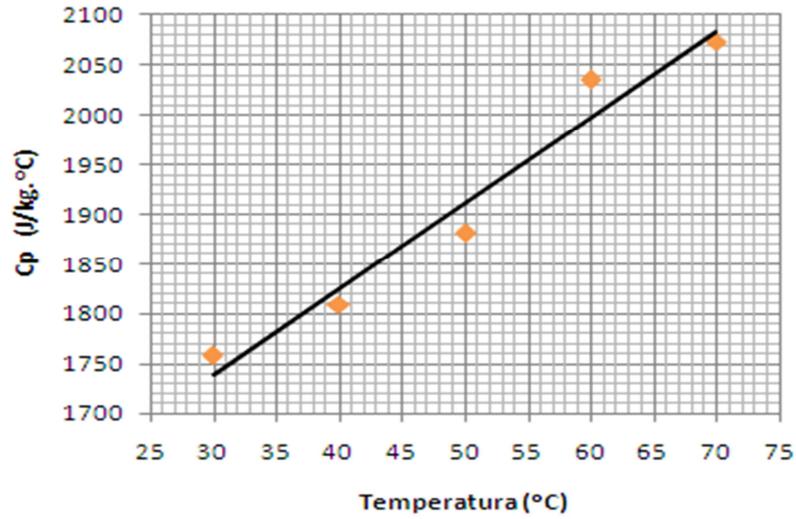


Figura 3.5 Correlación entre la capacidad calorífica del combustible y la temperatura.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

Para los valores experimentados de la capacidad calorífica del fluido se observó una tendencia creciente, para la cual se obtiene la ecuación 3.4 con un coeficiente de correlación múltiple de 0,96.

$$c_p = 8,56 \cdot t + 1483 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

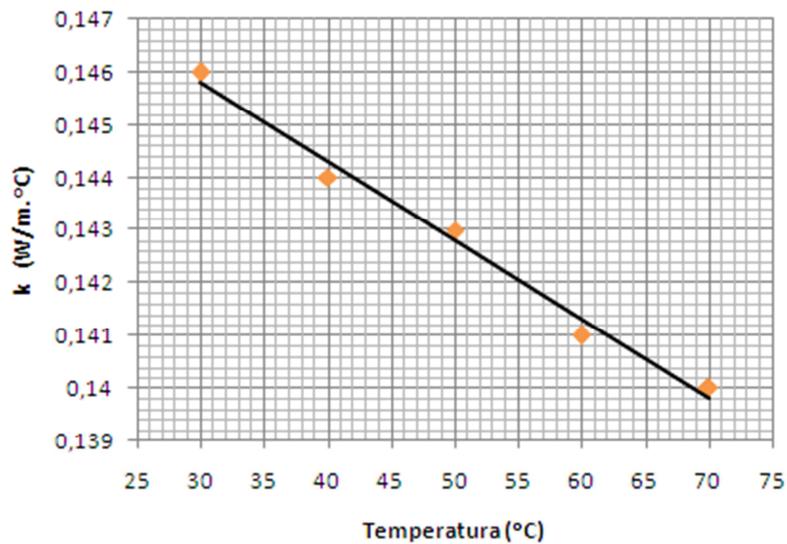


Figura 3.6 Correlación entre la conductividad térmica del combustible y la temperatura.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

Según la tendencia de los puntos experimentales la conductividad térmica se puede predecir mediante la ecuación 3.5, la misma es ajustada para un coeficiente de correlación de 0,982. 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.

$$k = (-0,13 \cdot t + 149,1) \cdot 10^{-3} \quad . \quad . \quad . \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Las ecuaciones obtenidas se representan con el objetivo de describir la variabilidad de las características termofísicas del fluido durante el proceso de transporte por tuberías. 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.

3.3 Análisis del comportamiento de la variación de temperatura en la tubería

En este trabajo, la validación del modelo propuesto en el capítulo 2, para la determinación de las variaciones de temperatura en las tuberías, se realiza comparando los resultados experimentales obtenidos de variación de temperatura del fluido en la instalación del campo Edén Yuturi, el que se muestra en la figura 3.7

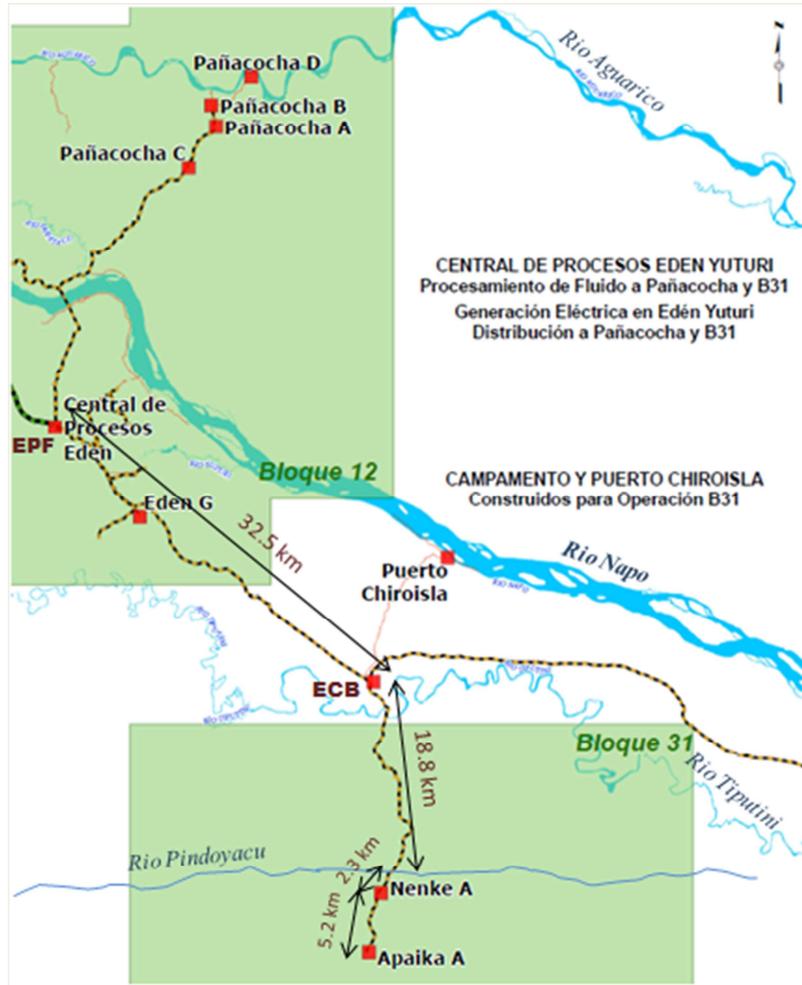


Figura 3.7 Sistema de ductos para transporte del fluido multifásico.

Fuente: Geoportal Petroamazonas (Intranet. <http://gpp/GeoPAM/default.aspx>)

De los sistemas mostrados en la figura 3.7, se encuentran en operación las conexiones de Apaika hasta Nenke, Nenke hasta ECB, y ECB hasta la Central de procesos. En la tabla 3.5 se relacionan los parámetros de operación del sistema de transporte.

Tabla 3.5 Datos del sistema de transporte de Apaika a EPF.

Tramo	Longitud de tubería (m)	Diámetro de tubería (m)	Flujo volumétrico (m ³ /s)
Apaika-Nenke	5200	0,4572	0,0355
Nenke-ECB	21100	0,4572	0,0958
ECB-EPF	32500	0,6096	0,0958

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

Como argumentación de los datos de la tabla anterior, se muestra que desde Apaika se bombea $0,0355 \text{ m}^3/\text{s}$ de fluido multifásico hasta Nenke, donde se incorporan $0,0603 \text{ m}^3/\text{s}$, acumulando un total de $0,0958 \text{ m}^3/\text{s}$, enviados a EPF; en la tabla 3.6 se dan las especificaciones técnicas de las tuberías.

Tabla 3.6 *Especificaciones técnicas de los ductos de recolección del Bloque 31.*

Ducto Tramo	Diámetro (m)	Espesor (m)	Material Tubería	Recubrimiento Externo	Recubrimiento Interno
APK-ECB	0,4572	0,0103	API 5L GR X65	FBE 12 – 16 mils	Ninguno
ECB-EPF	0,6096	0,0127	API 5L GR X65	FBE 12 – 16 mils	Ninguno

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Se escoge dicho modelo por ser representativo del proceso, e integra los modelos que describen las características termofísicas y la pérdida total de calor. Se calculan los errores relativos entre los resultados experimentales y los teóricos, teniendo como criterio de aceptación que el error relativo sea inferior al 10 %.

El objetivo radica en comprobar el modelo, donde se tuvo en cuenta la temperatura inicial (t_i) y la temperatura exterior promedio (t_e), así como los radios de la tubería. Se determinó el coeficiente de convección del fluido multifásico a partir del comportamiento de las propiedades del fluido para la temperatura de cada punto de cambio de flujo y diámetro de tubería (tabla 3.7); también se consideró la conductividad térmica de los materiales donde se logró como resultado la relación de variación de temperatura para la comprobación del modelo con los datos experimentales.

Tabla 3.7 *Parámetros característicos del fluido en las tuberías.*

Tramo	T_{inicial} (°C)	ρ (kg/m³)	k (W/m·°C)	c_p (J/kg·°C)	K (Pa·s)	μ_a (Pa·s)	Re	Pr
APK-NNK	95,0	901,1	0,137	2296,2	0,101	0,063	1306,7	1052,6
NNK-ECB	93,0	901,2	0,137	2279,1	0,107	0,047	4748,0	774,5
ECB-EPF	87,0	901,4	0,138	2227,7	0,129	0,076	2180,5	1229,6

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Para obtener las variaciones de temperatura de campo, se realizó un muestreo en la instalación. Los valores de flujo de calor y variación de temperatura se obtuvieron mediante el empleo de los modelos propuestos en el capítulo 2, según se indica en la tabla 3.8. Para la variabilidad de los datos, se procede a la determinación del error de predicción del modelo.

Tabla 3.8 *Comparación de las variaciones de la temperatura en la tubería.*

Tramo	q (W)	ΔT (°C)	$t_{f \text{ mod.}}$ (°C)	$t_{f \text{ Exp.}}$ (°C)	Error (%)
APK-NNK	166530,05	2,27	92,73	89	1,02
NNK-ECB	1123096,58	5,71	87,29	86	0,36
ECB-EPF	3569073,96	18,55	68,45	66	0,72

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

La tabla 3.8 muestra las diferencias de temperatura para los tramos de tuberías y los tres flujos volumétricos de operación de cada tramo, con los errores calculados en grados Kelvin. Al comprobar el modelo del gradiente de temperatura en la tubería de transporte del fluido multifásico, en ninguno de los casos el error sobrepasó el 1,03 %, lo que explica la proximidad de la simulación con los valores observados.

Se puede afirmar que la adecuación del modelo propuesto es aceptable para la comprobación y obtención del comportamiento de la temperatura en las tuberías de transporte del fluido multifásico.

3.3.1 Análisis de la variación de la temperatura del fluido multifásico en la tubería

Para determinar la variación de la temperatura del fluido crudo multifásico en la tubería conductora, según el modelo propuesto (ecuación 2.31), se tuvo en cuenta la temperatura inicial de trasiego y la temperatura promedio del terreno y la humedad, para una profundidad promedio de 1 m, por encontrarse estas soterradas. Se determinó el coeficiente de convección del fluido para las condiciones del transporte, también se consideró la conductividad térmica de la tubería principal, se tuvo en cuenta el flujo volumétrico del fluido multifásico

trasegado y sus propiedades termofísicas, donde se obtuvo como resultado la relación de variación de temperatura en el oleoducto, para las diferentes especificaciones. La distribución de temperatura para cada tramo de tuberías se muestra en la figura 3.8, simulada en función de la longitud.

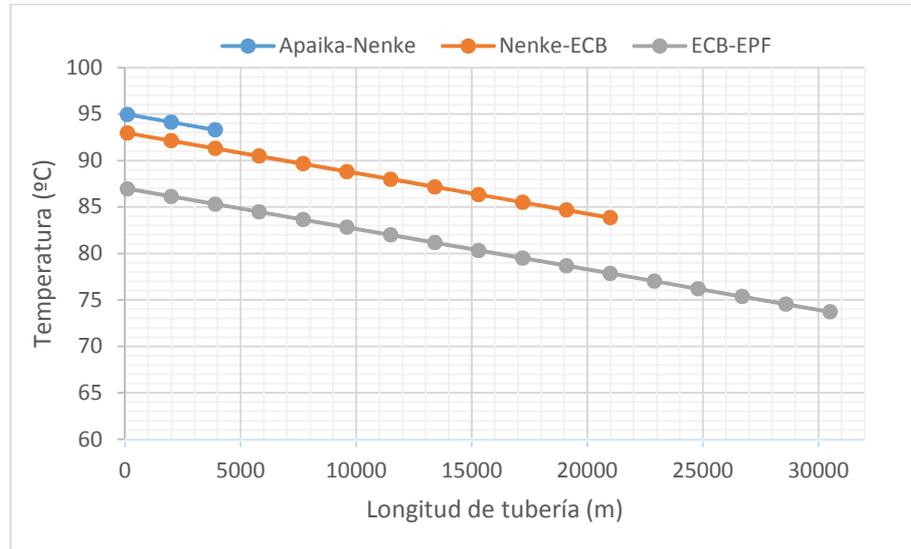


Figura 3.8 *Distribución de temperatura simulada por cada tramo.*

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Como se muestra en la figura, para los tres tramos, la temperatura va decreciendo con tendencia lineal, manifestándose una variación considerable de temperatura debido a las pérdidas de calor, como resultado de la interacción con el medio. Esto demuestra la necesidad de recalentar el fluido por tramos, evitando el aumento de la viscosidad y las pérdidas de presión.

3.4 Análisis del modelo del gradiente de presión

La determinación del comportamiento del gradiente de presión (ecuación 2.12), se realiza a partir de conocer las propiedades reológicas del fluido multifásico, donde se garantiza la adecuación del modelo que describe el proceso de transporte según las características del sistema. Para el análisis se obtuvieron los comportamientos de las propiedades del fluido en función de la distribución de temperatura en las tuberías. El parámetro reológico, índice de consistencia másica (K) se representa en la figura 3.9.

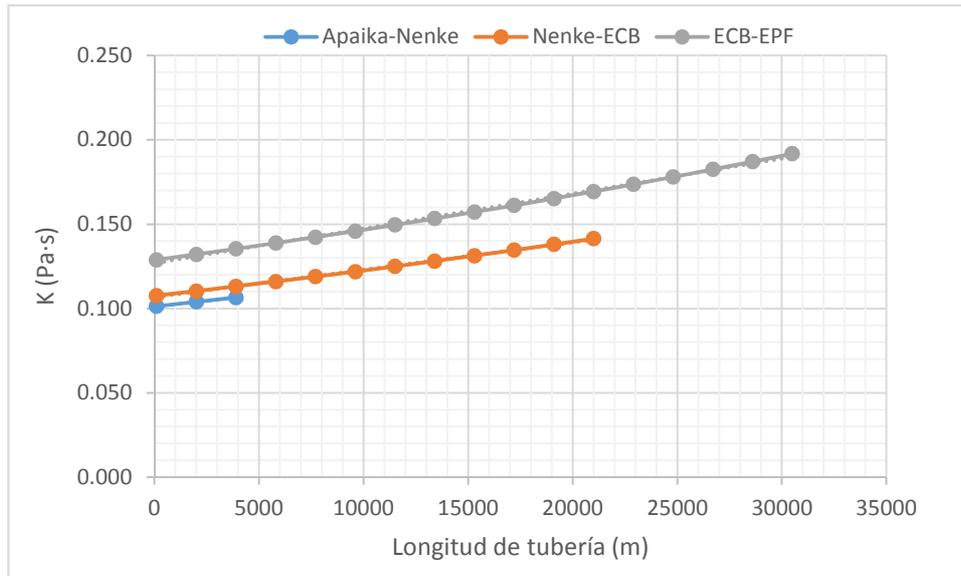


Figura 3.9 Índice de consistencia másica en función de la longitud de tubería.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

Como se muestra en las tres tendencias, el índice de consistencia másica muestra un crecimiento, debido a las pérdidas de calor en los tramos de tubería. El mayor aumento de obtiene para el tramo ECB-EPF, por ser el de mayor recorrido. Comportamiento similar muestra la densidad (figura 3.10).

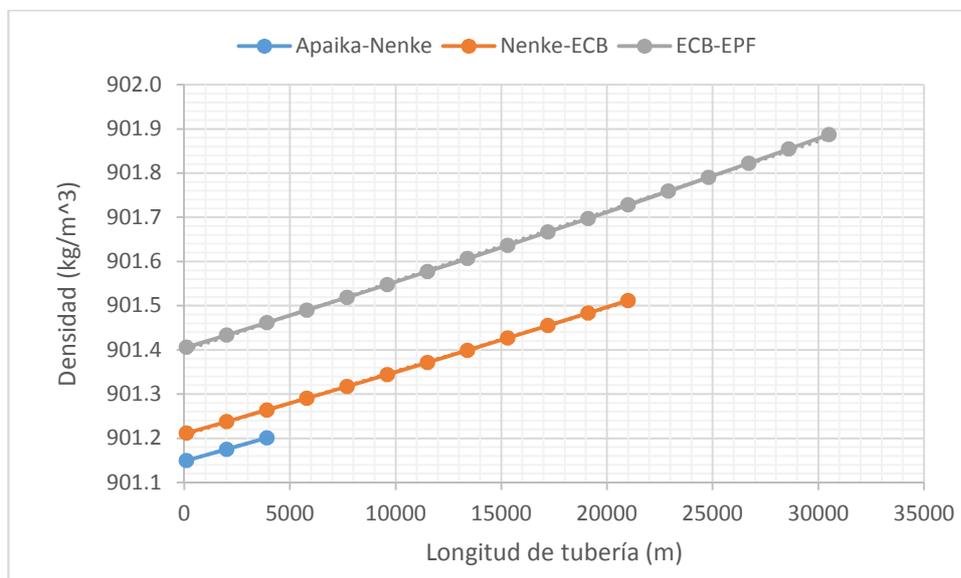


Figura 3.10 Comportamiento de la densidad en función de la longitud de tubería.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

El aumento de los valores de la densidad e índice de consistencia másica durante el recorrido del fluido en las tuberías provoca una disminución del número de Reynolds (figura 3.11), dando como resultado que aumenten las pérdidas de carga.

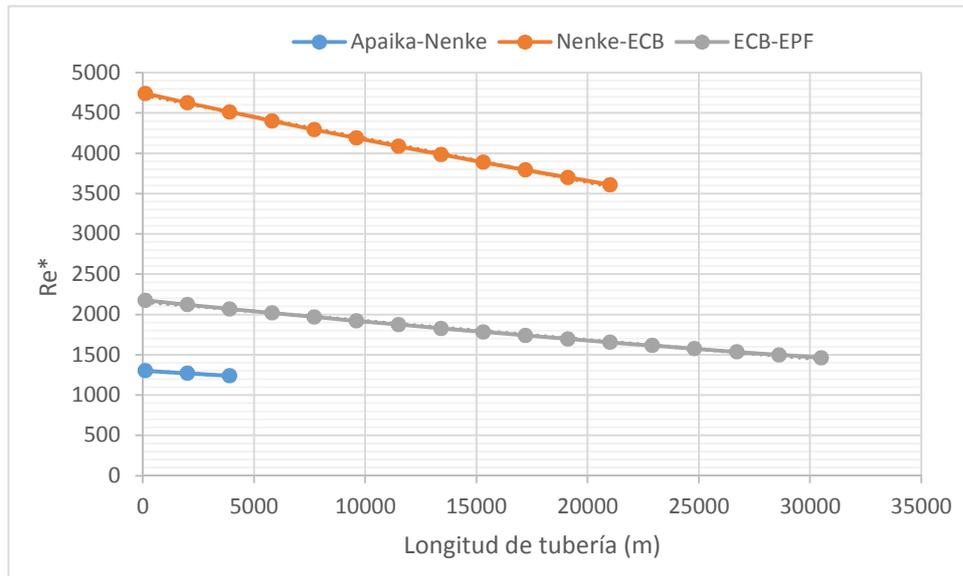


Figura 3.11 Dependencia del número de Reynolds con la longitud de tubería.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

En este caso la mayor variación se muestra en el tramo Nenke-ECB, para en cual se transporta mayor volumen en el menor diámetro de la conductora.

Debido a que el número de Reynolds es inversamente proporcional a la viscosidad e índice de consistencia másica, es que se relaciona el resultado de la figura 3.11, donde los valores de temperatura van disminuyendo en función de la longitud de la tubería, lo que provoca aumento de la viscosidad y el índice de consistencia másica.

Con la finalidad de describir el efecto de la temperatura sobre el gradiente de presión, en la figura 3.12 se presentan las curvas de simulación de $dp = f(l)$, caída de presión específica de cada tramo del sistema. En este caso considerado al sistema de flujo como no estacionario, lo que resulta una relación no lineal en función de la longitud de las tuberías, debido al aumento de la viscosidad y la densidad del fluido.

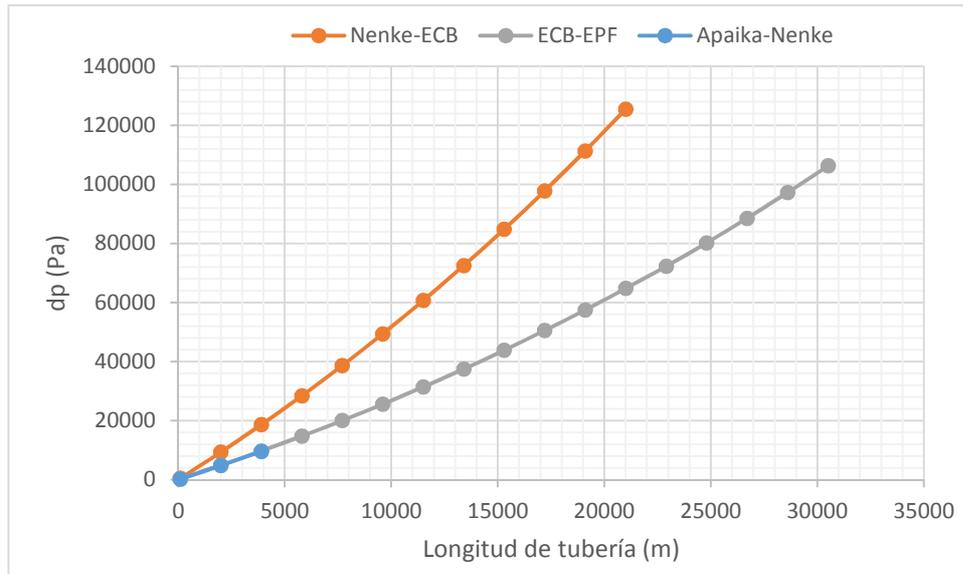


Figura 3.12 *Influencia de la temperatura en las pérdidas específicas de presión.*

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Puede verse en la figura que con el aumento la longitud, esta influencia al gradiente de temperatura y por ende a la caída de presión, resultado que demuestra el carácter no estacionario de flujo, al obtenerse para este caso relaciones no lineales. Como se muestra las mayores pérdidas de presión (mayor pendiente) se da para el tramo Nenke-ECB, por tener mayor flujo volumétrico ($Q = 0,096 \text{ m}^3/\text{s}$) y un diámetro igual al tramo Apaika-Nenke ($D = 0,457 \text{ m}$; $Q = 0,036 \text{ m}^3/\text{s}$).

Como el flujo de fluidos reales, se manifiesta con el aumento de las pérdidas de presión en las tuberías, lo que hace evidente considerar estos efectos en los cálculos para la obtención de parámetros racionales en los sistemas de transporte de fluidos multifásicos de viscosidad elevada.

3.5 Proceso para la obtención de la temperatura óptima de transporte por tuberías

Para la racionalización de los parámetros de un sistema de bombeo se seleccionan aquellos valores que garantizan su mayor efectividad con el menor costo posible. Con el aumento de la temperatura del fluido se reduce el costo de bombeo del combustible, pero al mismo tiempo crece el costo para el calentamiento del mismo.

los elementos característicos del transporte. Se parte del conocimiento de los parámetros específicos del costo de la instalación, los cuales se exponen en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 *Relación de parámetros de las instalaciones.*

Parámetro	Símbolo / unidad	Valor
Rendimiento de la bomba	η_{bomba}	0,74
Rendimiento del motor	η_{motor}	0,95
Tarifa eléctrica	t_{el} (\$/kW·h)	0,13
Costo de aporte de calor	C_{at} (\$/kg)	0,001
Tiempo de trabajo	t_t (horas /año)	8784
Tramo: Apaika-Nenke		
Flujo volumétrico	Q (m ³ /s)	0,036
Diámetro de la tubería	D (m)	0,457
Longitud de la tubería	L (m)	5200
Tramo: Nenke-ECB		
Flujo volumétrico	Q (m ³ /s)	0,096
Diámetro de la tubería	D (m)	0,457
Longitud de la tubería	L (m)	21100
Tramo: ECB-EPF		
Flujo volumétrico	Q (m ³ /s)	0,096
Diámetro de la tubería	D (m)	0,610
Longitud de la tubería	L (m)	32500

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

En el análisis de evaluación de la temperatura óptima técnico económica, se hace necesario establecer la relación del costo del fluido multifásico, dada fundamentalmente por la correlación entre el incremento de la temperatura y el flujo de portador de calor.

La simulación de los costos se realiza en busca de la temperatura a la que se debe bombear en el sistema para las condiciones actuales de temperatura de ingreso del fluido y para la temperatura de ingreso de 25 °C, lo que permite comparar el aporte económico del calor acompañante del fluido en el pozo.

Para la sección de Apaika-Nenke conllevó a la obtención de los siguientes resultados, según se muestra en las figuras 3.13 y 3.14 respectivamente.

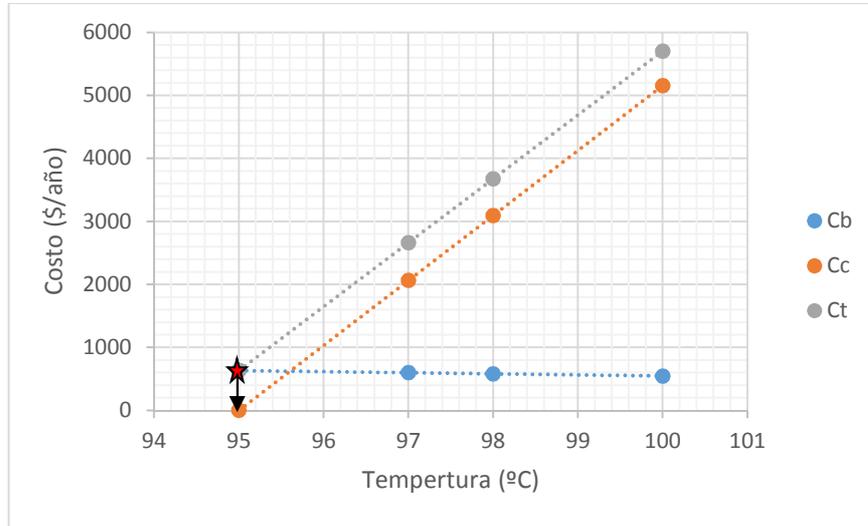


Figura 3.13 Simulación de costos en función de la temperatura real del fluido; tramo Apaika-Nenke.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

Como resultado de la simulación en la figura 3.13 se tiene que la temperatura a la que se encuentra el fluido multifásico coincide con la temperatura de menor costo total (95 °C), lo que se recomienda como temperatura óptima de bombeo para ese tramo.

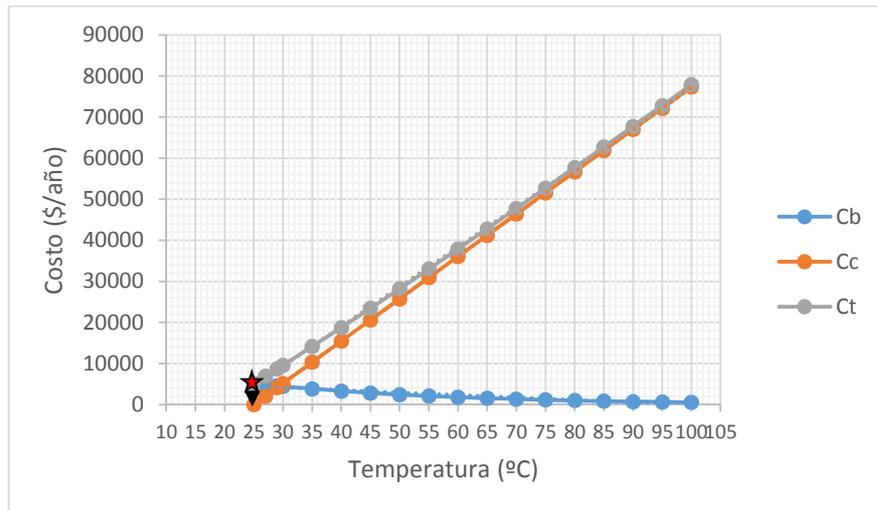


Figura 3.14 Simulación de costos en función de la temperatura inicial de 25 °C del fluido; tramo Apaika-Nenke.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

Para la simulación considerando si el fluido ingresara a la temperatura de 25 °C, se obtiene que debido a las condiciones del tramo de conductora, el cual la longitud es relativamente corta en comparación con los demás tramos, se encuentra que la temperatura para la cual el costo es mínimo es a 25 °C.

De igual modo se procede a simular en el tramo Nenke-ECB, lo que se representa en las figuras 3.15 y 3.16.

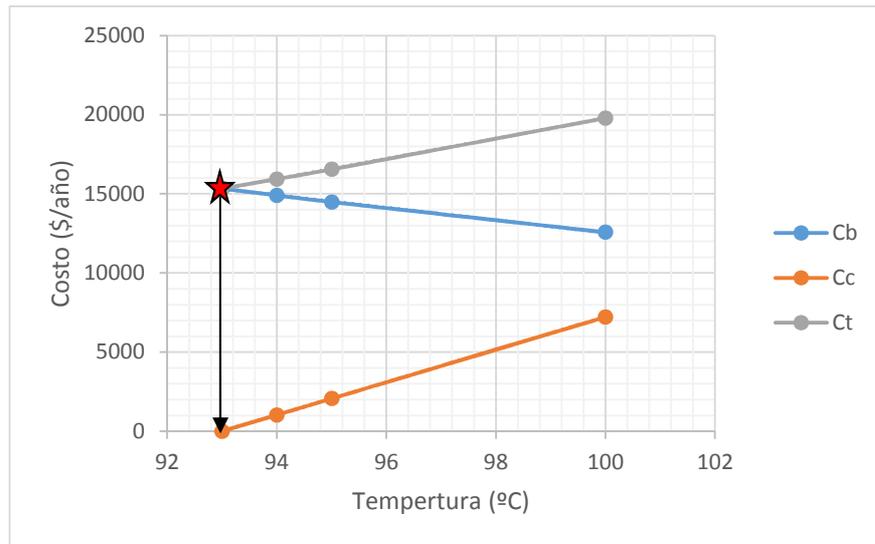


Figura 3.15 Simulación de costos en función de la temperatura real del fluido; tramo Nenke-ECB.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Como se indica en la figura 3.15, en el tramo Nenke-ECB, donde el fluido ingresa a una temperatura de 93 °C, se aprecia que el menor costo total de operación se tiene a dicha temperatura, en este caso tampoco se recomienda calentar el fluido multifásico, debido a que se aumentaría el consumo por calentamiento del fluido.

Al comparar estos resultados con los indicados en la figura 3.16, se tiene que la temperatura adecuada para este tramo es de 62,5 °C si el fluido ingresara a 25 °C; esto indica un aprovechamiento energético en el sistema, ya que se sigue manteniendo una alta la temperatura del fluido desde su salida del pozo, lo que representa ahorros tanto en el consumo de energía por bombeo como por calentamiento.

Para este tramo se requerirá una temperatura relativa mayor debido a que aumenta el flujo volumétrico para las mismas condiciones de tubería y aumenta además la longitud del tramo.

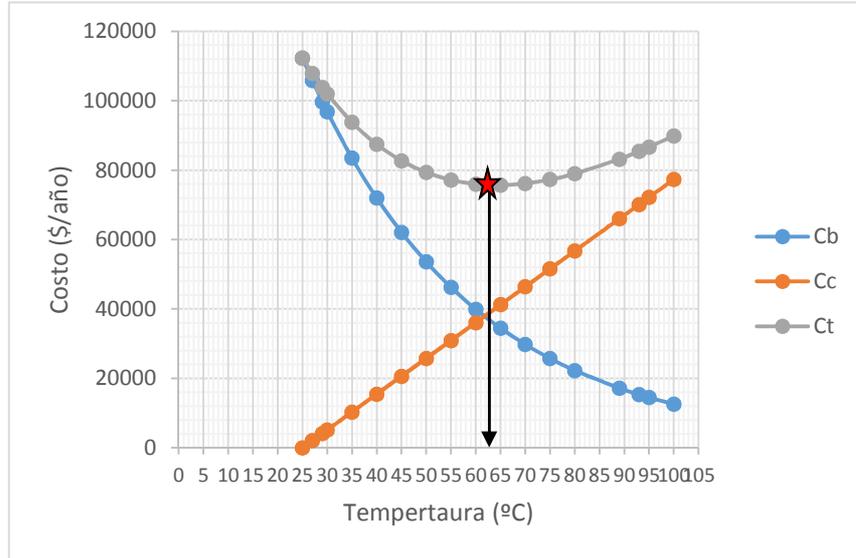


Figura 3.16 Simulación de costos en función de la temperatura inicial de 25 °C del fluido; tramo Nenke-ECB.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

El tramo ECB-EPF es el de mayor longitud de transporte y de mayor diámetro de tubería conductora; en este tramo el análisis de las temperaturas adecuadas de transporte se muestra en la figura 3.17.

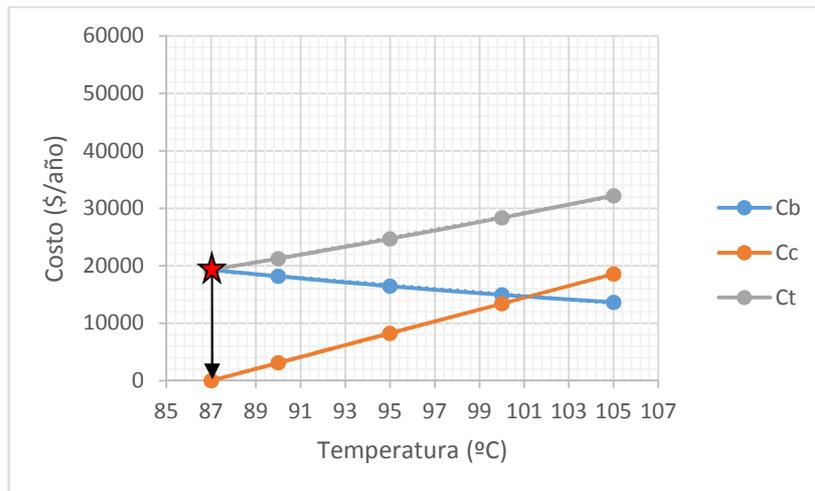


Figura 3.17 Simulación de costos en función de la temperatura real del fluido; tramo ECB-EPF.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

En el punto ECB la temperatura de ingreso del fluido multifásico es de 87 °C, en este tramo se obtiene que la temperatura adecuada óptima para el transporte es la misma de ingreso, mostrándose además, los beneficios de la temperatura de ingreso del fluido mediante el resultado de la figura 3.18.

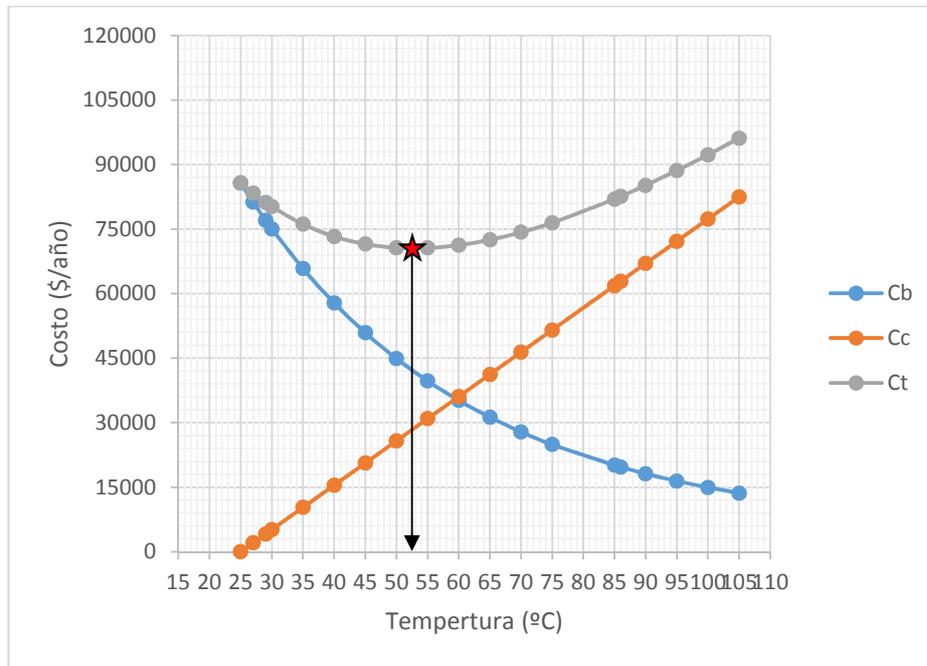


Figura 3.18 Simulación de costos en función de la temperatura inicial de 25 °C del fluido; tramo ECB-EPF.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Según se indica en la figura 3.18, la temperatura óptima relativa es de 52.5 °C, con 34.5 °C por debajo de la real, resultado que indica ganancias energéticas del sistema al encontrarse el fluido con menor viscosidad y sin costo de calentamiento.

En relación con los resultados de simulación de los costos de operación, según las figuras 3.13 a la 3.18, se muestra la tendencia decreciente del costo de bombeo al aumentar la temperatura del fluido multifásico, comportamiento relacionado con la disminución de la viscosidad aparente; no siendo así el comportamiento del costo de calentamiento, influenciado por el incremento del consumo de energía en el proceso de intercambio de calor.

La combinación del costo de calentamiento con el costo de bombeo, permitió encontrar los valores mínimos de costo de operación. Para las instalaciones analizadas se encuentra que la temperatura actual de bombeo del fluido multifásico es la adecuada, debido a que el fluido ingresa en cada tramo con una alta temperatura, originada por el calor interno del pozo.

3.6 Conclusiones del capítulo

- Para variaciones de la temperatura en el rango experimentado, el fluido multifásico presentó un comportamiento del tipo pseudoplástico, notándose poca variabilidad en los resultados del índice de flujo, con el valor promedio de 0,64.
- Con el empleo del modelo matemático para la estimación de las pérdidas de presión en tuberías, se demostró la incidencia en el gradiente de presión total de los efectos simultáneos de esfuerzo viscoso, de mezcla entre capas del fluido y por variación en la densidad del combustible debido al intercambio térmico; haciéndose viable la implementación computacional del método propuesto para el diagnóstico operacional de los sistemas de bombeo del fluido multifásico.
- Se demostró que en la instalación analizada la temperatura actual de bombeo del fluido corresponde con la temperatura óptima para cada tramo de: APK-NNK (95 °C); NNK-ECB (93 °C); ECB-EPF (87 °C), para un costo total de bombeo de 35488,60 \$/año.

CAPÍTULO 4: PROPUESTA

4.1 Título de la propuesta

Metodología para la operación de rendimiento eficiente del proceso de bombeo del fluido multifásico para separación en el campo Edén Yuturi, bloque 12, de la Empresa Petroamazonas EP.

4.2 Justificación de la propuesta

El transporte de fluidos multifásicos por sistemas de tuberías es muy utilizado en las industrias petroleras; este tipo de transporte ha demostrado ser una técnica muy eficiente e innovadora en cuanto a los regímenes de explotación, diseños de instalaciones disimiles y bajo costo económico, sin embargo, para el transporte de hidrocarburos pesados como se ha demostrado en ese trabajo, la selección inadecuada de la temperatura de bombeo eleva los costos de explotación en la mayoría de los casos, ocasionando pérdidas por ineficiencia energética.

Para un sistema de transporte por tuberías debe tomarse en cuenta principalmente:

- Las características de la tubería, cuya selección es importante considerar la temperatura y presión de operación, la corrosión y el costo del material.
- El sistema de impulsión, que está en relación directa con la altura que se tenga que elevar el fluido, la presión requerida en la entrega, longitud y diámetro del tubo, con la velocidad del flujo, y con propiedades físicas y reológicas del fluido, particularmente viscosidad y densidad.
- Los aparatos de medición, tomando en cuenta que los principales parámetros que tienen que ser medidos son: caudal, presión y temperatura del fluido.

En estos sistemas una de las demandas más importantes es el consumo por equipos de bombeo y de calentamiento del fluido. En el caso de estudio, se tiene que el sistema de transporte consta con tres tramos de tuberías conductoras (Apaika-Nenke; Nenke-ECB y ECB-EPF) donde se suministra el fluido a la planta de tratamiento con el fin de disminuir al máximo el agua en el aceite. Los

sólidos en suspensión también son controlados a fin de mejorar la calidad del petróleo crudo.

La evaluación final de un proyecto o investigación de esta índole, es de primordial importancia para establecer, en qué medida esta ha contribuido al desarrollo de la técnica y el conocimiento. El correcto análisis, dado por una metodología apropiada según las características del sistema de transporte del fluido multifásico, permite sentar las bases para futuros trabajos que se desarrollen sobre la temática; de ahí su significativa relación con la economía, la sociedad y el impacto al ambiente.

El propósito de la investigación es brindar una metodología que represente la realidad fenomenológica del proceso, lográndose actuar sobre la eficiencia energética del proceso de bombeo.

4.3 Objetivos de la propuesta

Definir una metodología a partir de las propiedades termofísicas del fluido multifásico y su comportamiento reológico, para flujo no estacionario, que posibilite obtener como resultado final la temperatura óptima de bombeo del fluido.

Proponer parámetros eficientes de operación para los sistemas de transporte de fluidos multifásicos en sistemas de bombeo.

4.4 Estructura de la propuesta

Como resultado principal de la propuesta metodológica, se parte de establecer las propiedades del fluido multifásico, en las que se incide para obtener el resultado final, que radica en establecer la temperatura a la cual debe transportar el fluido.

La estructura de la propuesta se ha planteado en los siguientes pasos:

- 1) Realizar la caracterización reológica del fluido, donde se obtienen el modelo de comportamiento de la viscosidad y los parámetros reológicos.

- 2) Caracterización termofísica del fluido, indicando la influencia de la temperatura del fluido sobre estas; necesarias para un sistema de flujo no estacionario.
- 3) Selección del modelo que describe el comportamiento del gradiente de temperatura en las tuberías conductoras; el mismo considerará las propiedades termofísicas y los modos de transferencia de calor del proceso.
- 4) Selección del modelo que describe el gradiente de presión en las tuberías, particularizado al flujo no estacionario y ajustado al modelo reológico del fluido.
- 5) Caracterización de la instalación a estudiar, para la cual se desea conocer el valor de temperatura óptima de transporte del fluido multifásico.
- 6) Cálculo de los costos de bombeo y de calentamiento del fluido multifásico para el rango de temperatura establecido por operación.
- 7) Por último se realiza la búsqueda del valor de temperatura a la cual se obtiene el menor costo total energético, tanto de bombeo como de calentamiento.

El procedimiento se realiza a partir del cálculo iterativo, debido a que se analiza un sistema de flujo no estacionario, causado por las pérdidas de calor del fluido al medio.

El procedimiento para la búsqueda del valor mínimo de costo total, queda representado por el diagrama de la figura 4.1, donde se elaboró una aplicación informática en MatLab para encontrar el punto mínimo global usando el método de búsqueda exhaustiva.

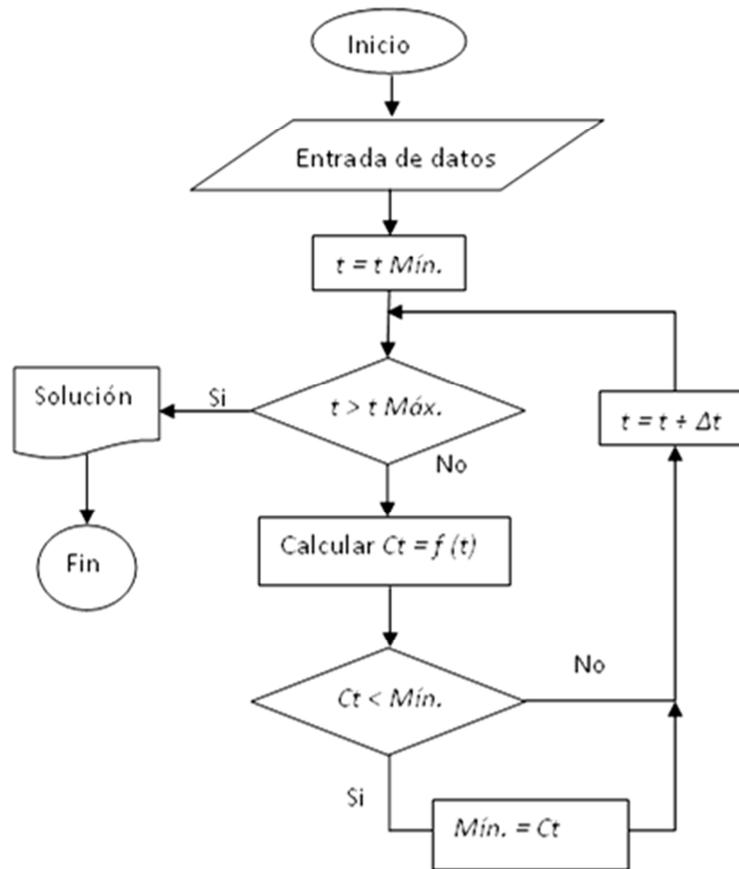


Figura 4.1 Diagrama para la obtención de la temperatura racional de transporte.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

4.5 Desarrollo de la propuesta

Para el desarrollo y planteamiento de la metodología de selección de la temperatura adecuada de transporte, se da prioridad a la aplicación de los criterios técnicos y económicos, determinando con esto la inclusión secuencial de fórmulas referidas en capítulos anteriores. Como primer paso se debe conocer si el equipo de bombeo es el adecuado, para ello se determina la velocidad específica de la máquina; una vez conocida esta información se procede a plantear los modelos y técnicas y procedimientos afines al objeto.

4.5.1 Comprobación del tipo de bomba; velocidad específica

La velocidad específica es un coeficiente basado en los criterios de semejanza que caracteriza las máquinas de flujo comparándolas con una máquina hipotética que

entrega un gasto de 0,075 m³/s con una carga de 1 m a su máximo rendimiento, se calcula a partir del caudal y la carga que corresponde al máximo rendimiento de la máquina o por los parámetros nominales de la misma.

Según sea la velocidad específica o característica n_s , las bombas centrífugas y otras de paletas, semejantes a estas, se dividen en los siguientes tipos (tabla 4.1):

Tabla 4.1 *Clasificación de las máquinas hidráulicas según la velocidad específica*

ne (rev/min)	>40	40÷80	80÷150	150÷300	300÷600	600÷1200
D2/ D1		2,2÷3,5	1,8÷2,2	1,3÷1,8	1,1÷1,3	1
Denominación	Rotativas y de Émbolo	Lenta	Normal	Rápida	Diagonal y Mixta	Axial

Fuente: *Streeter et al. (2000)*

De tal forma, la velocidad específica se calcula empleando la ecuación 4.1.

$$n_s = 3,56 \cdot \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Dónde: n = número de revoluciones; (rev/min). H = altura de succión; (m).

Q = Flujo volumétrico; (m³/s).

*Mediante este criterio, se determina si la bomba empleada en el proceso es adecuada.

4.5.2 Determinación del comportamiento de las propiedades reológicas y termofísicas del fluido multifásico

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo de corte como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Para obtener las curvas de flujo de los materiales, los reómetros deben operar en régimen laminar.

Las aplicaciones de los datos que aportan las curvas de flujo al resultado satisfactorio de este trabajo son:

1. Permite determinar valores de viscosidad para diferentes condiciones de operación.
2. Posibilita establecer si el equipo o conducto, que ha sido diseñado para manipular un material determinado, puede ser utilizado con otro producto.
3. La evaluación del funcionamiento de un sistema de flujo dado.
4. Contribuye a establecer condiciones de operación industriales en distintos sistemas hidrodinámicos.

De los resultados experimentales de la investigación se tiene que el fluido multifásico se comporta como no newtoniano del tipo pseudoplástico, para el cual se propone que se determine el **índice de consistencia másica** con la ecuación.

$$K = 1,75 \cdot e^{(-0,03t)} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Tomándose a: t como la temperatura en °C.

Para conocer el comportamiento de la **viscosidad aparente del fluido multifásico**, para variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad; se plantea la ecuación.

$$\mu_a = \frac{1,75}{e^{0,003t}} \cdot (\gamma)^{-0,36} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

El comportamiento de las propiedades termofísicas posibilita conocer el estado no estacionario del fluido durante su transporte por las tuberías. Para la determinación se la densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica, se proponen las siguientes relaciones:

- **Densidad:**

$$\rho = -2,91 \cdot \ln(t) + 914,4 \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Dónde: ρ = densidad del combustible; (kg/m^3). t = temperatura a la que se desea conocer la densidad; ($^{\circ}\text{C}$).

- **Capacidad calorífica:**

$$c_p = 8,56 \cdot t + 1483 \quad \text{Ecuación 4.5}$$

- **Conductividad térmica:**

$$k = (-0,13 \cdot t + 149,1) \cdot 10^{-3} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Las funciones propuestas describen la variabilidad de las características reológicas y termofísicas del fluido multifásico durante el proceso de transporte por tuberías.

4.5.3 Comportamiento del gradiente de temperatura en las tuberías

El gradiente de temperatura se determina para conocer si las variaciones de estas son significativas en el recorrido del fluido por las tuberías. Se parte de conocer el comportamiento de las propiedades termofísicas y las características del sistema de tuberías. Para ello se determinan los siguientes valores.

- **Número generalizado de Reynolds para fluidos seudoplásticos:**

$$\text{Re}^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Dónde: n = índice de flujo; (adimensional). D = diámetro de la tubería; (m).
 K = índice de consistencia másica; (Pa·s).

- **Número de Prandtl:** Describe la característica termofísica del agente portador de calor.

$$\text{Pr} = \frac{\mu_a \cdot c_p}{k} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Dónde: c_p = capacidad calorífica; (J/kg·°C).

- **Coefficiente de convección del fluido multifásico.**

$$h = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Dónde: Pr = número de Prandtl; (adimensional). D = diámetro de la tubería; (m).
 k_p = coeficiente de conductividad térmica del hidrocarburo; (W/m·°C).

- **Calor transferido al exterior del conducto:**

$$q_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot L (t_i - t_e)}{\frac{1}{r_0 \cdot h_c} + \frac{1}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{k_B} \cdot \ln\left(\frac{r_t}{r_1}\right)} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Dónde: h_c = coeficiente de convección del fluido; (W/m²·°C). 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_t = 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).

- **Variación de temperatura en el conducto:**

$$t_f - t_i = \frac{q_s}{Q_p \cdot \rho_p \cdot c_{pp}} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Dónde: q_s = Calor transferido al exterior del conducto; (°C). c_{pp} = capacidad calorífica del combustible; (J/kg·°C). Q_p = flujo volumétrico del combustible; (m³/s). ρ_p = densidad del combustible; (kg/m³). t_f = temperatura final del combustible; (°C). t_i = temperatura inicial del combustible; (°C).

Nota: El cálculo del gradiente de temperatura parte de establecer las propiedades del fluido para la temperatura inicial; una vez obtenida la distribución se debe efectuar el cálculo iterativo con los nuevos valores de estas propiedades para disminuir los errores.

4.5.4 Comportamiento del gradiente de presión y potencia hidráulica en las tuberías conductoras

El comportamiento del gradiente de presión en las tuberías una vez definida la distribución de temperatura se selecciona el valor medio y se procede a determinar

el cálculo de las propiedades del fluido. El modelo cumple que queda explícito como:

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

Ecuación 4.12

Se le añadirá a la longitud total de la tubería el resultado de la **longitud equivalente** de los codos, determinada por:

$$L_{eq.codo} = \left(\frac{n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{850}{\text{Re}^*} + \frac{0,199}{D^{0,22}} \right) \cdot \frac{\rho}{4 \cdot K} \cdot v^{2-n}$$

Ecuación 4.13

La **potencia hidráulica**, para el transporte de un fluido multifásico con comportamiento pseudoplástico, está dada por:

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

Ecuación 4.14

El resultado aportado por esta ecuación permite simular el costo de bombeo para diferentes de condiciones de temperatura del fluido.

4.5.5 Determinación del costo de bombeo y de calentamiento del fluido

Con el fin de determinar el valor adecuado de temperatura en el transporte por los sistemas de bombeo, se debe tener en cuenta la relación de un análisis técnico económico, para el que se determina el costo de bombeo (Laurencio, 2012):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3}$$

Ecuación 4.15

Dónde: 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). η_b = rendimiento de la bomba; (adimensional). η_m = rendimiento del motor eléctrico; (adimensional).

Una vez determinado el costo de bombeo se procede a determinar el costo de calentamiento del fluido donde se propone la ecuación:

$$C_{cal} = C_b \cdot \dot{m}_{at} \cdot t_t \cdot 3600 \quad \text{Ecuación 4.16}$$

Dónde: C_{cal} = costo por calentamiento del fluido multifásico; (\$/año). C_b = costo de bombeo del aceite térmico. (\$/kg). \dot{m}_{at} = flujo másico de aceite; (kg/s).

En este caso el fluido portador de calor es el aceite térmico, el que recupera el calor de los gases de escape de los motores de combustión, para el que se da función del tipo de intercambiador de calor la siguiente relación.

$$\dot{m}_{at} = 0,0326 \cdot (t_s - t_e) \quad \text{Ecuación 4.17}$$

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

En el caso de calentamiento por vapor de agua los resultados anteriores alcanzan valores muy similares; en el caso del calentamiento por aceite térmico el costo viene dado por el consumo de energía del sistema de bombeo de aceite.

Luego de determinar los costos de explotación, tanto de bombeo como de calentamiento, se simula el comportamiento del costo total de consumo energético, en función de la temperatura del fluido. Esta temperatura se limita en el rango de la temperatura a la cual entra el fluido a bombear al intercambiador de calor y a la temperatura máxima permisible, dada por operaciones.

El costo total se define por la suma de los costos, donde el valor mínimo del costo corresponde con la temperatura óptima de bombeo. En algunos casos con este

método se demuestra que no es necesario aplicar calentamiento puesto que el costo de calentamiento resulta más elevado que el de bombeo. La ecuación del costo total ajustada según los parámetros característicos obtenidos del fluido multifásico, para la cual se buscan los valores mínimos, queda expresada de la siguiente manera:

$$Ct = \left\{ \frac{t_{el} \cdot t_i \cdot 10^{-3}}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot \left(2 \cdot L \cdot 1,75 \cdot e^{(-0,03 \cdot t)} \cdot \left(\frac{4,43}{D^2} \right)^{0,64} \cdot \left(\frac{2 \cdot Q}{D} \right)^{1,64} + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{0,14}{Re^{*0,2}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} + \frac{16 \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \cdot Q \right) + \dots \right\} \\ + C_v \cdot 0,0326 \cdot (t_b - t_e) \cdot t_i \cdot 3600$$

Ecuación 4.18

Debido a la complejidad y número de iteraciones que se debe realizar en el cálculo de búsqueda del valor de temperatura óptima, por ser un sistema no estacionario, para viabilizar la obtención de los resultados se elaboró una aplicación informática en MatLab (ver programación en el anexo 5). Una vez conocidos los parámetros propios de operación de las instalaciones de bombeo del fluido multifásico y las condiciones ambientales e introduciendo estos datos en las ventanas de la aplicación informática descrita, se obtienen los valores de las temperaturas racionales para los casos a estudiar estudio; partiendo del análisis de la simulación del costo de bombeo, el costo de calentamiento y el costo total.

Para el caso en que las conductoras no superen los 500 m, se recomienda utilizar el siguiente nomograma (figura 4.2), obtenido a partir de resultados de simulación con la aplicación informática.

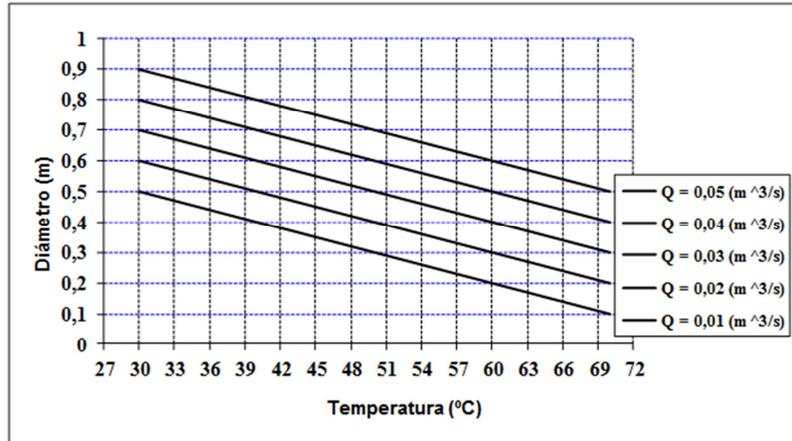


Figura 4.2 Relación entre la temperatura, el flujo volumétrico y el diámetro de tubería.

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

El nomograma mostrado en la figura 4.2, nos indica que para diámetros de tuberías menores de 0,1 m es importante mantener la temperatura alrededor de los 70 °C para garantizar un transporte eficiente del fluido y el caudal debe ser de 0,01m³/s. Es válido destacar que para casos de diseño de sistemas de transporte de fluidos pesados donde implican largas distancias, por encima de los 500 m, no se recomiendan diámetros de tuberías por debajo de los 0,15 m.

4.5.6 Comprobación del espesor de aislamiento de tubería

En algunos casos donde el sistema de tuberías requiere de aislamiento térmico, la determinación del espesor técnico económico de aislamiento se define en función de los diámetros de las tuberías para la selección de menor costo. Mediante el simulado del valor de las pérdidas de energía y el costo en inversión de aislamiento, se busca aquel espesor donde el costo total sea mínimo. Este enfoque mejora la eficiencia del sistema de bombeo para disminuir las pérdidas de calor (figura 4.3).

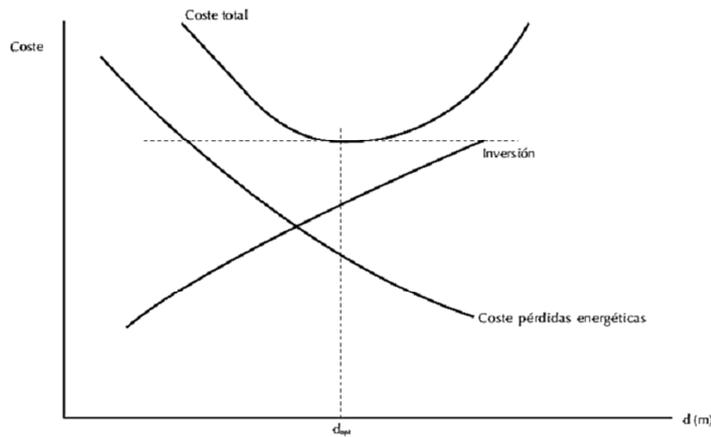


Figura 4.3 Gráfico de comportamiento de costos para la selección de espesor de aislamiento.

Fuente: Hechavarría, 2009

Los espesores mayores de aislamiento aumentan los costos del capital de un proyecto, pero las pérdidas de calor disminuyen. La selección adecuada de espesor de aislamiento de la tubería interviene para equilibrar el ahorro por pérdidas de calor. Se parte de conocer las condiciones a las que opera el sistema eficientemente (tabla 4.2).

Tabla 4.2 Datos que se deben considerar de las especificaciones técnicas de la instalación.

t_{el} (\$/kW·h)	t_t (h/año)	η_m (%)	η_b (%)	Q (m ³ /s)	V_u (años)
δ (m)	Δp (Pa/m)	N_h (W/m)	C_b (\$/m·año)	C_{tub} (\$/m·año)	C_t (\$/m·año)

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

En la figura 4.4 se muestra el gráfico para la selección del espesor de aislamiento, resultado de la aplicación de la metodología propuesta para el material de aislamiento Lana de Roca, en ella podemos observar que para diferentes diámetros de tubería las pérdidas de calor y los costos del aislamiento van disminuyendo a medida que aumenta el espesor de aislamiento hasta llegar al

espesor de 0,08 donde, a pesar de que las pérdidas de calor continúan disminuyendo, los costos de aislamiento aumentan. Esto nos indica que el espesor de aislamiento técnico económico racional, para los diferentes diámetros de tubería analizados, es de 0,08 m.

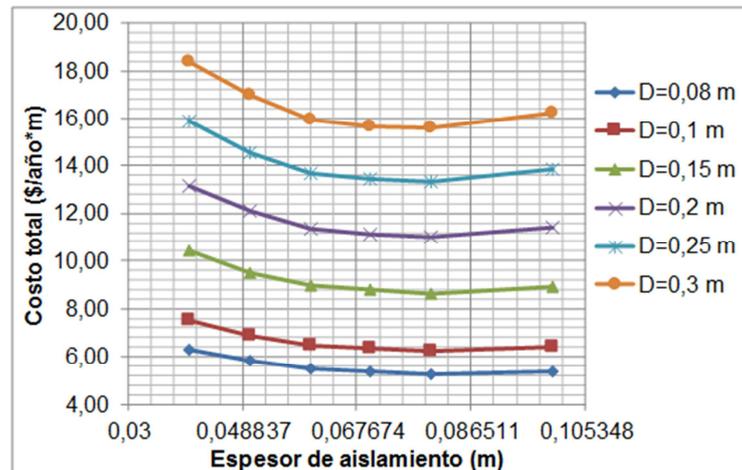


Figura 4.4 Relación entre espesor de aislamiento y costos.

Elaborado por: Rodríguez, Marco Xavier

4.6 Beneficio

Conocido la importancia y que mantiene el sector petrolero, es esencial realizar estudios de optimización de los recursos, en especial en el mejoramiento de la eficiencia energética.

El beneficio que se obtendrá con la metodología propuesta, será de mucha utilidad para la empresa, ya que será un aporte en lo económico debido a la reducción de los costos en la operación; (ahorro de químicos para la separación y ahorro de combustible o energía para el calentamiento de fluidos).

4.7 Impacto económico, social y ambiental

En la investigación se demostró que los métodos existentes, aplicados a la selección de temperatura óptima de transporte de petróleos pesados, no representan la realidad para los sistemas de bombeo del fluido multifásico ecuatoriano. El aporte e impacto de la investigación se realiza desde varios puntos de vista: (Económico, Social, Ambiental)

4.7.1 Económico

La determinación de los gastos de la instalación es de vital importancia, porque nos permitirá comparar los gastos totales del medio de transporte utilizado en el proceso, para luego tomar decisiones. Para ello se utiliza el concepto de gasto de explotación de la instalación para transportar un (1) m³ de fluido multifásico.

$$G_{exp} = \left(\frac{G_t}{Q \cdot L} \right) \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Dónde: G_{exp} = Gasto para transportar un m³ del fluido multifásico; (\$/m³ · m).
 G_t = Gasto total anual de explotación; (\$/año). Q = Caudal transportado por una bomba en un año; (m³/año). L = Longitud de la línea de transporte; (m).

El establecimiento de parámetros racionales de transporte, sobre todo la temperatura de flujo, contribuye significativamente al ahorro del consumo energético y al aumento del rendimiento de las instalaciones de transporte por sistemas de tuberías.

Mediante la implementación de los resultados de simulación, se corroboró el potencial de ahorro de energía en la instalación estudiada. En el análisis económico se realiza la comparación de los costos de operaciones de transporte del fluido para la temperatura actual y la relativa a 25 °C para cada tramo, determinada a partir de los resultados de la investigación; valores mostrados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Comportamiento de los costos para la temperatura de operación en la instalación en estudio.

TRAMO	Temperatura real (°C)	Temperatura relativa (°C)	Ct relativo (\$/año)	Ct real (\$/año)	G explotación (\$/m ³ · m)	Ahorro (\$/año)
APK-NNK	95	25	5143,75	632,22	0,000399	4511,53
NNK-ECB	93	65	75553,66	15265,27	0,000860	60288,39
ECB-EPF	87	53	71281,27	19591,11	0,000716	51690,16

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Como se resume en la tabla 4.3, se analizó el costo total de operación de la instalación por tramos, teniendo en cuenta la temperatura de operación real y la relativa a 25 °C, de modo que se pudo cuantificar el beneficio que da por cada tramo el calor interno del pozo, el cual garantiza que el fluido se encuentre en todos los tramos a una temperatura superior a la óptima teniendo un ahorro de 116490,09 \$/año, gasto en el que se tuviera que incurrir para lograr mantener el sistema en la temperatura óptima, mediante los sistemas de calentamiento.

Se tiene que el mayor gasto de explotación se encuentra en el tramo NNK-ECB, con el valor de 0,000860 \$/m³·m, causado por el aumento del flujo volumétrico en ese tramo, para el cual se mantiene el mismo diámetro de tubería que el tramo APK-NNK. La implementación de los resultados contribuirá significativamente en la evaluación del consumo energético en las instalaciones de transporte del fluido multifásico.

4.7.2 Social

Aunque el aporte económico es evidente, muchas son las restricciones que impone la sociedad a causa de la introducción de nuevas instrucciones. El aporte social está complementado en el desarrollo de una metodología que genera procedimientos para la operación eficiente de las instalaciones de bombeo del fluido multifásico, a partir de la obtención de parámetros óptimos de temperatura de bombeo, en algún caso se justifica a la temperatura actual como adecuada, pero no se fundamentaba bajo estos criterios.

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.

Los resultados de la caracterización de las propiedades de transporte del fluido permiten ampliar el conocimiento de sus características químicas, físicas y mecánicas. La metodología propuesta con principal aplicación en la selección y evaluación de la eficiencia de los sistemas de transporte de combustibles es un aporte muy práctico.

Por otra parte se ha facilitado la comprensión científica del proceso de transporte de fluidos complejos y la influencia de la temperatura sobre las propiedades del fluido. En la solución del problema planteado, se obtiene un nuevo conocimiento que permite la explotación eficiente de las instalaciones y se podrán trazar estrategias de capacitación para operarios y técnicos, con el fin de elevar la cultura energética y ambiental.

4.7.3 Impacto ambiental

La protección al ambiente, es uno de los problemas científico - técnicos más complejos que enfrenta la humanidad actualmente. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años, ha llevado a niveles sin precedentes la contaminación del suelo, la atmósfera y las aguas, con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas, como los químicos utilizados: (biocida, anticorrosivo, antiescala, demulsificante).

El comportamiento ecológico del transporte eficiente del fluido multifásico, está dado por una serie de actividades e impactos entre los que se pueden resaltar, la identificación de las acciones con repercusión ambiental (vertimiento de combustibles al medio y escape de vapores a altas temperaturas) y la identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones (tabla 4.4).

Tabla 4.4 *Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.*

Medio físico	Medio socioeconómico
Suelo	Hombre
Agua	Aspectos sociales
Aire	Aspectos económicos

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

El proceso de caracterización de los impactos ambientales (tabla 4.5) es de suma importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta en el análisis desarrollado, determinando como repercute sobre el medio cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el proceso de transporte de combustibles pesados por tuberías.

Tabla 4.5 *Identificación de riesgos e impactos ambientales asociados al transporte del fluido multifásico por tuberías.*

Acción / Riesgo	Afectación	Impacto
Emisión de vapores	Ambiente	Contaminación del aire
Emisión de vapores	Ser humano	Enfermedades respiratorias, infecciones, quemaduras
Emisión de vapores	Socioeconómica	Pérdidas económicas
Derrame de combustible	Socioeconómica	Pérdidas económicas
Derrame de combustible	Suelo	Degradación de la flora y fauna, pérdida de biodiversidad
Derrame de combustible	Agua	Contaminación de ríos y del ecosistema acuático

Elaborado por: *Rodríguez, Marco Xavier*

Las afectaciones mencionadas producen efectos indirectos y negativos como incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo sanguíneo, la contracción de los capilares de la piel y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental del hombre, expuestos también a enfermedades respiratorias.

Persistencia y Biodegradación

Tras su liberación en el entorno, el petróleo pesado se divide en pequeñas partes y no se expande con la rapidez de un petróleo menos viscoso. Cuando este se vierte en el agua será su densidad la que determine si el fuel quedará flotando sobre la superficie, si se hundirá o si permanecerá parcialmente sumergido. En el caso que flote, la pérdida de los componentes de menor peso molecular debido a su evaporación o disolución aumentará la densidad, provocando su hundimiento. Esta fracción pesada adoptará una consistencia similar a la del alquitrán y se fijará a sustratos expuestos a ella o será absorbido por materia particulada.

Las condiciones meteorológicas y la temperatura durante el periodo siguiente al vertido influyen significativamente en la velocidad de dispersión; las olas y el viento dispersarán el fuel dentro del agua, mientras que las altas temperaturas aumentarán la velocidad de evaporación de los hidrocarburos más ligeros. La temperatura del agua determina el alcance del impacto ambiental en caso de vertido, puesto que temperaturas altas favorecen tanto la pérdida de sus componentes más ligeros por evaporación como los procesos de degradación.

4.8 Conclusiones del capítulo

- Al implementarse los métodos descritos, se puede efectuar la simulación operacional del sistema para diferentes condiciones de operación, siendo esta una herramienta concreta para el análisis de explotación y diseño de sistemas de transporte industrial de fluidos.
- Se destaca, la gran influencia que tiene la temperatura del fluido en el rendimiento de bombeo y el costo de transportación; aspectos en el que se puede incidir a la hora de reducir los costos. Mediante la simulación se mostró que se tiene un ahorro de 116490,09 \$/año
- En las instalaciones de bombeo, el principal agente contaminantes es sulfuro de hidrógeno (H₂S) y puede desprenderse en ciertas condiciones, como altas temperaturas, este compuesto es altamente tóxico y los síntomas principales son: irritación de ojos, nerviosismo, nauseas, cefaleas, insomnio y en casos severos, inconsciencia y muerte.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Según los reogramas experimentales analizados, el fluido multifásico presentó un comportamiento del tipo pseudoplástico, notándose poca influencia de las variaciones de temperatura en los valores obtenidos del índice de flujo, con el valor de 0,64 como promedio.
- De acuerdo con los resultados del análisis de las pérdidas de carga, se mostró que las caídas de presión en las tuberías durante el transporte del fluido multifásico, son influenciadas por la variación de la temperatura del fluido, el rozamiento viscoso y los efectos de mezclado entre capas de flujo. El modelo se complementa con las correlaciones obtenidas de las propiedades del fluido multifásico en función de la temperatura y los costos asociados al proceso de transporte.
- Mediante la simulación de los tramos de la conductora, considerando los efectos no estacionario de flujo por tuberías y la obtención de la temperatura óptima, se demuestra el aporte que da el calor interno del pozo en el proceso de transporte, en cuanto a costo de operación dando como resultado que para el sistema en general se deja de consumir 116490,09 \$/año, si se tuviera que calentar al fluido; se demuestra que no es necesario aplicar calentamiento al fluido.
- Con la implementación del método propuesto para la obtención de la temperatura óptima de operación de sistema de bombeo del fluido multifásico, se hizo factible la aplicación computacional para la simulación de diferentes condiciones de operación de los sistemas de bombeo, lo que viabiliza el periodo de obtención de los valores de temperatura para costo mínimo de transporte de un 80% a 90 % más rápido.

RECOMENDACIONES

- Considerar en futuras investigaciones, la obtención de las propiedades reológicas de los fluidos de otros campos en función de los factores que influyen en su comportamiento físico, lo que permitirá establecer el procedimiento de flujo según sus propiedades de transporte.
- Continuar el estudio y la aplicación de los métodos para la obtención de parámetros óptimos de transporte, permitiendo obtener soluciones viables para la optimización del diseño de sistemas de transporte de petróleos bajo criterios técnico-económicos múltiples.
- Emplear la metodología propuesta a partir de la aplicación informática en MatLab para estimar las pérdidas de carga en las tuberías, cuando se transporta el fluido multifásico y para obtener los valores de temperatura óptima de bombeo en función de las condiciones reales de los sistemas de transporte.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andrade, R., Torres, R. y Montes, E., “Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpas orgánicas”. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 26(3) 599-612, 2009.
2. Alcoser, J., *Ingeniería de Integración para la Ampliación de Facilidades en el EPF para el B31*. “Estudio Técnico Económico para el calentamiento de crudo en el B31”. (Doc. 31B016-EPF-10-EST-002), Petroamazonas EP / Tecna, 2012.
3. ASTM D 1548-92, *Método estándar para la determinación de vanadio en petróleos pesados*, 1992.
4. ASTM D 287-92, *Método estándar para determinar la densidad y gravedad en °API de petróleo crudo y sus productos*, 1992.
5. Ávila, N., Becerra Lotero, C., Iza Mustafá, Y., Sanz Uribe, J., “Pérdidas de presión en el transporte hidráulico de café por tubería PVC”. *Ciencia y técnica*. 12(4) 23-31, 2007.
6. Ávila, R., *Química aplicada I*, Edición UPC, Primera edición, Barcelona, 247-248, 1995.
7. Balagui, S., Mohammadifar, M. y Zargaraan, A., “Physicochemical and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of iranian astragalus”. *Journal of Food Biophys*. 15(4) 59-71, 2010.
8. Balan, C., Broboana, D., Gheorghiu, E. y Vékás, L. “Rheological characterization of crude oils and complex fluids in electro-magnetic fields”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 42(2) 92-103, 2008. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2015]
9. Benítez, I., Álvarez R., escudero, l., Reyes, F. y Rodríguez, A., “Efecto de aditivos nacionales en las propiedades físicas del petróleo crudo cubano”. *Tecnología Química*. 24(1) 43-61, 2004.
10. Bourbon, A., Pinheiro, A., Ribeiro, C., Miranda, C., Maia, J., Teixeira, J. y Vicente, A., “Characterization of galactomannans extracted from seeds of *gleditsia triacanthos* and *sophorajaponica* through shear and extensional rheology”. *Journal of Food Hydrocolloid*. 12(4) 184-192, 2010.
11. Caldiño, V. y Salgado, M., “Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris”, 7mo Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México, 2004.
12. Cerpa, A. y Garcell, L., “Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions”. *Clays and Clay Minerals*. 47(4) 515-521, 1999.
13. Cerpa, A. y Garcell, L., “Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas”, Evento Metalurgia 98, La Habana, 1998.

14. Cerpa, A., *Propiedades de flujo de suspensiones minerales lateríticas. Influencia de la mineralogía y de las propiedades coloide-químicas. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Madrid, España, 1997. 99p*
15. Chen, T., Mohammed, R., Bailey, A., Luckham, P., y Taylor, S., “*Dewatering of crude oil emulsions. Emulsion resolution by the application of an electric field, colloids and surfaces*”. *Physicochemical and Engineering Aspects*. 31(8) 273-284, 1994.
16. Chenlo, F., Moreira, R. y Silva, C., “*Rheological behavior of aqueous systems of tragacanth and guar gums with storage time*”. *Journal of Food Engineering*. 32(6) 107-113, 2010.
17. Colby, R., “*Structure and linear viscoelasticity of flexible polymer solutions: comparison of polyelectrolyte and neutral polymer solutions*”. *Journal of Rheological*. 24(9) 425-442, 2010.
18. Da Silva, F., Guimaraes, D. y Gasparetto, C., “*Rheology of acerola juice, effects of concentration and temperature*”. *Science and Alimentary Technologic*. 25(1) 121-126, 2005.
19. Dak, M., Verma, R. y Jaaffrey, S., “*Effect of temperatures and concentration on rheological properties of kesar*”. *Journal of Food Engineering*. 28(4) 1011-1015, 2007.
20. Darby, R., “*Take the mystery out of non-newtonian fluids*”. *Chemical Engineering*. 9(3) 66-73, 2001.
21. Davidson, R., Nguyen, D. y Chang, C., “*A model for the pressure drop in the pipeline for the non-newtonian crude oil*”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 43(3) 102-121, 2004. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2015]
22. De la Paz, N., “*Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida*”. *Revista Cubana de Farmacia*. 36(1) 21-27, 2002.
23. Díaz, A. y Falcón, J., “*Estudio reológico de emulsiones de petróleo crudo en agua*”. *Tecnología Química*. 24(1) 32-55, 2004. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 9 de marzo de 2015]
24. Díaz, A., Hechavarría, T., “*Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos. Método generalizado. Régimen turbulento*”. *Tecnología Química*. 19(3) 22-36, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 9 de marzo de 2014]
25. Doron, P. y Barnea, D., “*Pressure drop and limit deposit velocity for solid-liquid flow in pipes*”. *Journal of Multiphase Flow*. 15(3) 231-243, 1995.
26. Doron, P., Simkhis, M. y Barnea, D., “*Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes*”. *Journal of Multiphase Flow*. 23(2) 313-323 1997.
27. Falcón, J., Brossard, L., Carbonell, J., Barreda, A. y Pacheco, P., *Emulgente para la preparación de emulsiones agua-combustible, Oficina Cubana de la Propiedad Industrial, Patente de Invención, 45, 1995.*

28. Falcón, J., Serret, N. y Carbonell, J., “Effect of pyrolysis products on diesel-fuel oil blends”. *Tecnología Química*. 26(3) 54-63, 2006.
29. Ferro, A., Falcón, J. y Toledo, A., “Estudio de la posibilidad de sustitución de pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente p (Segunda Parte)”. *Tecnología Química*. 24(1) 33-45, 2004.
30. Frigaard, I, Vinay, G. y Wachs, A., “Model of displacement flow of a crude oil from a pipeline”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 46(6) 102-121, 2007. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2014]
31. Garcell, L., *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía*, 2001.
32. García, F. y Haoulo, M., “Estudio experimental de patrones de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas”, 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Perú, 2007. www.revele.com.ve/programas/ [Consultada: 3 de enero de 2015]
33. García, F., *Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, 2003. 121p*
34. Gardea, H., “Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos”. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. 9(2) 17-26, 2008.
35. Gillies, G., Shook, A., y Wilson, K., “An improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow”. *Canadian Journal Chemical Engineer*. 8(69) 173-178, 1991.
36. Haoulo, M. y García F., “Efecto de la viscosidad y de la densidad de mezcla en el gradiente de Presión de flujo de gas-líquido en tuberías horizontales”, *Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Mérida, Venezuela, 301-306, 2004.*
37. Haoulo, M., García, F. y Soto, J., “Gradiente de presión de flujo de gas y líquido en tuberías horizontales considerando el efecto de las propiedades de mezcla”. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela*. 20(4) 102-113, 2005.
38. Harms, H., *Oil tool and method for controlling paraffin deposits in flow lines and downhole Strings. Patent 20 32 005, 1991.*
39. Hechavarría, J., *Optimización del diseño de redes de distribución de agua bajo criterios técnico-económicos. Tesis de Doctorado, Universidad de Holguín, Cuba, 2009. 105p*
40. Hunter, R., *Fundamental of colloid science, segunda edición, Oxford University, New York, 2007.*
41. Ibarz, J., Vélez y Barbosa, G., *Transporte de alimentos fluidos a través de tuberías. Tesis de Especialidad, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001. 60p*
42. Incropera, F. y De Witt, D., *Fundamentals of heat and mass transfer, La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003.*

43. Japper, A., Escudier, P. and Poole, J., "Laminar and turbulent pipe flow of a polymer solution". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 48(5) 43-55, 2009. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de octubre de 2015]
44. Khatib, M., "The development of poiseuille flow of a pseudoplastic fluid". *The Arabian Journal for Science and Engineering*. 31(1) 102-117, 2006. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de mayo de 2015]
45. Laurencio, H. y Delgado, Y., "Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado". *Minería y Geología*. 24(2) 56-77, 2008. www.ismm.edu.cu/revistamg [Consultada: 15 de diciembre de 2015]
46. Laurencio, H., *Método la obtención de la temperatura racional de transporte del petróleo pesado CM 650 por tuberías. Tesis de doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2012. 99p*
47. Legrá, A., *Elementos teóricos y prácticos de la investigación científico-tecnológica, Instituto Cubano del Libro, en edición, La Habana, 2015.*
48. Liang, C., "Experimental study of the effect of magnetic treatment on crude oil in a pipeline". *Oil & Gas Storage Transport*. 9(1) 152-178, 1999.
49. Liu, S. y Masliyah, H., "On non-newtonian fluid flow in ducts and porous media". *Chemical Engineering Science*. 53(6), 175-201, 1998.
50. Mansoori G., *Modeling and prevention of asphaltene and other heavy organic deposition in oil-spe, Patented 27 070, 2005.*
51. Manssur, R. y Rajie, T., "Generalized explicit equation for de friction factor for de newtonian and non newtonian fluids in tooth circular and non circular ducts". *Chemical Engineer Technique*. 53(4) 89-103, 1988.
52. *Manual Technical. ALLWEILER AG, Document id: DBAC508676. Germany. <http://www.allweiler.com> [Consultada: junio de 2014]*
53. Martínez, D., Eguez F., *Estudio reológico y de flujo para emulsiones de petróleo pesado en agua, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Petroecuador, Informe de investigación, Facultad de Ingeniería Química, 2001.*
54. Martínez, J., "Quantifying the economy of water supply looped networks". *Journal American Society of Civil Engineers*. 22(3) 105-119, 2007.
55. Martínez, P. y Linares, A., "Resistance coefficients for the power-law fluids in laminar flow". *Journal of Food Process Engineering*. 24(5) 135-144, 2001.
56. Martínez, V., Monteagudo, J. y Jáuregui, S., *Mecánica de los fluidos y máquinas de flujo, Editorial Universo Sur, Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2007.*
57. Maruska, P. y Rao, B., "Estudio reológico y dieléctricos a los petróleos parafínicos y asfálticos". *Fuel Science and Technology*. 2(5) 119-168, 1987.
58. Mechetti, M. y Zapana L., "Estudio comparativo de actividad electrorreológica en petróleos argentinos", *I Encuentro Internacional de*

Física aplicada a la Industria del Petróleo y IV Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada, Bucaramanga, Colombia, 2000.

59. Mechetti, M., Fornés, A., Maturano, S. y Zapana, L., “Efecto electrorreológico en crudos argentinos”, Congreso Producción 2000 Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú, Argentina, 2000.
60. Mechetti, M., Rodríguez L., Castañeda, M. y Pelaez, C., Efecto electrorreológico en crudos pesados, Informe ICP, Ecopetrol, Argentina, julio, 2001.
61. Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. (2012). *REGLAMENTO AMBIENTAL PARA LAS OPERACIONES HIDROCARBURÍFERAS EN EL ECUADOR.* (L. S.A., Ed.) Quito, Pichincha, Ecuador.
62. Momemer, B., “El mito de la orimulsión: la valorización del petróleo extrapesado de la faja del Orinoco”. *Oil & Gas Journal Latinoamérica.* 10(5) 44-56, 2004.
63. Nakayama, T., Niwa, E. y Hamada I., “Pipe transportation of minced fish paste”. *Journal of Food Science.* 45(4) 844-847, 1980.
64. Nehal, S., Amal, M., Nael, N. y Hussein, K., “Stability and rheology of heavy crude oil in water emulsion stabilized by an anionic-nonionic surfactant mixture”. *Petroleum Science and Technology.* 17(5) 553-576, 1999.
65. Ocampo, R., Martínez, M., Tamayo, A. y Alarcón, E., “Emulsiones agua en combustóleo para reducir las emisiones de partículas inquemadas en calderas”, *Boletín Instituto de Ingeniería Eléctrica, México,* septiembre, 225-231, 1997.
66. Ochoa, O., *Procedimiento para el bombeo eficiente de petróleos pesados, Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba,* 2011. 85p
67. Pakrovskaya, I., *El transporte hidráulico en la industria minera. Niedra, Moscú,* 1985.
68. Pelaez, C. y Stachenco, E., “Estudio del efecto del campo magnético en crudos parafínicos por cromatografía de gases de alta resolución”, *Ecopetrol-ICP,* 1999.
69. Perry, H., *Chemical engineers handbook, McGraw Hill Book, New York,* 1988.
70. Placencia, A. y Martínez, D., “Formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto y estudio de las pérdidas friccionales en tubería”, *Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico Petroecuador, Informe de investigación, Quito, Ecuador,* 2000.
71. Risica, D., Barbetta, A., Vischetti, L., Cametti, C. y Dentini, M. “Rheological properties of guar and its methyl, hydroxypropyl and hydroxypropyl-methyl derivatives in semidilute and concentrated aqueous solutions”. *Journal of Polymer.* 15(1) 1972-1982, 2010.

72. Romo, L., *Emulsiones*, Editorial Universitaria, Ecuador, 1993.
73. Salazar, M., García, G. y Espinosa, P., “Gradiente de presión de un flujo bifásico sólido-líquido de dos regiones en pozos horizontales”. *Geotermia*. 8(2) 123-136, 2005. www.revele.com.ve/programas/indice/ [Consultada: 4 de febrero de 2014]
74. Sánchez, C., Oria, R. y Sánchez, A., “Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés”, *Simposio Poscosecha, Orihuela, Valencia, España*, 2008.
75. Sánchez, G., “Estudio de fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos”. *Revista de la Facultad de Ingeniería de Chile*. 10(5) 23-34, 2002.
76. Santos, F. y Martín, M., “Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrífuga”. *Centro azúcar*. 1(3) 58-67, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 4 de junio de 2015]
77. Skelland, H., *Non-newtonian flow and heat transfer*, Instituto Cubano del Libro, La Habana, 1970.
78. Somoza, J. y García, A., “Escenarios macroeconómicos a largo plazo del desarrollo energético y su impacto ambiental”, *INIE*, Octubre, 2002.
79. Streeter, V., Benjamin, E. y Bedford, K., *Mecánica de fluidos*. Novena Edición. McGraw-Hill. Best Seller International, S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 2000.
80. Szymula M., Januz, W. y Jablonski, J., “Electrochemical Properties of Asphaltene Partricles in Aqueous Solutions”. *Dispersion Science and Technology*. 21(6) 785-802, 2000.
81. Trapeznikov, S., *Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente*. Tesis de Doctorado, Instituto de Minas de San Petersburgos, Rusia, 2011. 95p.
82. Turian, M. y Yuan, F., “Flow of slurries in pipelines”. *AIChE Journal*. 23(9) 232-243, 1977.
83. Turiño, I., “Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga”. *Centro azúcar*. 3(1) 58-73, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 10 de febrero de 2015]
84. Vandresen, S., Quadri, M., De Souza, J. y Hotza, D., “Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices”. *Journal of Food Engineering*. 29(3) 269-274, 2009.
85. Vélez, J., *Apuntes de ingeniería de alimentos I*. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2003.
86. Vita, M., Alejandro, M., Arriola, M., Sánchez, M., Manzanares, E., Romo, C. y Yeri, R., “Nueva tecnología para la emulsificación de residuales del petróleo en agua”, *Instituto de Investigaciones Eléctricas, Boletín IIE*, 131- 135, México, 2001.

87. Wang, B. y Dong, L., *Paraffin characteristics of waxy crude oils in China and the methods of paraffin removal and inhibition*, SPE 29 954, 1995.
88. Wilson, C., "Evaluation of interfacial friction for pipeline transport models", *Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, U.K., 107-116, 1988.*
89. Wojs, K., "Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes". *Journal of non-Newtonian fluid mechanics*. 48(2) 337-355, 1993.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Concha, A., Quiroga, H., Benjumea, P., "Modelamiento de la propagación de los frentes de contaminación generados por el transporte de combustibles por poliducto". *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 2006.
2. Ivenski, B., "Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías", *Gosstroishdat, Moscú, 1957.*
3. Moring, V., *Termodinámica*, Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba, 2006.
4. Nekrasov, B., *Hidráulica*. Editorial MIR, Moscú, Rusia, 1990.
5. Roque, D., "Método de recalcu de la característica de funcionamiento de las bombas centrifugas que manipulan soluciones azucaradas", *VI encuentro Nacional de Jefes de Maquinarias, MINAZ, Santa Clara, 1989.*
6. Urakami, K., *Magnetization treatment apparatus of fluid*. Patent. 4 904 381, 1990.

ANEXOS

ANEXO 1

Propiedades termofísicas

Tabla 1a. *Propiedades termofísicas de aislamientos*

Description /Composition	Typical Properties		
	Density ρ (kg/m ³)	Thermal Conductivity k (W/m·°C)	Specific Heat c_p (J/kg·°C)
Blanket and Butt Glass fibber, paper faced	16	0,046	-
	28	0,038	-
	40	0,035	-
Glass fibber, coated, duct liner	32	0,038	835
Cellular glass	145	0,058	1 000
Glass fibres, organic bonded	105	0,036	795
Polystyrene, expanded Extruded(R-12) Moulded beads	55	0,027	1 210
	16	0,040	1 210

Tabla 1b. *Propiedades termofísicas de metales*

Composition	Properties			
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg·°C)	k (W/m·°C)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Carbon steels Plain carbon (Mn ≤ 1% Si ≤ 0,1%)	7854	434	60,5	17,7
Aluminum Pure	2702	903	237	97,1
Alloy 2024-T6 (4,5 % Cu, 1,5 % Mg, 0,6 % Mn)	2770	875	177	73,0
Alloy 195, Cast (4,5%Cu)	2790	883	168	68,2
Zinc	7140	389	116	41,8

Tabla 1c. *Propiedades termofísicas del aire*

t (°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·°C)	$\mu \cdot 10^{-7}$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m·°C)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	Pr
23	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
27	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707

Fuente: *Incropera y De Witt, 2003*

ANEXO 2

Instrumentos de medición del sistema de bombeo de aceite térmico (WHRU)



Descarga de ROH-900 B008.



Temperatura de ingreso a WHRU1.



Temperatura de salida a WHRU2.



Succión de ROH-900 B009.



Temperatura de salida a WHRU1.



Temperatura de ingreso a WHRU3.



Descarga de ROH-900 B009.



Temperatura de ingreso a WHRU2.

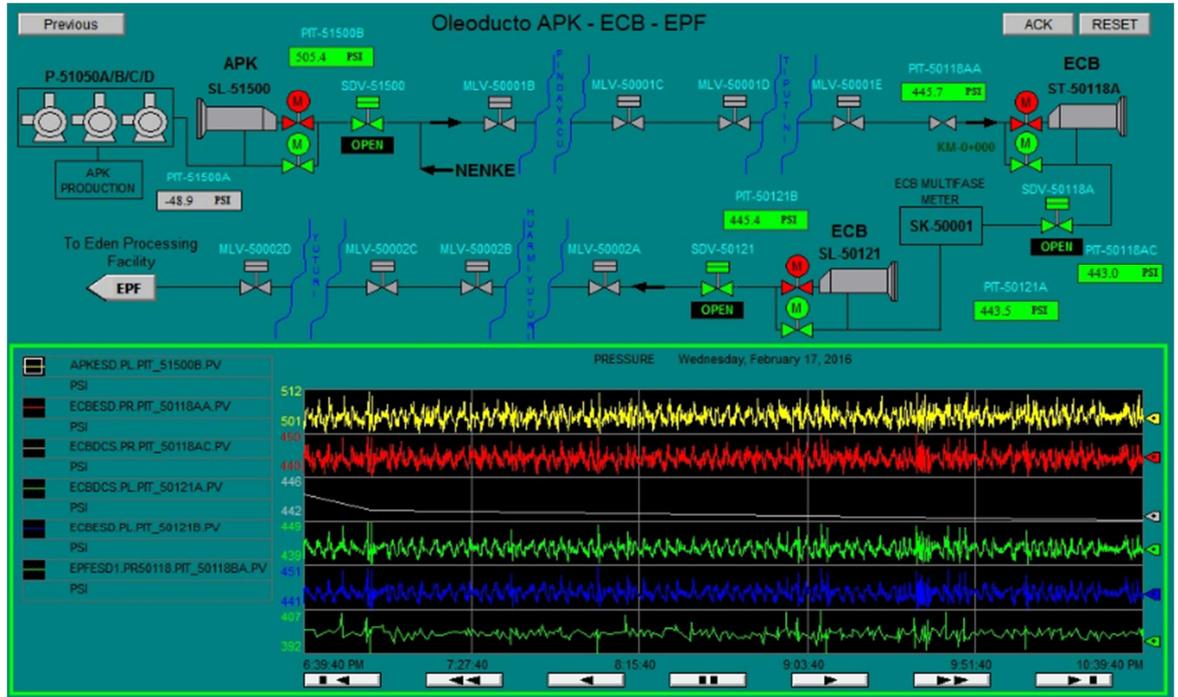


Temperatura de salida a WHRU3.

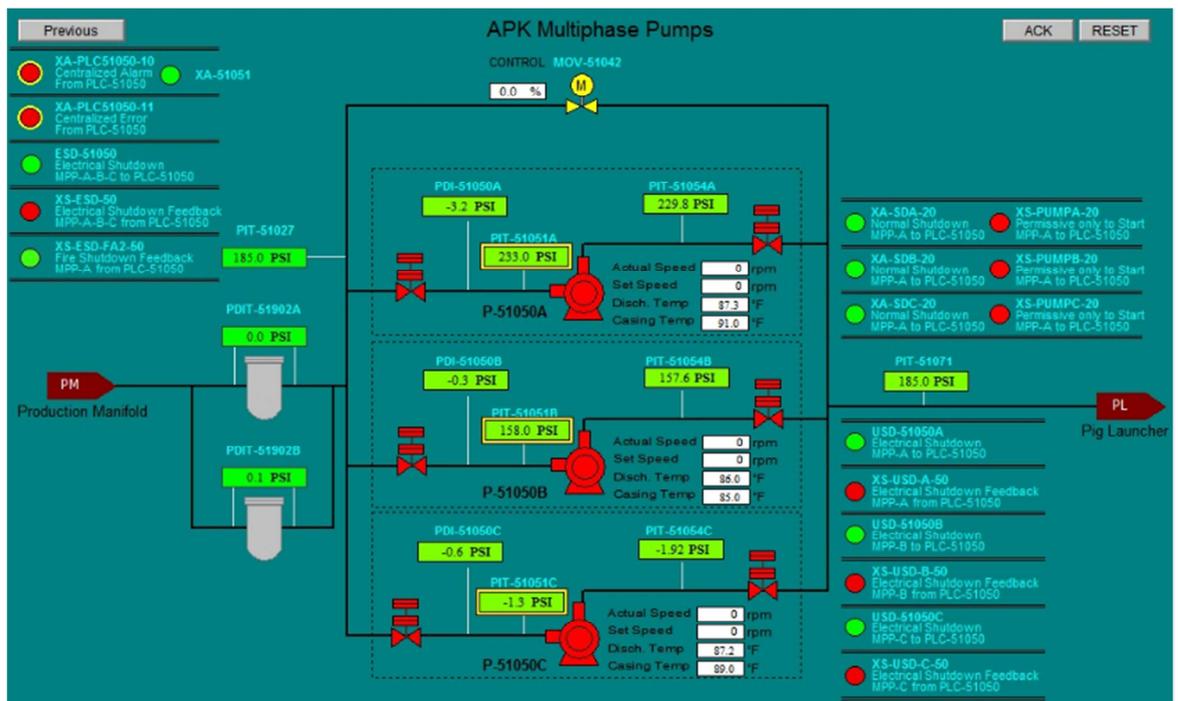
ANEXO 3

Producción Bloque-31 (Plataformas Apaika – Nenke)

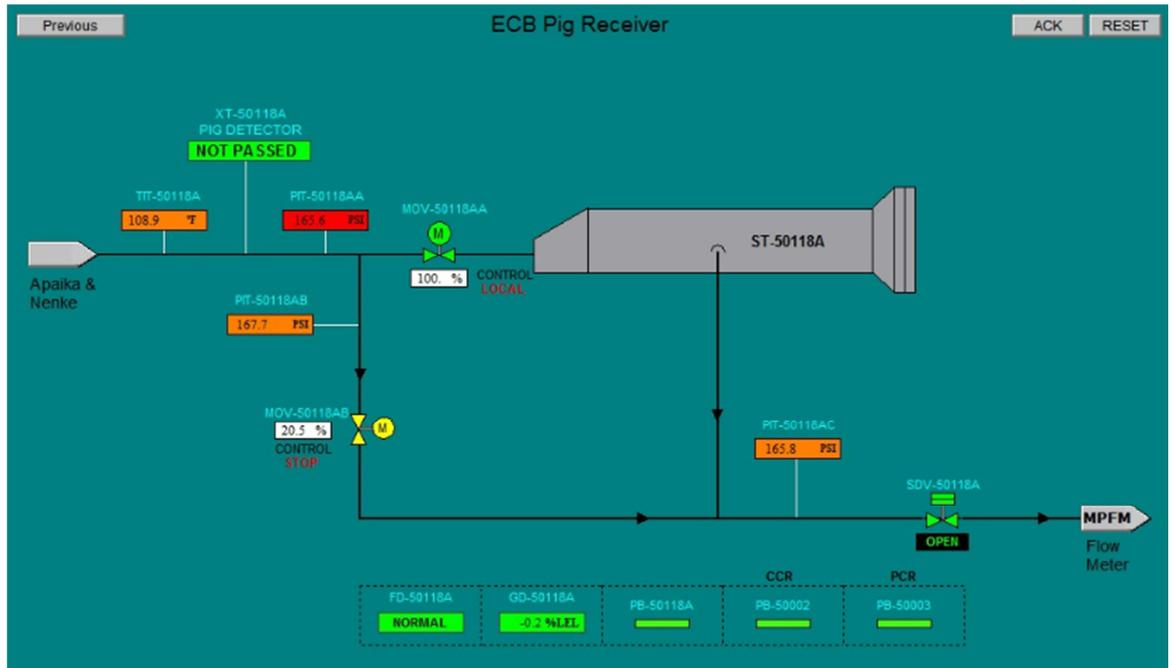
1. Oleoducto Apaika - Nenke - ECB – EPF



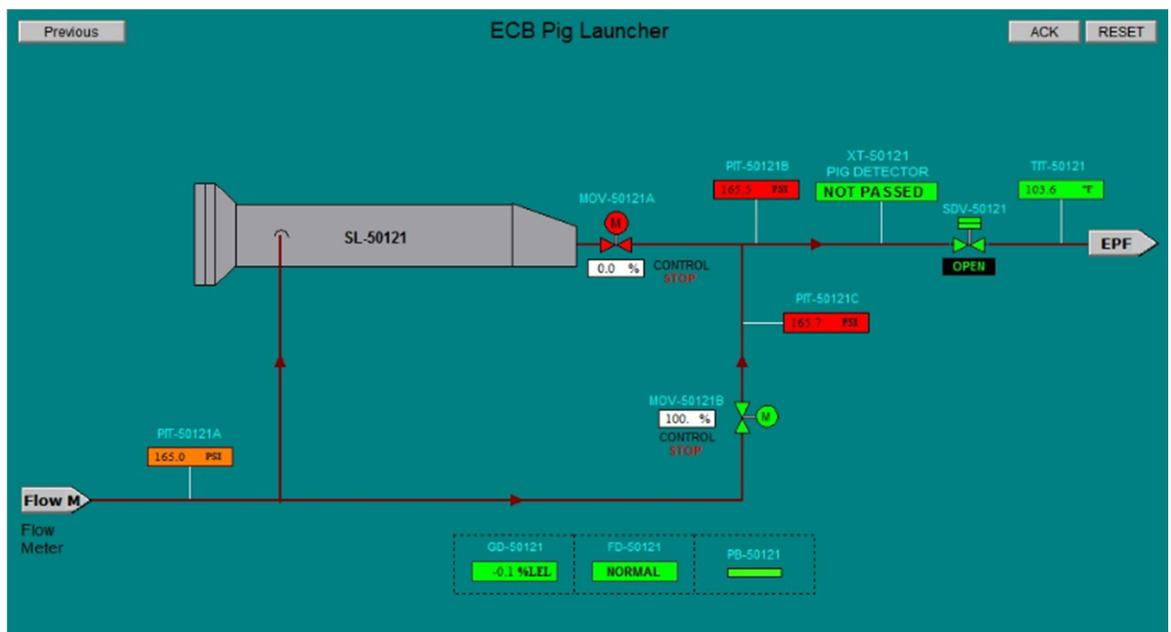
2. Sistema de bombeo multifásico. Salida del fluido



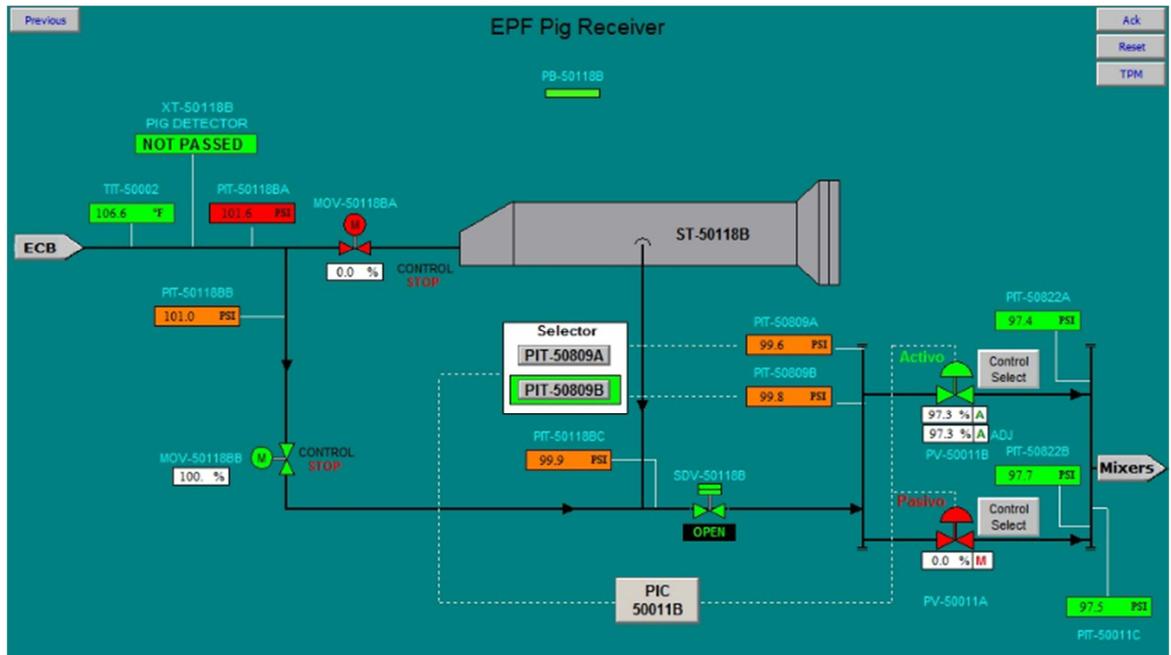
3. Recibidor en estación central de bombeo (ECB). Ingreso del fluido



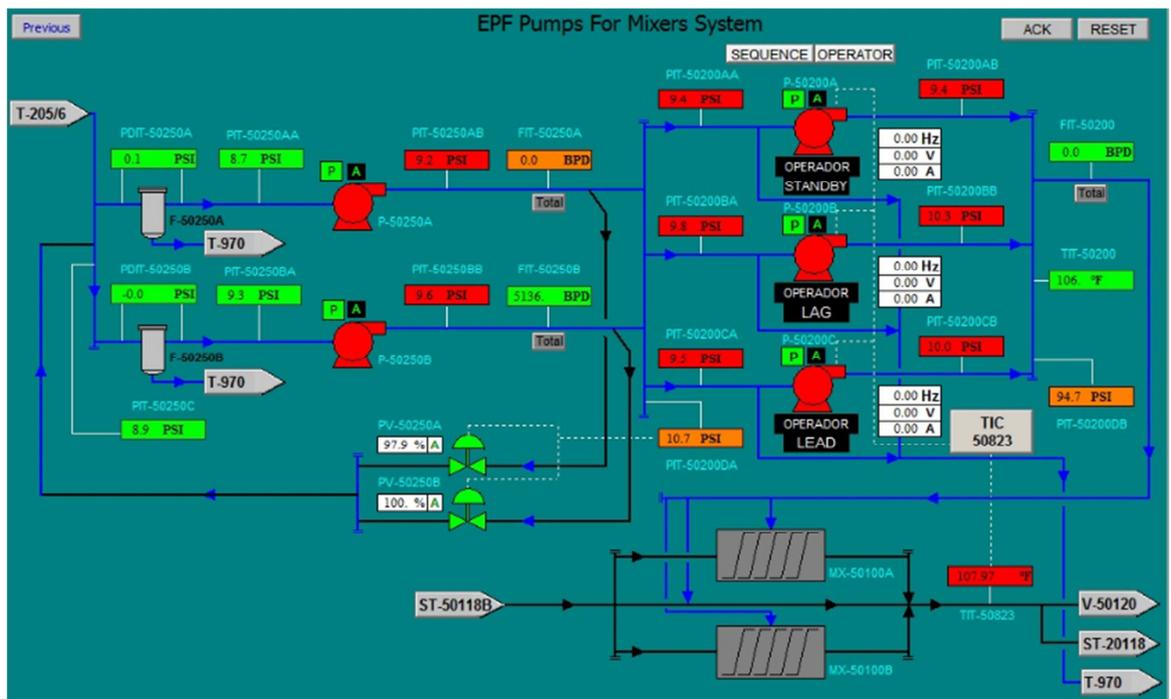
4. Lanzador en estación central de bombeo (ECB). Salida del fluido a EPF



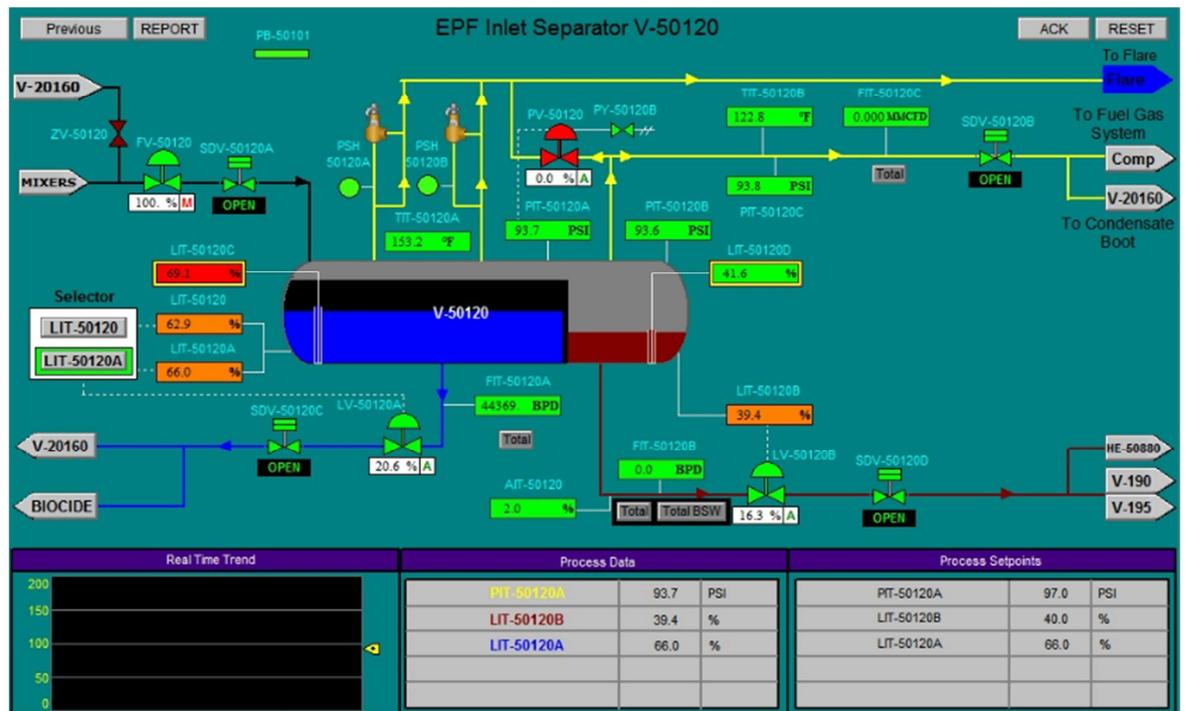
5. Recibidor en la facilidad de producción Edén (EPF). Ingreso del fluido



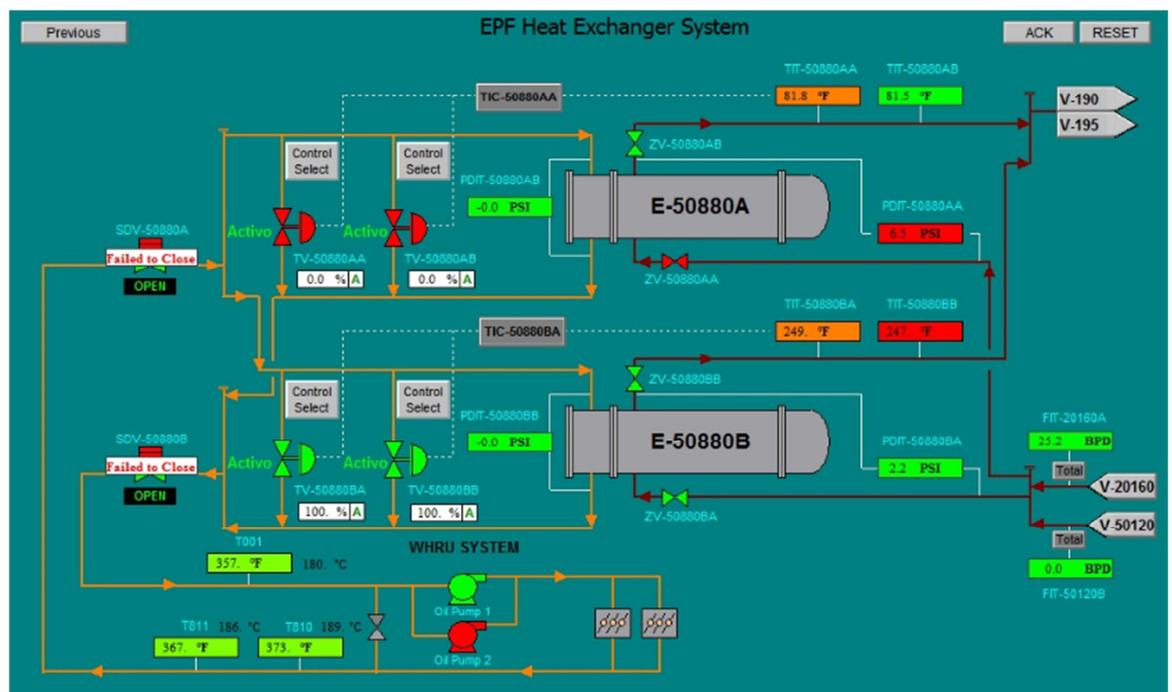
6. Ingreso del fluido a los mixer's para incremento de temperatura mediante la mezcla del agua de producción de mayor temperatura. 1era. fase



7. Ingreso del fluido incrementado la temperatura a separador V-50120



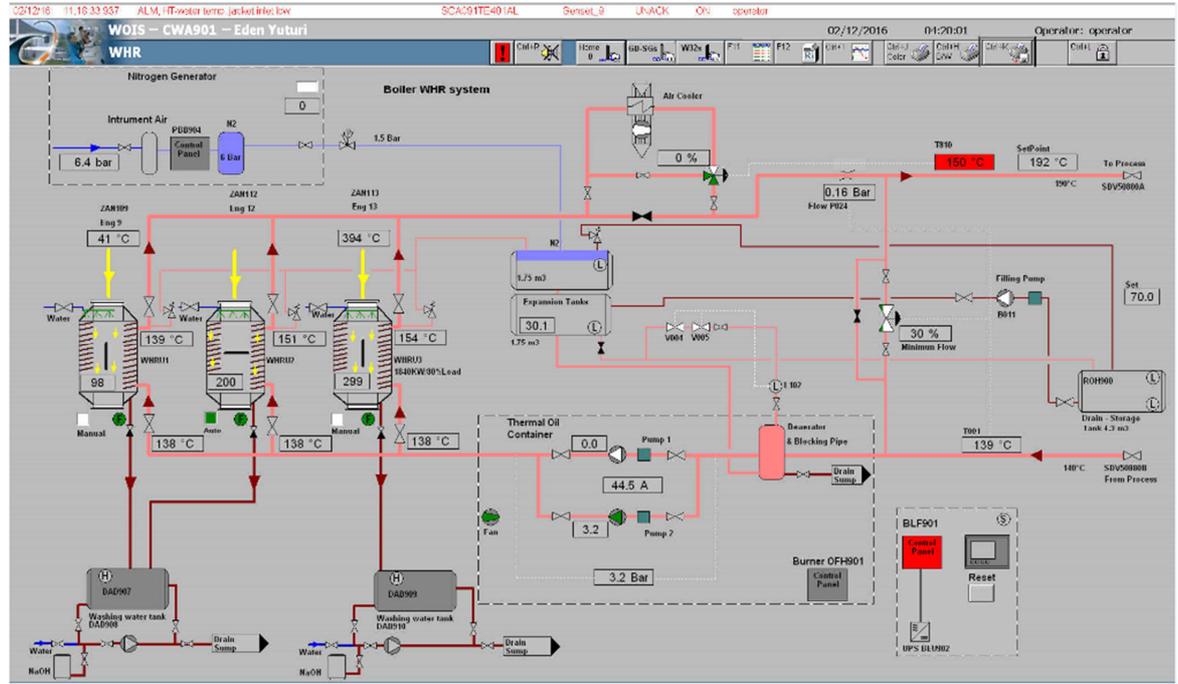
8. Salida de petróleo crudo semitrado del V-50120 e ingreso a intercambiadores de calor crudo-aceite térmico (hot oil). 2da. fase



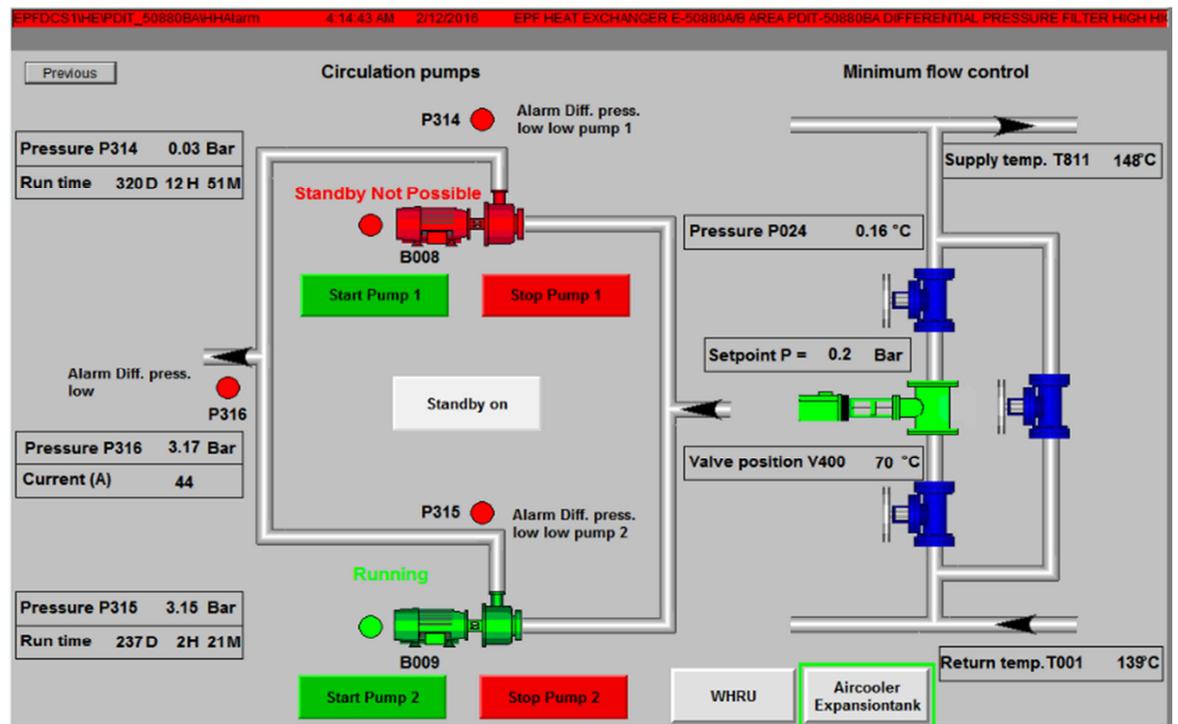
ANEXO 4

Sistema de recuperación de calor (WHRU)

1. Calentamiento de aceite térmico



2. Sistema de bombeo de aceite térmico (WHRU)



ANEXO 5

Estructura de la aplicación informática para la obtención de la temperatura óptima de transporte del fluido multifásico

```
prompt={'Rango de temperatura de bombeo (°C)', 'Temperatura de
entrada en el intercambiador de calor (°C)', ...
'Radios de la tubería (m) [ro r1 rt]', 'Costo del aporte de
calor ($/kg)', 'Tiempo de trabajo (horas/año)', ...
'Índice de flujo', 'Diámetro de tubería (m)', 'Flujo
volumétrico(m^3/s)', 'Longitud de la tubería (m)', ...
'Altura geodésica (m)', 'Costo de energía eléctrica
($/kW.h)', 'Rendimiento de la bomba y el motor [Rb Rm]', 'Número de
codos', ...
'Conductividad térmica de la tubería, aislante, protector
(W/m.°C) [ka kb]', ...
'temperatura de la tierra (°C)', };
name='Entrada de datos';
numlines=1;
def={'29:0.01:70', '29', '[0.15 0.153 0.178
0.1795]', '0.017', '7042.3', '0.92', '0.3', '0.05', '1000', '6', '0.09', '[
0.74 0.95]', '1', ...
'[ 60.5 0.035]', '27'};
Datos=inputdlg(prompt,name,numlines,def);
Tbo = str2num(Datos{1}); Te = str2double(Datos{2}); RT1
= str2num(Datos{3}); r0 = RT1(1); r1 = RT1(2); rm = RT1(3);
Cat = str2double(Datos{4}); Tt = str2double(Datos{5}); n =
str2double(Datos{6}); D = str2double(Datos{7}); Q =
str2double(Datos{8});
Lt = str2double(Datos{9}); Dz = str2num(Datos{10}); Ce =
str2double(Datos{11}); ren = str2num(Datos{12}); Rb = ren(1); Rm =
ren(2);
Ncod = str2double(Datos{13}); cond = str2num(Datos{14}); ka =
cond(1); kb = cond(2); kc = cond(3);
Tt = str2double(Datos{16});
%
=====
=====
a=1.75;
b=0.03;% coeficientes del índice de consistencia másica.
A1=0.14;
B1=0.2; % coeficientes de fricción de mezcla.
Ai= 0.0326; % coeficiente de proporcionalidad del intercambiador
de calor.
g = 9.81; % gravedad (m/s^2)
Kbo = a*exp(-b*Tbo);
Densbo = - 2.91*log(Tbo)+ 914.4; % Densidad bombeo(kg/m^3)
Rebo = (8^(1-n)*D^n*Densbo*(4*Q/(pi*D^2))^(2-
n))*(4*n/(3*n+1))^n./Kbo; % Reynolds de bombeo(adim.)
%=====
=====
% Propiedades del fluido multifásico.
kp = (-0.13*Tbo+149.1)*0.001;
cp = 8.56*Tbo+1483;
vp = 4*Q/(pi*D^2);
vip = (3*n+1/n)*(8*vp/D)^-0.075;
Prp = cp*vip/kp;
```

```

%=====
=====
hp = 0.023*Rebo.^0.8*Prp^0.3.*kp./D; % Coeficiente de convección
del fluido
Pcal = (1./(1/r0*hp))+ log(r1/r0)/ka + log(r2/r1)/kb +
log(rt/r2)/kc;
Tf = Tbo - 2*pi*Lt*(Tbo - Tt)./(Q*Densbo.*cp.*Pcal);
Final=====
=====
Kf = a*exp(-b*Tf);
Densf = - 7.62*log(Tf)+ 1012; % Densidad promedio de transporte
kg/m^3)
Ref = (8^(1-n)*D^n*Densf*(4*Q/(pi*D^2))^(2-
n))*(4^n/(3^n+1))^n./Kf; Reynolds de promedio (adim.)
Promedio=====
=====
Tmed = (Tbo + Tf)/2;
Kmed = a*exp(-b*Tmed);
Densmed = - 7.62*log(Tmed)+ 1012; % Densidad promedio de
transporte (kg/m3)
Remed = (8^(1-n)*D^n*Densmed*(4*Q/(pi*D^2))^(2-
n))*(4^n/(3^n+1))^n./Kmed; % Reynolds de promedio
Cca1 = Cv*Ai*Tt*3600*(Tbo - Te); % Costo de calentamiento ($/año)
Le=n/(3^n+1))^n*(D/2)^(n+1)*((850./Remed)+(0.199/D^0.22)).*Densmed
./(4*Kmed)*(4*Q/(pi*D^2))^(2-n); % Longitud eq. del codo (m)
L = Le*Ncod+Lt;
Nn=2*Kmed.*L*((3^n+1)/n^4/(pi*D^2))^n*(2*Q/D)^(n+1)+(8*A1*L.*Densm
ed*Q^3)./(Remed.^B1*D^5*pi^2)+Densmed*g*Dz*Q +...
(Densf-Densbo)*16*Q^3/(pi^2*D^4);
Cca2 = Ce*Tt*Nn/(Rb*Rm)*1e-3;
Cca3 = 22.44*D^0.147;
Cca4 = (Cca3+0.36*Cca3)/12;
Ccatotal=Cca1+Cca2+L*Cca4;
plot(Tbo,Cca1,Tbo,Cca2,Tbo,Ccatotal),grid
error = 0.01;
for I = 1:length(Cca1)
    if Cca1(I) - Cca2(I) <= error
        Ccalculo1 = Cca1(I);
        Ccalculo2 = Cca2(I);
        Tbl = Tbo(I);
    end
end
%=====
=====
[Ccamin No]= min(Ccatotal);
xlabel('Temperatura (°C)')
ylabel('Costo ($/año)')
Tbmin = Tbo(No);
title([' Temperatura racional = ',num2str(Tbmin),' ° C; Costo
total =
num2str(Ccamin),' $/año'])
%=====
=====

```