



MINISTERIO DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD METALÚRGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

*Título: Investigación de las propiedades de transporte del crudo mejorado 650
utilizado en la termoeléctrica de felton “Lidio Ramón Pérez”.*

Autor: Daniel Montero Romero

Tutor: M. Sc. Héctor L. Laurencio Alfonso

*Moa – 2009
Año del 50 aniversario del triunfo de la revolución*

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Moa, 26 de Junio de 2009

Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución

Yo **Daniel Montero Romero**, autor del Trabajo de Diploma titulado: **Investigación de las propiedades de transporte del crudo mejorado 650 utilizado en la termoeléctrica de felton "Lidio Ramón Pérez"**. y el tutor M. Sc. Héctor L. Laurencio Alfonso certificamos la propiedad intelectual y la calidad del mismo a favor del Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Para que así conste firmamos la presente

Autor: **Daniel Montero Romero**

Tutor (es): **M. Sc. Héctor L. Laurencio Alfonso**

Pensamiento

Ni el entusiasmo, ni la disciplina, ni el espíritu de sacrificio, ni el trabajo al máximo, pueden concentrarse en una gran obra, si no hay también conocimientos técnicos donde asentarse.

CHÉ

Dedicatoria

Este trabajo en opción al título de Ingeniero Mecánico esta dedicado principalmente a la persona a la que le debo todo lo que hoy represento, la cual es merecedora de todo mi amor y cariño **Delis Maura Romero Grimón** (mi madre). También se lo dedico a mi padre y mis hermanos que siempre me han apoyado y han confiado en mí en todo momento, al igual que a mis demás familiares.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que de una forma u otra han contribuido en la realización de este trabajo de diploma, a mi tutor que fue el que posibilitó la correcta realización de este trabajo, a mis compañeros de aula por su ayuda, a mi familia por su apoyo, a todos los que confiaron en mí y me dieron ánimo para seguir adelante y a la revolución por esta oportunidad de estudiar hasta alcanzar este nivel.

Resumen

En el presente trabajo se realizó el estudio de las propiedades de transporte del crudo mejorado 650, utilizado en la termoeléctrica "Lidio Ramón Pérez" de Felton, para el mismo se hizo necesario poseer, la composición química del fluido en estudio para luego proceder a la obtención por experimentación de las características reológicas del crudo; esta se llevo a cabo en la instalación de compresores situada en el ISMM, la cual posee un reómetro de tubo capilar, donde se obtuvo como conclusión que el petróleo en estudio se ajusta al modelo de potencia. Se necesito el conocimiento de la descripción de la instalación de felton, así como la cantidad de accesorios y elementos que garantizaran la unión de las partes que componen la misma, para con esto efectuar el cálculo de las caídas de presión existentes en la instalación, las cuales nos permiten determinar la potencia que se necesita para el trasiego del petróleo.

Además esta presente un análisis del efecto económico que presenta el transporte del crudo en la instalación y se hizo referencia al impacto ambiental que ejerce este, principalmente el impacto ocasionado en el ser humano.

Abstract

Presently work was carried out the study of the estates of enhanced transport of the raw one 650, used in the thermoelectric "Lidio Ramón Pérez" of Felton, for the same one it became necessary to possess, the chemical composition of the fluid in study stops then to proceed to the obtaining for experimentation of the characteristic reological of the raw one; this you carries out in the installation of compressors located in the ISMM, which possesses a reometer of capillary tube, where it was obtained as conclusion that the petroleum in study is adjusted to the pattern of power. One needs the knowledge of the description of the Felton installation, as well as the quantity of accessories and elements that guaranteed the joinder of parties that they compose the same one, towards this to make the calculation of the existent falls of pressure in the installation, which allow us to determine the power that is needed for the racking of the petroleum.

Also this present an analysis of the economic effect that presents the transport of the raw one in the installation and reference was made to the environmental impact that exercises this, mainly the impact caused in the human being.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
Introducción	1
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1- Introducción	5
1.2- Revisión Bibliográfica	5
1.3- Propiedades generales de los petróleos	9
1.3.1 Composición Química del petróleo	10
1.3.2 Clasificación del petróleo	11
1.3.3 Petróleos cubanos	12
1.4 Factores que influyen sobre el comportamiento reológico	13
1.5 Modelos de viscosidad de la mezcla	15
1.6- Ventajas y deficiencia del transporte de petróleo pesado por tuberías	17
1.6.1 Ventajas de transporte por sistemas de tuberías	18
1.7 Influencia de la viscosidad en las características de trabajo de las bombas	19
1.7.1 Principio de funcionamiento de las bombas de engranajes	21
1.8 Descripción del flujo tecnológico de la instalación de felton	22
1.9 Conclusiones del capítulo	23
CAPÍTULO II INVESTIGACIÓN TEÓRICA PARA EL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO PESADO	24
2.1 Introducción	24
2.2 Modelos reológicos de los fluidos	24
2.2.1 Curvas de flujo	28
2.3 Modelación del gradiente de presión en tuberías	29
2.4 - Descripción de la instalación experimental "Reometro"	32
2.4.1- Funcionamiento del reómetro	33
2.5 Características generales del crudo mejorado 650	35
2.6 Procedimiento estadístico para análisis de datos	36
2.7 Conclusiones del capítulo	37
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	38
3.1- Introducción	38
3.2- Análisis de la influencia de la temperatura, presión y el volumen en la propiedades reológicas del crudo mejorado 650.	38
3.3- Características de la bomba de engranaje	42
3.4- Efecto económico de transporte	45
3.4.1 Costo unitario del consumo energético para transportar el crudo mejorado 650	47
3.5 Impacto Medioambiental	49

3.6	Conclusiones del capítulo	50
	Conclusiones Generales	51
	Recomendaciones	52
	Bibliografía	53

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el transporte de líquidos y gases a través de conductos tubulares cerrados es muy común, como consecuencia de los adelantos de la tecnología industrial. Desde el siglo XIX se han aplicado métodos de transporte en conductos tubulares, a distancias cada vez mayores.

El estudio del flujo multifásico a través de un conducto, es una de las combinaciones de flujo más complejas que existen. Esto se debe principalmente a la gran variedad de configuraciones relacionadas con la distribución espacial de fases en la tubería.

La planta termoeléctrica de felton “*Lidio Ramón Pérez*” forma parte de una de las principales generadoras de corriente en nuestro país, la cual se encuentra enfrascada en el proceso de reducción del consumo de portadores energéticos es por ello que el aprovechamiento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones inciden considerablemente en la disminución de los costos en la producción.

Un papel importante en el proceso lo realiza la instalación de bombeo de petróleo que tiene como objetivo trasportar el *crudo*, desde el tanque de almacenamiento hasta la primera etapa de bombeo (que además posee retorno) manteniendo una presión constante de 0.45 MPa hasta la succión de la segunda etapa de bombeo. Esta última etapa mencionada eleva la presión a 3.2 MPa hasta los quemadores de las calderas.

La instalación constituye una unidad completa incluyendo los elementos fundamentales de funcionamiento como son bomba, intercambiador de calor, equipo de valvulerías, además tienen dispositivos interiores (serpentín) y exteriores (calentador) para el calentamiento del combustible, siendo esta la característica principal por las ventajas que ofrece para el transporte del fluido a lo largo de todo este proceso.

La eficiencia de este tipo de transporte, depende en gran medida de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y en los accesorios que esta posee; como también de su diámetro, su estado de explotación, tecnología, el régimen de trabajo de la instalación y de las propiedades del fluido a transportar.

Estos factores tienen distintos grados de influencia y son muy variables e inciden con diferentes magnitudes, tanto en los indicadores económicos como en la eficiencia de bombeo del líquido. Cualquier estudio encaminado a caracterizar la instalación de transporte petróleo ya antes planteada implicaría el análisis de estos factores en el proceso. La necesidad de conocer las posibilidades reales de la instalación, justifican realizar la caracterización de la misma.

Por otra parte, se encuentra la **problemática** de que las teorías para la determinación de las viscosidades, 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 líquido que se trate.

Dada la situación planteada, se resume que, existe desconocimiento de las propiedades de transporte del petróleo crudo cubano (CM 650), dificultando la correcta selección y diseño de los sistemas de transporte de estos combustibles; conduciendo al aumento del consumo energético e ineficiencia en las instalaciones de transporte del petróleo, dada por las inexactitudes de los métodos de cálculos utilizados; requiriéndose una investigación que permita aportes y mejoras de los métodos e índices técnicos económicos de los sistemas, al igual que la realización de un análisis que nos muestre las pérdidas que presenta toda la instalación en su conjunto.

El ajuste de modelos matemáticos que representen el comportamiento de flujo y fenómenos físicos de los sistemas, la simulación con técnicas modernas de sus características y la implementación de nuevas tecnologías es el punto de partida para la eficiencia energética de esta rama en el sector industrial.

El **problema** a investigar lo constituye:

Desconocimiento de las principales propiedades del crudo mejorado 650 y los factores que inciden sobre este en su trasiego, lo que imposibilita realizar una correcta evaluación del sistema de transporte.

Se establece como **objeto de la investigación**:

El **Petróleo crudo mejorado 650**.

Dado el problema a resolver se plantea la siguiente: **hipótesis:**

Mediante la obtención de las propiedades reológicas del crudo mejorado 650, es posible seleccionar los modelos que respondan con el comportamiento fenomenológico de flujo para el transporte por tubería.

Se define como **objetivo del trabajo:**

Obtener las propiedades de transporte del crudo mejorado 650, que permita ajustar las ecuaciones correspondientes para la evaluación y diseño de instalaciones que transporten este combustible.

Para cumplir el objetivo central, se desarrollaron los siguientes **objetivos específicos:**

- Obtener las características del petróleo desde el punto de vista químico y reológico; estableciendo la influencia de estos factores sobre su comportamiento.
- Realizar el estudio reológico, análisis de la influencia de la temperatura y el gradiente de velocidad en la viscosidad, proponiendo un modelo que relacione la temperatura y el gradiente de velocidad en la viscosidad.
- Ejecutar la experimentación del gradiente de presión; así como la potencia necesaria del fluido (como modelo matemático que corresponda a las propiedades reológicas del fluido).
- Analizar la pérdida de energía en el transporte del crudo en la primera etapa de bombeo.

De acuerdo al objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo:**

- Análisis de las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para el cálculo de las pérdidas de presión al ser aplicadas al crudo mejorado 650.
- Obtención de los parámetros reológicos del CM 650.
- Obtención por experimentación del gradiente de presión, así como la potencia necesaria del fluido a transportar.

- Análisis de las incidencias, económico y medioambiental del sistema de transporte de crudo mejorado 650 de la central termoeléctrica de felton "Lidio Ramón Pérez".

MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 – Introducción

En el presente capítulo se realizara el análisis de temas relacionados con el objeto de estudio, lo cual nos permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que existen entre las investigaciones realizadas; asimismo se introducirán los conceptos de reología, necesarias para el desarrollo del trabajo de investigación y experimentación. Además, se explican las características principales de los petróleos, su composición y clasificación.

En tal sentido el objetivo del capítulo es:

Analizar las principales teorías existentes relacionadas con las propiedades de transporte de fluidos no newtonianos.

1.2 – Revisión Bibliográfica

Diversos han sido los estudios ejecutados sobre la problemática relacionada con el trasiego de fluidos con distintas características reológicas y la relación de la densidad, viscosidad, temperatura entre otras. Estos se han realizado a pesar de ya haber sido planteado con anterioridad la sita expuesta por D’Alambert 1744, “La teoría de los fluidos deberá basarse necesariamente en la experimentación”, se demostró que en un cuerpo que se mueve a través de un fluido ideal (no viscoso o invíscido), no existe resistencia que se oponga al movimiento del mismo, pero es obvio que esta conclusión no puede aplicarse a los cuerpos que se mueven a través de fluidos reales. Esta discrepancia entre la teoría y el experimento, que se denominó la paradoja de D’Alambert, ha sido ya resuelta. No obstante, demuestra con claridad las limitaciones de la teoría de esa época para la resolución de problema sobre fluidos.

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la hidráulica 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 lo que lo llevó al campo de la hidráulica. Además de los científicos anteriores que desarrollaron sus trabajos en Francia, sobresalieron también en Alemania Julios weibach y Gottlieb

Hagen. Durante esa época, y en el aspecto teórico se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Venturi Pitot entre otros.

En Cuba no comienza un desarrollo de los estudios hidráulicos sino hasta después de la revolución en que dichos estudios constituyen una de las bases principales del progreso científico técnico de nuestro país.

En el desarrollo de la investigación se han consultado diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica ha estado dirigida fundamentalmente en la siguiente línea:

- La información relacionada con el enfoque teórico – metodológico, sobre el tema de fluidos no newtonianos, desde el punto de vista de la caída de presión la reología de estos fluidos.

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 de fluidos. Trabajos como (De la Paz et al., 2002), realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones sufridas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la de fluidez cómo se deforma el cuerpo al ser sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas, así como la determinación de sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de deformación ensayadas. La formulación diseñada resultó estable físicamente, al menos, bajo las condiciones y circunstancias experimentales en que se ensayo, se encuentra como deficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para variaciones de temperaturas; siendo esta perturbación, de gran influencia en la estructura y propiedades de los fluidos.

A partir de los trabajos descritos por Caldiño et al. (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos. Se corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observó y evaluó la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuyó en forma significativa a este incremento; se pudo tener

en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas como, (pH) y diámetro medio de las partículas de arena, lo que no se tiene en cuenta.

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, entre otros aspectos (Ibarz et al., 2001), (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971); (Foust et al., 1980); (Macedo et al., 2001). La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y poco trabajo se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe et al., 1986); (Ibarz et al., 2001); (Vélez, 2003); (Perona, 2003); (Sablani et al., 2003).

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama et al. (1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham. En un estudio realizado por García y Steffe (1987), se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia o umbral de fluencia (t_0) en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron al índice de flujo, y a los números de Reynolds y Hedstrom. Banerjee et al. (1994), determinaron de forma experimental la pérdida de presión (ΔP) en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm; involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo pseudoplástico generalizado (Re) y los diferentes grados de abertura (δ). Izquierdo en su trabajo (1989), sobre la determinación de los parámetros y regímenes de hidrotransporte de mineral laterítico aplicable a las condiciones del proceso productivo de la Empresa comandante Pedro Soto Alba determinó las propiedades físico – mecánicas de las hidromezclas, formuló el modelo físico – matemático del flujo de las pulpas lateríticas; comprobó que durante el flujo dependiendo de la velocidad de las pulpas y de la concentración del sólido, se presentan los regímenes estructural, transitorio y turbulento, obtuvo las dependencias para determinar el coeficiente de

resistencia hidráulica para el movimiento del régimen estructural y las pérdidas hidráulicas durante el movimiento de la hidromezcla en régimen turbulento.

Liu et al. (1998), realizaron el análisis teórico y la modelación del transporte de fluidos no newtonianos (del tipo Herschel-Bulkley, Meter y Cross), tanto en conductos como a través de medios porosos, involucrando tres factores de forma y la viscosidad como necesarios para evaluar las caídas de presión durante el flujo.. Perona (2003), reportó los resultados obtenidos en la transición de régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidos, considerando que las discrepancias observadas en su estudio, pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Placencia et al. (2000). formulan emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto, además se realizan pruebas de reología a diferentes condiciones de concentración de tensoactivo, temperatura y tiempo de almacenamiento. Finalmente para pruebas de flujo, se estudia el comportamiento de la emulsión con el 1% en peso de tensoactivo al ser transportada por una tubería de 1 pulgada.

Mechetti et al. (2000) 1; Mechetti et al.(2000) 2, presentan resultados inéditos en sus estudios de comportamiento reológico de crudos asfálticos bajo la acción de campos eléctricos. Investigando el comportamiento viscosimétrico de un crudo argentino de baja viscosidad con 7% pp. de contenido de asfaltenos, encuentran una dilatancia atípica para un crudo de baja viscosidad relativa y también una anomalía termorreológica (mayor viscosidad para una mayor temperatura). La dilatancia se explica en la literatura por la presencia de partículas cargadas en suspensión coloidal, lo que podría adjudicarse, en este caso, a la presencia de asfaltenos.

Columbie (2006), presenta un estudio relacionado con el transporte de fuel oil desde Mazut hasta la planta de Preparación Mineral, perteneciente a la empresa "Ernesto Che Guevara", obteniendo como resultado que el mismo presenta un comportamiento no Newtoniano cuando posee una temperatura de hasta 70 °C y a temperaturas superiores el índice de flujo toma valores de ($n = 1$), dando una medida del grado de comportamiento Newtoniano del fluido siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad , observo que la mayor perdida por coeficiente de resistencias total es debido a la alta caída de presión en la válvula reguladora presente en uno de los tramos de la instalación .

Saldás (2008), realiza un estudio para la determinación de las propiedades de transporte del Petróleo Mesa-30, destilado en la refinería “Nico López”, presentado como resultado del estudio que el mismo presenta un comportamiento pseudoplástico, cumpliendo con la ley de potencia y ajustándose con el modelo de *Ostwald de Waele*, además de presentar un error promedio de 10.92% correspondiéndose este a la validación del modelo para el cálculo de potencia necesaria.

1.3– Propiedades generales de los petróleos

El petróleo es un líquido oleoso bituminoso (color oscuro) de origen natural compuesto por diferentes sustancias orgánicas (es una mezcla de hidrocarburos, aunque también suelen contener unos pocos compuestos de azufre y de oxígeno). Es, como el carbón, un combustible fósil. También recibe los nombres de petróleo crudo, crudo petrolífero o simplemente "crudo". Aunque se trata de un líquido aceitoso de color oscuro, es considerado una roca sedimentaria.

El petróleo se forma a partir de restos de pequeños organismos marinos que viven en cantidades enormes en mares cálidos y poco profundos. Si al morir estos organismos son rápidamente enterrados por sedimentos, fermentarán. Pasados millones de años, bajo la presión de nuevas capas de sedimentos, los restos orgánicos se transformarán en petróleo. El proceso comenzó hace muchos millones de años, cuando surgieron los organismos vivos en grandes cantidades, y continúa hasta el presente

Se encuentra en grandes cantidades bajo la superficie terrestre, en los estratos superiores de la corteza terrestre. Esto se debe a que el petróleo tiende a escapar a zonas más altas en las que soporta menos presión. En este viaje, Con frecuencia acaban encontrando un esquisto impermeable o una capa de roca densa y se acumula, ya que son determinadas zonas de las que no puede salir: son las trampas. En otras ocasiones consigue alcanzar la superficie. Cuando ocurre esto el petróleo se volatiliza dejando un residuo de asfalto y betún. No es de extrañar, por tanto, que fuese conocido ya por las antiguas civilizaciones. Los egipcios utilizaban el betún para impermeabilizar los barcos y para embalsamar las momias. Sin embargo, tan sólo desde finales del siglo XIX viene utilizándose a gran escala como combustible.

1.3.1– Composición Química del petróleo

En una mezcla muy compleja de composición variable, de hidrocarburos de muchos puntos de ebullición y estados sólido, líquido y gaseoso, que se disuelven unos en otros para formar una solución de viscosidad variable.

Contiene:

- Hidrocarburos saturados o parafinas.
- Hidrocarburos etilénicos u olefinas.
- Hidrocarburos acetilénicos.
- Hidrocarburos cíclicos ciclánicos.
- Hidrocarburos bencénicos o aromáticos.
- Compuestos oxigenados (derivados de hidrocarburos etilénicos, por oxidación y polimerización).
- Compuestos sulfurados (tiofeno, etc.).
- Compuestos nitrogenados cíclicos (piridina, etc.).

En el petróleo natural, además de hidrocarburos, existen nitrógeno, azufre, oxígeno, colessterina, productos derivados de la clorofila y de las heminas (porfirinas) y, como elementos, trazas, vanadio, níquel, cobalto y molibdeno.

Como consecuencia de los compuestos orgánicos nombrados, el petróleo presenta polarización rotatoria, lo cual revela claramente que se trata de un compuesto de origen orgánico, formado a partir de restos animales y vegetales.

La composición química del petróleo es muy variable, hasta el punto de que los cuatro tipos fundamentales de hidrocarburos: parafinas (hidrocarburos saturados), olefinas (hidrocarburos insaturados), naftenos (hidrocarburos cíclicos saturados o cicloalcanos), e hidrocarburos aromáticos, no solamente son diferentes de un yacimiento a otro, sino también las diversas sustancias que es preciso eliminar más o menos completamente: gas, azufre (que junto con el sulfhídrico, mercaptanos y tioalcoholes pueden alcanzar un 3%), agua más o menos salada, compuestos oxigenados y nitrogenados, indicios o vestigios de metales etc.

Un análisis en el laboratorio proporciona primeramente indicaciones sobre la cantidad y calidad de los productos acabados que se pueden extraer del petróleo crudo:

- alta tensión de vapor, revela la presencia de gas.
- alta densidad y viscosidad, indican una reducida proporción de gasolina o un contenido importante de betún o parafina.

1.3.2 – Clasificación del petróleo

La clasificación del petróleo se basa en la clase de hidrocarburos que predominan en el petróleo crudo:

Petróleo de base parafínicas

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

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/lt).
- Por destilación producen un abundante residuo de asfalto. Las asfaltitas o rafealitas argentinos fueron originadas por yacimientos de este tipo, que al aflorar perdieron sus hidrocarburos volátiles y sufrieron la oxidación y polimerización de los etilénicos.

Petróleo de base mixta

- De composición de 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.

A su vez la composición de los hidrocarburos que integran el petróleo varía según su lugar de origen:

1. Petróleos americanos: hidrocarburos de cadena abierta o alifáticos.
2. Petróleos de Pensilvania: hidrocarburos saturados (alcanos de nº de C = 1 a 40).
3. Petróleos de Canadá: hidrocarburos no saturados.
4. Petróleos rusos: hidrocarburos cíclicos, con 3, 4, 5, ó 6 átomos de carbono en cadena abierta o cerrada.

1.3.3- Petróleos cubanos

En nuestro país, en los procesos de combustión de los generadores de vapor, se han utilizado diferentes clases de petróleo, obtenidos a partir del petróleo crudo, mezclado con otras sustancias para el mejoramiento de sus propiedades, que inciden en el proceso de combustión.

Estas clases son:

1. FC 900-Esta compuesto por crudo cubano mezclado con fuel oil de alto contenido de vanadio con una proporción 55-45 y un dispersante de asfaltenos a 100 ppm (este combustible comenzó a producirse en el año 1996).
2. Crudo mejorado 650 (CM-650).
3. Crudo mejorado 1100 (CM-1100).
4. Crudo mejorado 1400 (CM-1400).

Los crudos mejorados 650, 1100 y el 1400 son obtenidos al mezclar petróleo crudo con nafta y un dispersante de asfaltenos a 100 ppm. (estos combustibles comienzan a fabricarse a partir del año 1997).

Los números que representan a cada uno de estos combustibles definen la viscosidad en CentiSto (cSt) a 50 °C.

Las características Físico-Química del combustible mejorado CM-650 serán expuestas en el capítulo II, las cuales nos mostraran como las características físicas químicas de los combustibles cubanos varían considerablemente, por lo que éste se caracteriza como un combustible de baja calidad. Estas características traen múltiples dificultades en los generadores de vapor, que van desde su preparación, manipulación y quema, hasta las consecuencias que pueden traer en el modo de operación, la velocidad de ensuciamiento, la aerodinámica y la carga térmica de estos.

Para tener una idea más amplia del comportamiento de las características de estos combustibles, se hará una representación gráfica expuesta en los anexos, referente a diferentes crudos y para el fuel oil utilizado actualmente en la generación de electricidad donde se mostrarán los rangos de variación de estas características.

En los gráficos (anexos I, II y III) se muestra el comportamiento de algunas características fundamentales del Crudo Varadero, (combustible extraído de los pozos de Varadero y utilizado para preparar las mezclas CM-650, CM-1100 y CM-1400), Crudo Jaruco, (combustible extraído de los pozos de Jaruco y utilizado para preparar las mezclas CM-650, CM-1100 y CM-1400) el FC-900 y el Fuel – Oil para sus valores máximos, mínimos y promedio.

1.4– Factores que influyen sobre el comportamiento reológico

La viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no está muy afectada para valores moderados de la misma; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, este último 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, (Costa, 1984).

- Efecto de las propiedades superficiales

En las suspensiones coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeñan un papel muy importante. Ello se debe, fundamentalmente, a que el comportamiento reológico es afectado grandemente por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, ya que estas variables, influyen sobre la interacción neta entre las partículas.

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por las fuerzas de atracción del Van der Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales. El componente repulsivo, se debe a las fuerzas repulsivas eléctricas, que rodean a las partículas (repulsión de Born).

Cuando la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados

repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A pH alejado del i.e.p., son más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostático entre las partículas.

1.5 – Modelos de viscosidad de la mezcla

Debido a la diferencia notable entre la viscosidad del líquido y la viscosidad del gas, generalmente se establecen los modelos en términos de la fracción volumétrica del líquido sin deslizamiento λ_L , la fracción del flujo másico x . En la Tabla 1.1, se representan las ecuaciones más utilizadas para evaluar la viscosidad de la mezcla μ_M , donde ρ_L y ρ_G son las densidades del líquido del gas, respectivamente; μ_L y μ_G son las viscosidades del líquido y del gas, respectivamente; y m_L m_G son los flujos másicos de gas y de líquido, respectivamente (Haoulo et al.,2005).

Tabla1.1. Ecuaciones de la viscosidad de la mezcla.

Arrhenius(1887)	$\mu_M = \mu_L^{\lambda_L} \mu_G^{(1-\lambda_L)}$
Cicchitti et al.(1960)	$\mu_M = \mu_G \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_M} + \mu_L \left[1 - \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_M} \right]$
Bingham(1906)	$\mu_M = \left[\frac{\lambda_L}{\mu_L} + \frac{(1-\lambda_L)}{\mu_G} \right]^{-1}$
Bankoff(1960)	$\mu_M = H_L \mu_L + (1-H_L) \mu_G$
Einstein(1909-1911)	$\mu_M = \mu_L (1 + K \lambda_L)$
Dukler et al.(1964)	$\mu_M = \mu_L \lambda_L + \mu_G (1-\lambda_L)$
Hatshek(1928)	$\mu_M = \frac{\mu_L}{1 - \lambda \sqrt{\lambda_L}}$
Cengel(1967)	$\mu_M = \mu_L (1 + 2.5 \lambda_L - 11.01 \lambda_L^2 + 52.62 \lambda_L^3)$
Taylor(1932)	$\mu_M = \mu_L \left(1 + 2.5 \left(\frac{\mu_G + 0.4 \mu_L}{\mu_G + \mu_L} \right) \lambda_L \right)$
Soot(1971)	$\mu_M = \mu_L \left[1 + \lambda \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} - 1 \right) \right]^{\left(1 - \frac{1}{\mu} \right)}$
Richardson (1933)	$\mu_M = \mu_L \exp(K \lambda_L)$

Oliemans(1976)	$\mu_M = \frac{\mu_L \lambda_L + \mu_G (1 - H_L)}{1 - \beta}; \beta = H_L - \lambda_L$
McAdams et al. (1942)	$\frac{1}{\mu_M} = \frac{1}{\mu_G} \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_M} + \frac{1}{\mu_L} \left(1 - \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_M} \right)$
Oglesby (1979) (Leviton y Leighton)	$\mu_M = \mu_L \exp \left[\left(\frac{\mu_G + 0.4 \mu_L}{\mu_G + \mu_L} \right) (\lambda_L + \lambda_L^{1.667} + \lambda_L^{1.66}) \right]$
Vermeulen(1955)	$\mu_M = \frac{\mu_L}{1 - \lambda_L} \left[1 + \left(\frac{1.5 \mu_G \mu_L}{\mu_L + \mu_G} \right) \right]$
Beattie y Whalley (1982)	$\mu_M = \mu_L (1 - \beta)(1 + 2.5\beta) + \mu_G \beta; \beta = \frac{\rho_1 x}{\rho_1 x + \rho_G (1 - x)}$
Hoogendoorn(1959)	$\mu_M = \mu_L^{\mu_L} \mu_G^{(1 - \mu_L)}$
Forrar y Bories(1994)	$\mu_M = \lambda_L \mu_L + (1 - \lambda_L) \mu_G + 2 \sqrt{\lambda_L (1 - \lambda_L) \mu_L \mu_G}$

En la Tabla 1.2, se plantean las ecuaciones más utilizadas para la evaluación de la densidad de la mezcla ρ_M , donde ρ_L y ρ_G son las densidades del líquido del gas, respectivamente (Haoulo et al.,2005).

Tabla 1.2. Ecuaciones de la densidad de mezcla

Duckler et al. (1964)	$\rho_M = \frac{\rho_L \lambda_L^2}{H_L} + \rho_G \frac{(1 - \lambda_L)^2}{(1 - H_L)}$
Beattie y Whalley(1982)	$\frac{1}{\rho_M} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1 - x}{\rho_L}$
Oliemans(1976)	$\rho_M = \frac{\rho_L \lambda_L + \rho_G (1 - H_L)}{1 - \beta}; \beta = H_L - \lambda_L$
Utilizada por Ouyang(1998)	$\rho_M = \rho_L H_L + \rho_G (1 - H_L)$

Algunas ecuaciones utilizadas para evaluar las propiedades de mezcla requieren conocer la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento, la fracción volumétrica de liquido con deslizamiento se evalúa con el ajuste de la correlación de Eaton et al. (1967) propuesto por García (2004).

1.6 – Ventajas y deficiencia del transporte de petróleo pesado por tuberías

En el mundo del petróleo los oleoductos y los buques tanqueros son los medios por excelencia para el transporte del crudo. El paso inmediato al descubrimiento y explotación de un yacimiento, es su traslado hacia los centros de refinación o a los puertos de embarque con destino a exportación.

La pipe-line de petróleo crudo (oleoducto), es el complemento indispensable y a veces el competidor del navío de alta mar ya que, en efecto, conduce el petróleo del yacimiento situado a una distancia más o menos grande de tierra adentro, al puerto de embarque del yacimiento submarino a la costa más cercana; del yacimiento directamente a la refinería o finalmente, del puerto de desembarco a la refinería.

El transporte de petróleo tiene dos momentos netamente definidos: el primero es el traslado de la materia prima desde los yacimientos hasta la refinería donde finalmente será procesada para obtener los productos derivados; el siguiente momento es el de la distribución propiamente dicha, cuando los subproductos llegan hasta los centros de consumo.

Los oleoductos troncales (o principales) son tuberías de acero cuyo diámetro puede medir hasta más de 40" y que se extienden a través de grandes distancias, desde los yacimientos hasta las refinerías o los puertos de embarque. Están generalmente enterrados y protegidos contra la corrosión mediante revestimientos especiales.

El petróleo es impulsado a través de los oleoductos por estaciones de bombeo, controlados por medios electrónicos desde una estación central, que hacen que el petróleo avance continuamente a 1.5 m/s.

La instalación de oleoductos requiere gran cantidad de estudios previos, en los cuales se tiene en cuenta todo lo que puede acortar o beneficiar el proceso de transporte.

Por caso, la construcción de un oleoducto o gasoducto que puede tener que cruzar montañas, ríos o desiertos, constituye una gran tarea de ingeniería. Hoy por hoy, el

sistema de transporte de hidrocarburos por tuberías resulta tan eficiente y económico que existen miles de kilómetros de ellas.

1.6.1 – Ventajas de transporte por sistemas de tuberías

El transporte por tuberías, consiste en el traslado de un fluido, gas o partículas del mineral suspendas en un flujo de agua a través de una tubería; este tiene una gran aplicación en la industria, 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. En la actualidad en las industrias cubanas se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge este tipo de transporte debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte. Saldás. (2008)

La efectividad de este tipo de transporte crece principalmente debido a la imposibilidad de cambio por otro tipo, la posibilidad de simplificar la longitud de la vía de transporte por tuberías en comparación con el ferroviario y el automotor, debido, al relieve del lugar ante gastos no elevados en la preparación y homogenización de los materiales con una productividad anual de la instalación superior.

El transporte por tuberías de materiales líquidos, sólidos y gases en comparación con el transporte ferroviario, los transportadores y la vía automotriz está determinada por las significativas ventajas que éste presenta sobre los demás tipos de transporte:

- Garantiza un proceso tecnológico continuo disminuyendo considerablemente el volumen de las operaciones principales.
- Ausencia de formación de polvo.
- Facilidad en la variación a la dirección y superación de obstáculos.
- Ausencia de vías de transporte especiales.
- Eleva la productividad del trabajo.

- Poca necesidad en servicio personal
- Posibilita la automatización de todo el proceso de transportación.
- No existen pérdidas del material durante su transportación.
- Las instalaciones y equipos principales son pequeños y de poco peso.
- El material puede ser beneficiado simultáneamente durante su transportación.

La desventaja principal de este tipo de transporte, pertenece a la necesidad de tener suficiente energía para el dispositivo encargado del calentamiento del combustible y la dependencia de la capacidad de tráfico de la tubería, gastos de energía, deposición de asfaltenos y sólidos en la tubería; sin embargo estas desventajas son compensadas con las ventajas y en el caso de transportar petróleos y emulsiones la mayoría de estas desventajas no interviene en el proceso.

Las investigaciones dentro del transporte hidráulico, específicamente del desplazamiento de flujos líquidos se han desarrollado en tres direcciones fundamentales:

- Trabajos experimentales con la posterior generalización de resultados.
- Trabajos teóricos. En ellos se trata de hallar la expresión matemática y la aplicación física de los procesos que tienen lugar cuando se trasladan partículas sólidas suspendas en fluidos líquidos.
- Trabajos que buscan el enlace de la teoría con los trabajos prácticos.

1.7 – Influencia de la viscosidad en las características de trabajo de las bombas

Las propiedades físicas del fluido que influyen en el bombeo son la densidad (o peso específico), presión de vapor y viscosidad.

a) Densidad (peso específico, o densidad relativa). Influye sobre la potencia necesaria para el bombeo, a mayor densidad, mayor potencia necesaria para el bombeo.

b) Presión de vapor (P_v).- Su influencia se acentúa si se trabaja con líquidos calientes y está en la $CSPN_A$ o del sistema la P_v debe ser baja par tener una $CSPN_A$ razonable y evitar la “cavitación”.

c) Viscosidad (μ).- Influye sobre el caudal que pueda manipular la bomba Q , la columna H que pueda desarrollar la bomba, y la eficiencia de la bomba η . Además influye sobre la columna o resistencia del sistema (aumentándolo).

Una bomba es una máquina destinada a desplazar el líquido y aumentar su energía transformando la energía recibida del motor en energía potencial, cinética y, en un grado insignificante, calorífica del flujo de líquido.

Las bombas se clasifican en dos grandes grupos principales: dinámicas y volumétricas. En el caso de las dinámicas la transmisión de la energía al flujo tiene lugar bajo la influencia de las fuerzas que actúan sobre el líquido en las cavidades de trabajo, que se encuentran constantemente comunicadas con la entrada y la salida de la bomba. Mientras que en las bombas volumétricas la energía se transmite al medio líquido en las cámaras de trabajo, que cambian periódicamente el volumen y que se comunican alternativamente con la entrada y salida de la bomba.

El funcionamiento de las máquinas volumétricas se realiza mediante la aspiración y expulsión de los medios líquidos o gaseosos con ayuda de cuerpos sólidos: émbolos, placas o dientes que se mueven en las cavidades de trabajo, o sea, cilindros y cuerpos de formas especiales.

Las **bombas de engranajes** se usan para bombear aceite de lubricación, y casi siempre tienen un componente de vibración fuerte en la frecuencia del engranaje, que es el número de dientes en el engrane por las RPM. Este componente dependerá fuertemente de la presión de salida de la bomba. Si la frecuencia del engranaje se cambia de manera significativa, y hay una aparición de armónicos o de bandas laterales, en el espectro de vibración, este podría ser una indicación de un diente cuarteado ó dañado de otra manera. Estas son bombas robustas de caudal fijo, con presiones de operación hasta 250 bar (3600psi) y velocidades de hasta 6000 rpm. Con

caudales de hasta 250 cc/rev combinan una alta confiabilidad y tecnología de sellado especial con una alta eficacia.

1.7.1 - Principio de funcionamiento de las bombas de engranajes

Este tipo de bomba (**figura 1.1**) produce caudal al transportar el fluido entre los dientes de dos engranajes acoplados. Uno de ellos es accionado por el eje de la bomba (motriz), y este hace girar al otro (libre). La bomba de engranajes funciona por el principio de desplazamiento; el piñón es impulsado según se indica en la figura; se hace girar al piñón B en sentido contrario. En la bomba, la cámara S (de admisión), por la separación de los dientes, en la relación se liberan los huecos de dientes. Esta depresión provoca la aspiración del líquido desde el depósito.

Los dientes llenados transportan el líquido a lo largo de la pared de la carcasa hacia la cámara P (de impulsión). En la cámara P los piñones que engranan transportan el líquido fuera de los dientes e impiden el retorno del líquido de la cámara P hacia la cámara S. Por lo tanto el líquido de la cámara P tiene que salir hacia el receptor, el volumen del líquido suministrado por revolución se designa como volumen suministrado (cm^3/rev).

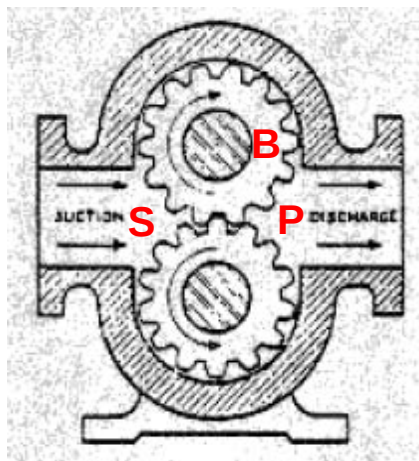


Figura 1.1: Bombas de engranajes externos

El caudal de una bomba de engranajes que consta de dos ruedas dentadas de iguales dimensiones se determina por las dimensiones geométricas de la bomba y la frecuencia de rotación de su árbol como se muestra a continuación.

$$Q = 2 f \cdot l \cdot z \cdot n \cdot \eta_0 \quad (1.2)$$

Donde:

f ► Área de la sección transversal, m²

l ► Longitud del diente de la rueda, m

z ► Cantidad de dientes.

n ► Número de revoluciones, r.p.m

η_0 ► Rendimiento volumétrico

1.8- Descripción del flujo tecnológico de la instalación de Felton

El combustible llega a la Central Eléctrica desde la base de almacenamiento de combustibles de CUPET, desde la cual con sus equipos de bombeo lo trasladan hasta los tanques de recepción y almacenamiento del mismo en la CTE.

Existen dos tanques para la recepción, almacenaje y preparación del combustible que se utiliza en la CTE, estos tienen capacidad de 15000 m³ cada uno, además tienen dispositivos interiores (serpentín) y exteriores (calentador) para el calentamiento del combustible entre 65 – 70 °C, con el fin de facilitar su bombeo.

Desde los tanques se succiona el combustible por dos bombas de engranes para cada unidad, situadas en la casa de bombas de primer impulso, las cuales transportan el mismo con una temperatura de 65-70 °C hasta la casa de bombas de segundo impulso, manteniendo la presión constante de 0.45 MPa en la succión de las bombas del segundo impulso.

En la casa de bombas de segundo impulso, el combustible es bombeado por dos bombas de alta presión, las cuales elevan la presión hasta 3.2 MPa, además existen dos calentadores de superficie que trabajan con vapor, los cuales elevan la temperatura del combustible hasta aproximadamente 145 °C. Con estas condiciones se facilita la pulverización del combustible en los quemadores de las calderas.

La estación de válvulas de regulación de la potencia de la caldera es la que controla el suministro del combustible hacia los quemadores en dependencia de la producción de vapor que tengan las mismas.

Cada caldera consta de doce quemadores tangenciales, ubicados en tres niveles, en las esquinas del horno, cada uno puede suministrar hasta 5,7 t/h de combustible, para la pulverización son auxiliados con vapor de agua a una presión de 1 MPa y 250 °C.

Además del combustible, para el proceso de oxidación del mismo con el consiguiente desprendimiento de gran cantidad del calor, al horno de la caldera se suministra la cantidad de aire necesaria para lograr la combustión completa, este aire es succionado de la atmósfera por dos ventiladores de tiro forzado (VTF), se precalienta en los precalentadores de aire a vapor hasta 75 °C y finalmente se eleva su temperatura hasta 315 °C en los calentadores de aire regenerativos (CAR).

1.9– Conclusiones del capítulo

- El análisis bibliográfico demostró la existencia de diversos trabajos relacionados con el transporte de fluidos (Newtonianos y No newtonianos) a través de conductos.
- En este capítulo se fundamenta sobre las características del petróleo en general, así como las diferentes ventajas y deficiencias que presenta el transporte del petróleo pesado por tuberías, y la influencia de la viscosidad en la eficiencia del sistema de transporte.

INVESTIGACIÓN TEÓRICA PARA EL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO PESADO

2.1- Introducción

Los procedimientos metodológicos relacionados con el modelo reológico de los fluidos, nos ayudan a establecer un análisis sobre el comportamiento y la estabilidad de emulsiones de petróleo crudo cubano; posibilitándonos ejecutar una selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados al trasiego del fluido en estudio a nivel de la industria cubana; esto nos permite definir como objetivo del presente capítulo:

Realizar la investigación teórica y plantear modelos de flujos asociados a fluidos que describan comportamiento según las propiedades de transporte del crudo, plantear las características generales del crudo mejorado 650, así como el procedimiento estadístico para el análisis de datos experimentales.

2.2- Modelo reológico de los fluidos

El término reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la Física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia. La reología es la ciencia del flujo y la deformación; estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas y materiales cristalinos.

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en dos grupos:

- Newtonianos.
- No Newtonianos.

Los modelos más difundidos, (Garcell, 1988; Turro, 2002) son los tratados en este tópico.

En los *fluidos newtonianos* existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y los líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como *fluidos newtonianos*; la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del

esfuerzo cortante (τ) y del gradiente de velocidad $\left(-\frac{dv_x}{dy}\right) = \dot{\gamma}$.

$$\tau_{x,y} = \mu \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy} \right) \quad (2.1)$$

Los fluidos no newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad, y, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aún cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos:

1- De viscosidad independiente del tiempo.

- Seudoplásticos: Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para $n < 1$).

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy} \right)^n \quad (2.2)$$

Donde:

n - Índice de la ley de potencia, (adimensional).

K - Índice de consistencia, (Pa. s).

El parámetro n es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para $n < 1$ el fluido es seudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante.

Para $n = 1$, la ecuación 2.2 se transforma en la ley de Newton, siendo $K = \mu$. El parámetro K es el índice de consistencia, el cual da una medida del grado de viscosidad del material.

Para los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente (μ_a). De acuerdo con la (ecuación 2.1) la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (2.2) se obtiene:

$$\mu_a = K \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.4)$$

- Dilatantes: Sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para $n > 1$). (Figura 2.1-c).
- Plásticos ideales: Se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo cortante inicial (τ_0), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir. El modelo de Bingham se escribe. (Figura 2.1-d).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Donde:

τ_0 - Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

μ_p - Viscosidad plástica.

Para $\tau_0 = 0$ la ecuación 2.5, se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu$.

La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham esta dada por:

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

- Plásticos reales: Sus viscosidades también disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que τ_0 . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley.

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + K \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right)^n \quad (2.7)$$

Los parámetros K , n y τ_0 , tienen el mismo significado que en los dos modelos anteriores. Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales. Para n

= 1, la ecuación 2.7 se transforma en el modelo de Bingham, para $\tau_0 = 0$, en el modelo de Ostwald de Waele, y para $\tau_0 = 0$ y $n = 1$ se transforma en la ley de Newton.

2- De viscosidad dependiente del tiempo

- Tixotrópicos: La viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidos a un gradiente de velocidad determinado. Se comportan reológicamente como pseudoplásticos, plásticos ideales y reales. (Figura 2.2-a).
- Reopécticos: La viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado; y se comportan como materiales dilatantes. (Figura 2.2-b).

Para modelizar la variación de la viscosidad con el tiempo, se ideó la siguiente ecuación:

$$\mu(t) = \mu_0 - \int_{-\infty}^t M_T(t-t') \frac{df(D^2)}{dt'} dt' \quad (2.8)$$

Donde:

$$M_T(t-t') = \int_0^{\infty} \frac{R(II)}{II} \exp\left[-\frac{(t-t')}{II}\right] dII \quad (2.9)$$

Siendo:

II: el tiempo de relajación del fluido, es decir, el tiempo que tarda el fluido en disminuir su tensión a $1/e$ veces. Puede haber diversos tiempos de relajación.

R (II): función de distribución de tiempos de relajación.

μ_0 : viscosidad inicial sin perturbaciones.

F (D^2): función simétrica de la velocidad de deformación

3- Viscoelásticos ó de Maxwell:

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas. Las sustancias viscoelásticas fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, pero, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo cortante, el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos. Este comportamiento se ha observado en NAPALM, en soluciones de polímeros, en masas cocidas de la

industria azucarera con altos contenidos de gomas (polisacáridos), en ciertas resinas y en emulsiones de crudo cubano, de acuerdo a lo reportado por (Toose, 1995) y (Ferro, 2000).

La ecuación que describe el comportamiento viscoelástico está basada en el modelo de *Maxwell*.

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \mu \cdot D \quad (2.10)$$

Donde,

τ : esfuerzo cortante aplicado.

λ : tiempo de relajación.

$\dot{\tau}$: gradiente de esfuerzos cortantes (μ/G).

μ : viscosidad aparente.

D : velocidad de deformación.

2.2.1- Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad; contra $(-dv/dy)$, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.

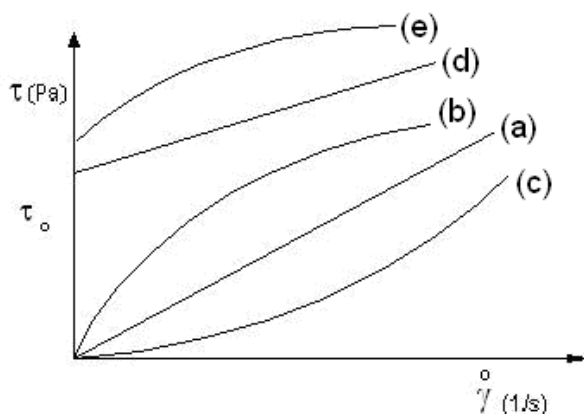


Figura 2.1. Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplásticos; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell, 2001.

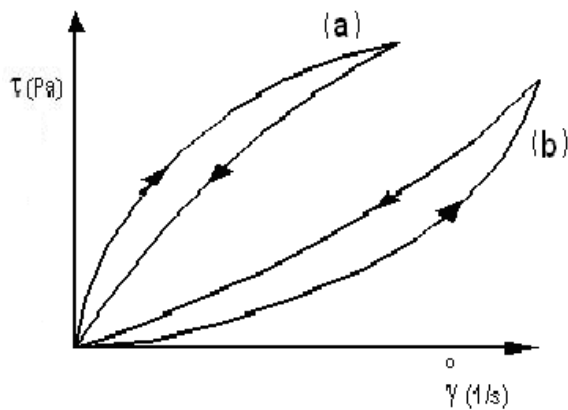


Figura 2.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)- Tixotrópico; (b)- Reopéctico.

Fuente: *Garcell, 2001.*

Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido, para determinar si un equipo ya construido (con el fin de transportar o elaborar un material determinado), puede ser usado con otro material diferente: para clasificar los materiales reológicamente y encontrar el modelo adecuado, para comparar características estructurales o de calidad de un mismo producto obtenido sin producciones *batch* y que hayan sido fabricadas sustituyendo a un componente por otro.

2.3- Modelación del gradiente de presión en tuberías

Para determinar la caída de presión para un fluido no newtoniano en flujo permanente, estacionario, con un diámetro constante, se debe partir de un análisis de la distribución de esfuerzos cortantes en tuberías. Es recomendable basarse en los estudios de Rabinowisch-Mooney, Metzner-Reed y Ostwald de Waele los cuales llegaron a unas expresiones válidas para todo fluido no newtoniano independiente del tiempo; expresiones en las cuales todos los parámetros se pueden hallar experimentalmente.

En nuestro caso partiremos con el número de Re^* , el cual se define para fluidos pseudoplástico y dilatante según la naturaleza reológica del fluido como sigue (Turro, 2002).

$$Re^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \cdot \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (2.11)$$

El modelo homogéneo más difundido según Haoulo et al. (2005), es el llamado modelo de flujo homogéneo de Wallis (1969). Las ecuaciones básicas de conservación de masa y de momentum en régimen permanente del modelo homogéneo para flujo unidimensional isotérmico en tuberías son:

$$\frac{d}{dx} \cdot (\rho_M \cdot v_M) = 0 \quad (2.12)$$

Momentum:

$$\rho_M \cdot v_M \cdot \frac{dv_M}{dx} = \frac{dp}{dx} - \frac{P \cdot \tau_w}{A} - \rho_M \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.13)$$

Donde:

v_M ; ρ_M : Velocidad promedio y densidad de la mezcla respectivamente.

A ; P ; θ : Área de la sección transversal, perímetro y el ángulo de inclinación de la tubería, respectivamente.

$\frac{dp}{dx}$: Gradiente de presión en la dirección del flujo.

τ_w : Esfuerzo de corte en la pared de la tubería.

g : Aceleración de la gravedad.

Generalmente la ecuación (2.13) se presenta como una ecuación explícita en términos del gradiente de presión:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{P \cdot \tau_w}{A} + \rho_M \cdot v_M \cdot \frac{dv_M}{dx} + \rho_M \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.14)$$

En la ecuación (2.14) el gradiente de presión longitudinal total en la tubería se puede descomponer en tres.

$$-\frac{dp}{dx} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_F + \left(\frac{dp}{dx}\right)_A + \left(\frac{dp}{dx}\right)_G \quad (2.15)$$

Donde:

El primer componente es el gradiente de producto del esfuerzo de corte del fluido con la pared de la tubería. Usualmente se ajusta este a la fricción existente entre el flujo de la mezcla y la pared interior del tubo. El término de pérdidas de presión, puede definirse mediante la ecuación de Weisbach – Darcy; para un flujo por tuberías rectas circulares, (valida para cualquier tipo de fluido).

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_F = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v_M^2}{2} \cdot \rho_M \quad (2.16)$$

Donde:

λ : Coeficiente de fricción por rozamiento del fluido, (adimensional).

En realidad se debe a la disipación de energía turbulenta por viscosidad.

Para el Fluido que cumple la ley de potencia, la ecuación para la caída de presión sería:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_F = 2 \cdot K \left[\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right]^n \cdot \left[\frac{2}{D} \right]^{n+1} \cdot v^n \quad (2.17)$$

Diversos autores utilizan este modelo, Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001), para el calculo de perdidas de cargas en tuberías rectas cuando se transporta fluidos pseudoplásticos y dilatantes, en particular petróleos pesados. En estos trabajos no se especifica el régimen de flujo en que es valido este modelo.

Luego sustituyendo en la ecuación 2.17 la velocidad se obtiene la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_F = 2 \cdot K \cdot \left[\frac{3n+1}{n} \right]^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)^n \cdot Q^n \quad (2.18)$$

El segundo componente a tener en cuenta son las pérdidas locales, las cuales son producidas por los codos y válvulas existentes a lo largo de las tuberías.

$$\Delta P_{loc} = \sum \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2.19)$$

Al Realizar en la ecuación 2.19 la misma sustitución que en la ecuación 2.17 se obtiene:

$$\Delta P_{loc} = \frac{\sum \xi \cdot \rho \cdot \pi^2 \cdot D^4}{32} \cdot Q^2 \quad (2.20)$$

Una vez realizados los cálculos de las ecuaciones 2.18 y 2.20 se procede al cálculo de la caída de presión total que esta asociado con la variación de nivel y la sumatoria de las pérdidas locales junto con las del fluido:

$$\Delta P_T = \Delta \left(\frac{dp}{dx} \right)_F + \Delta P_{loc} \quad (2.21)$$

La potencia consumida por el equipo de bombeo (en kW) se determina según la conocida ecuación:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{1000\eta} \quad (2.22)$$

La potencia necesaria para transportar el petróleo estaría dada por la deducción de la ecuación de Darcys, asumiendo el transporte en régimen laminar.

Para cualquier fluido la potencia necesaria para su transporte por una tubería será.

$$N_n = Q \cdot \Delta P_T \text{ (W)} \quad (2.23)$$

Tomando al caudal Q en (m^3/s); ΔP_T en (Pa)

2.4- Descripción de la instalación experimental "Reometro"

El experimento se realizo en la instalación de compresores del ISMM (Anexo V). La misma esta compuesta por dos compresores de embolo de dos etapas enfriados por aire de fabricación soviética, con un caudal nominal de $30 m^3/min$ a la presión de 10 MPa, estos tienen mas de 15 años de instalados. La misma cuenta con una pizarra de control para la parte eléctrica la cual esta constituida fundamentalmente por un interruptor de fuerza, y un arrancador magnético.

Para la realización del experimento nos apoyamos en un reómetro de tubo con las siguientes características: Los reómetros de tubo se basan en la medición de la caída de presión asociada al flujo laminar del fluido a través de un tubo, el cual, por lo general, es de sección circular, hidráulicamente liso, y con una relación longitud / diámetro grande. El ΔP a través del tubo permite calcular el esfuerzo cortante, τ , y

con la magnitud del flujo volumétrico se estima la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$. Los reómetros de tubo son de gran utilidad para las mediciones reológicas de dispersiones que sedimentan muy fácilmente.

El tubo en la instalación puede estar dispuesto horizontal o verticalmente.

2.4.1- Funcionamiento del reómetro.

La figura 2.5 nos muestra un esquema detallado de la instalación, donde D° es un depósito hermético de acero inoxidable el cual esta previsto en la parte superior de un embudo E a través del cual se le introduce el fluido a estudiar (crudo 650). Este dispositivo cuenta con una válvula V3 encargada de sellar el dispositivo impidiendo la pérdida de presión una vez que desde la instalación de compresores se le introduzca aire a través de la tubería Tp, gracias a la válvula V1 que es la encargada de regular la presión en interior del depósito con el objetivo de aumentar o disminuir el caudal de aire comprimido midiéndose dicha presión con un transductor de presión conectado al indicador digital ID. El manómetro M1 posee una calibración de 0-100 Psi.

La presión en el interior del depósito se irá regulando mediante la válvula V1, a base de aumentar o reducir el caudal de aire comprimido que desde el compresor del laboratorio llega a su entrada. Esta presión también se pudiera regular con la instalación de la válvula de escape V2, variando su apertura manteniendo V1 en una posición concreta, pero se hará según el primer método.

Una vez que se tenga la presión deseada se procede a mediante una válvula que une el deposito con un tubo de acero inoxidable, de diámetro $D = 0.006\text{m}$ y longitud $L = 2\text{ m}$, a través del cual al abrirse la válvula que regula el flujo por interior del tubo hasta obtener el volumen deseado. El volumen se medirá con un recipiente graduado, en nuestro caso se uso una probeta graduada capaz de registrar hasta 1000 mL. También se hizo uso de un termómetro para tomar la temperatura del fluido de estudio, dicho instrumento esta capacitado para registrar temperaturas de hasta 100°C . En lo antes planteado se basa el estudio para la determinación del reograma del fluido en estudio (crudo 650).

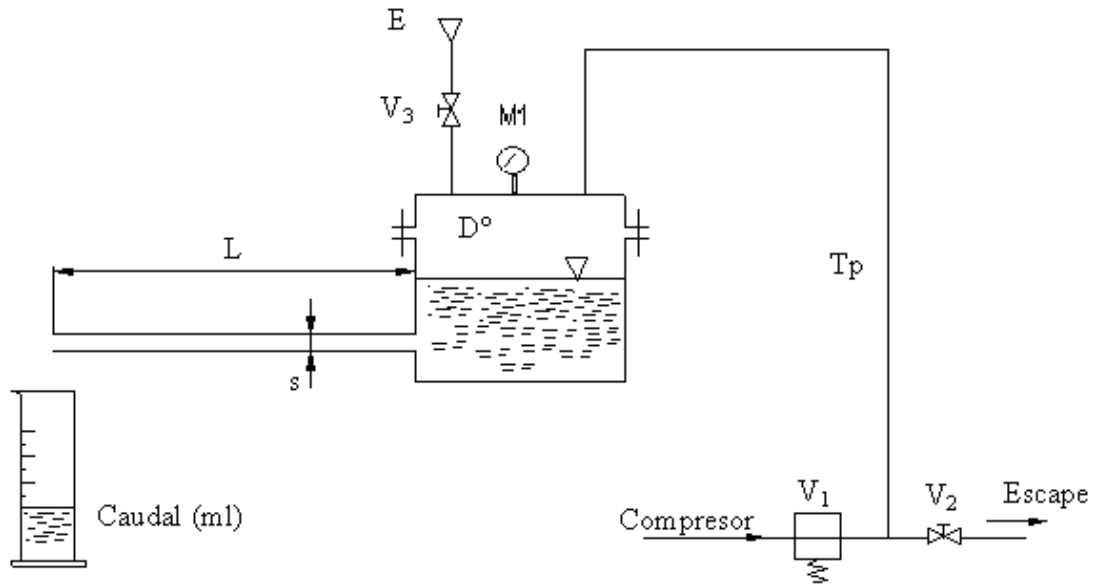


Figura 2.3. Esquema detallado de la instalación.

Para la determinación de la reología del petróleo estudiado se debe realizar la lectura de los siguientes datos:

Las lecturas del manómetro encargado de registrar la presión del depósito con las cuales conociendo el diámetro del tubo (D), su longitud (L) y luego apoyándonos en la ecuación del caudal:

$$Q = u \cdot S \quad (2.24)$$

Donde:

u : Velocidad media.

S : Sección del tubo: $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$

Se puede determinar la velocidad por la ecuación:

$$u = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2.25)$$

Conocida la velocidad se calculan las siguientes relaciones:

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4 \cdot L} = Y_i \text{ [Pa]} \quad (2.26)$$

$$\frac{8 \cdot u}{D} = X_i \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (2.27)$$

El término ΔP es la diferencia de presión entre la presión de entrada y la presión de salida del dispositivo (medida en Pascal).

Luego se representa $\log(X_i)$ en función de $\log(Y_i)$, ajustando una recta del tipo $y = mx + b$ en el que la pendiente m es n y la ordenada en el origen b es k' , obteniéndose:

$$k = k' \cdot \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (2.28)$$

Con todo lo antes planteado se determinara la curva reológica de forma

$$\tau = k (\dot{\gamma})^n \quad (2.29)$$

Una vez realizada la metodología antes planteada se deben recoger los siguientes datos para su posterior análisis. Para lo cual nos podemos apoyar en una Hoja de cálculo de EXCEL.

2.5- Características generales del crudo mejorado 650

Para la realización de la investigación de las propiedades de transporte del crudo mejorado 650 se nos hace necesario conocer las propiedades físico-químicas del fluido las cuales aparecen en la tabla que se muestra a continuación. Dichas propiedades fueron obtenidas mediante Contrato CUPET – UNE 2005.

Tabla 2.2 Características físico – químicas del combustible crudo mejorado CM-650

No	Parámetros	U/M	Valor
1	Viscosidad a 50 °C	mm ² /s	650
2	Azufre total	%m/m	7.5
3	Temperatura de inflamación	°C	34
4	Temperatura de fluidez	°C	15
5	Carbón conradson	%m/m	14
6	Densidad a 15 °C	g/cm ³	0.9924
7	Gravedad a 15 °C	°API	11
8	Valor calórico neto	kcal/kg	9100
9	Agua por destilación	%v/v	2.0
10	Sedimentos por extracción	%m/m	0.15
11	Cenizas	%m/m	0.1
12	Asfáltenos	%m/m	18
13	Vanadio	ppm	150
14	Sodio	ppm	150
15	Aluminio + silicio	ppm	80

2.6- Procedimiento estadístico para análisis de datos

El procesamiento estadístico se efectúa mediante los errores admisibles de los valores de las variables. Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son:

Media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.30)$$

Donde:

x_i - elementos de la serie.

n - número de pruebas.

Desviación media:

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (2.31)$$

La varianza muestral:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (2.32)$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral se denomina error estándar S_x . El error estándar de la media aritmética es:

$$\delta = \frac{t_d \cdot S_x}{\sqrt{n}} \quad (2.33)$$

El procesamiento estadístico se ejecuta con el empleo del criterio de Student para una probabilidad $t_{0,95}$ mediante la comparación del t observado con t_d .

$$t = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S_x} \quad (2.34)$$

En todos los casos se confirma que $t < t_d$ por lo que la dispersión entre los resultados obtenidos no es significativa.

La confirmación de la validez de los valores experimentales con el modelo teórico se desarrolla a través del error relativo, o sea, la diferencia entre el módulo del valor experimental " X_{exp} " de la caída de presión y el valor teórico " X_{teo} " obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento.

El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100 \quad (2.35)$$

El error relativo promedio se expresa por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot \frac{100}{n} \quad (2.36)$$

Del cálculo de los errores relativos puntuales para cada uno de los diámetros de partículas se obtienen los siguientes resultados:

En la literatura (Torres, 2003) se hace un examen de los errores y sus posibles fuentes, se especifica que en cálculos de ingeniería una desviación del (20 – 25)% es satisfactoria, pues en cada error influyen los siguientes factores:

- ✓ Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser con menor precisión.
- ✓ Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- ✓ Los valores experimentales son promedios de las réplicas.
- ✓ Posibles errores de apreciación cometidos en las mediciones, por pequeñas oscilaciones que ocurren en los líquidos manométricos durante los experimentos.

2.7- Conclusiones del capítulo.

- Quedan expuestos, los modelos matemáticos de la operación de sistemas de flujo en los procedimientos metodológicos tradicionales y los materiales y métodos que se emplean en la investigación.
- Se definen las características generales del crudo mejorado 650.
- Se describe el reómetro utilizado en el experimento, el cual posee las características técnicas necesarias para la determinación de las propiedades reológicas del fluido a estudiar.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

En la realización del estudio reológico y el cálculo de un sistema de transporte de un fluido, se deben tener en cuenta varios factores de vital importancia para estos, como son la densidad, los aparatos de medición, la longitud y diámetro de las tuberías de la instalación; una vez conocidos estos parámetros se realizan los análisis que conlleven a obtener los parámetros principales que tienen que ser medidos que en este caso son el caudal, presión, temperatura del fluido, las caídas de presión a lo largo de la tubería y en los accesorios; en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Realizar las mediciones pertinentes y el procedimiento de cálculo planteado en el capítulo anterior de modo que se pueda realizar un correcto análisis de los resultados, así como la valoración económica de las condiciones de transporte en la instalación donde se llevo a cabo el estudio.

3.2. Análisis de la influencia de la temperatura, presión y el volumen en las propiedades reológicas del crudo mejorado 650

Los datos analizados en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 fueron obtenidos mediante el análisis de las mediciones realizadas en el reómetro de tubo capilar (ver anexo V) para las cuales se hizo necesario tomar diversos parámetros que en este caso fueron la temperatura, la presión y el volumen. Los resultados del esfuerzo de corte fueron obtenidos mediante la ecuación (2.23), los del gradiente de velocidad por la (2.24), la velocidad con la (2.22), y la viscosidad aparente con la (2.4), la caída de presión se determinó mediante el empleo del software Microsoft Excel (Ver anexo VI); que nos posibilitó además la obtención del promedio y la varianza de la presión, el tiempo y el volumen medidos en el reómetro.

Tabla 3.1 Mediciones promedios realizadas en el reómetro para 32°C

Presión (Pa)		Tiempo (s)		Volumen (m ³)	
<i>0</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
240397,20000	515016,28000	50,00000	48,00000	0,00011	0,00000
274756,06667	356523,21333	41,33333	5,33333	0,00010	0,00000
286132,40000	0,00000	38,00000	4,00000	0,00010	0,00000
306816,70000	0,00000	34,66667	2,33333	0,00010	0,00000
341290,50000	0,00000	33,66667	2,33333	0,00010	0,00000
365996,70000	238679934,60996	46,66667	858,33333	0,00016	0,00000

Tabla 3.2 Mediciones promedios realizadas en el reómetro para 62°C

Presión (Pa)		Tiempo (s)		Volumen (m ³)	
<i>0</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
68947,57	0	41,5	0,5	0,00005	0
103421,4	0	25,5	4,5	0,00005	0
137895,1	0	22	0	0,00005	0
172368,9	0	17	8	0,00005	0
206842,7	0	14	0	0,00005	0
227354,7	59409,04	10	0	0,00005	0
241316,5	0	9,5	0,5	0,00005	0
275618	59409,05	9	0	0,00005	0
308540,4	0	8,5	0,5	0,00005	0

En el gráfico 3.1 se representa la relación existente entre el gradiente de velocidad y el esfuerzo de corte, en el cual puede observarse que la forma característica de la curva para el crudo mejorado 650 corresponde a un fluido pseudoplástico. En nuestro caso de estudio se le realizaron dos pruebas al crudo una para la temperatura de 32 °C y la otra para 62 °C, para los cuales nos apoyamos en la ecuación (2.2) la cual aparece en el capítulo anterior, obteniéndose los correspondientes valores de n y K para cada temperatura los cuales se exponen en la Tabla 3.3. Los resultados expuestos en la tabla 3.4 evidencian que a mayores valores de temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, al igual que los de índice de flujo. El coeficiente de correlación múltiple (R^2) en ambos casos se mantuvo constante con un valor de 0.97, lo que puede considerarse como satisfactorio e indicativo de que el modelo explica la variabilidad del esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad.

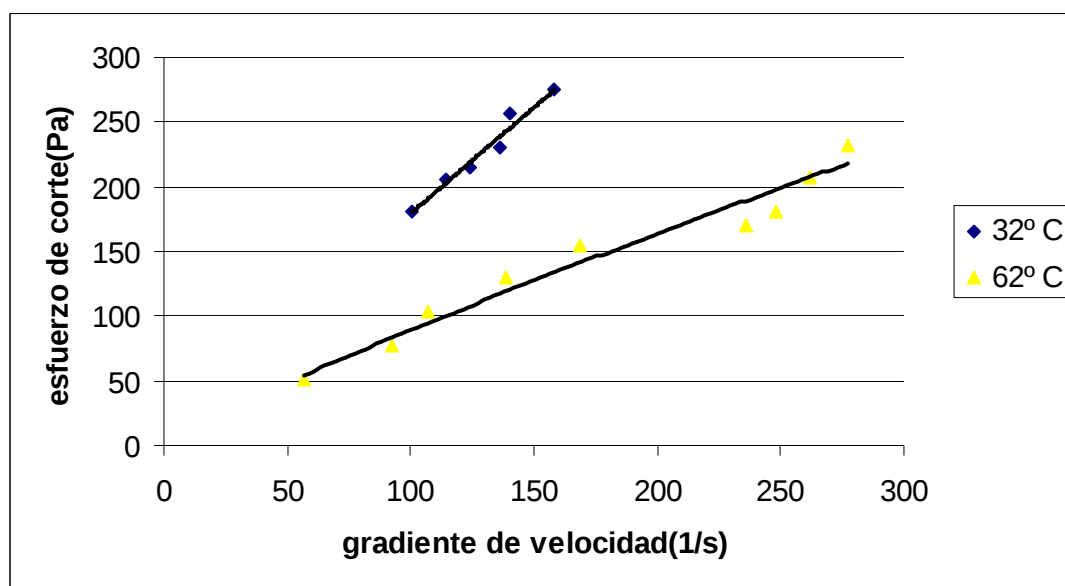


Figura 3.1. Comportamiento reológico del petróleo.

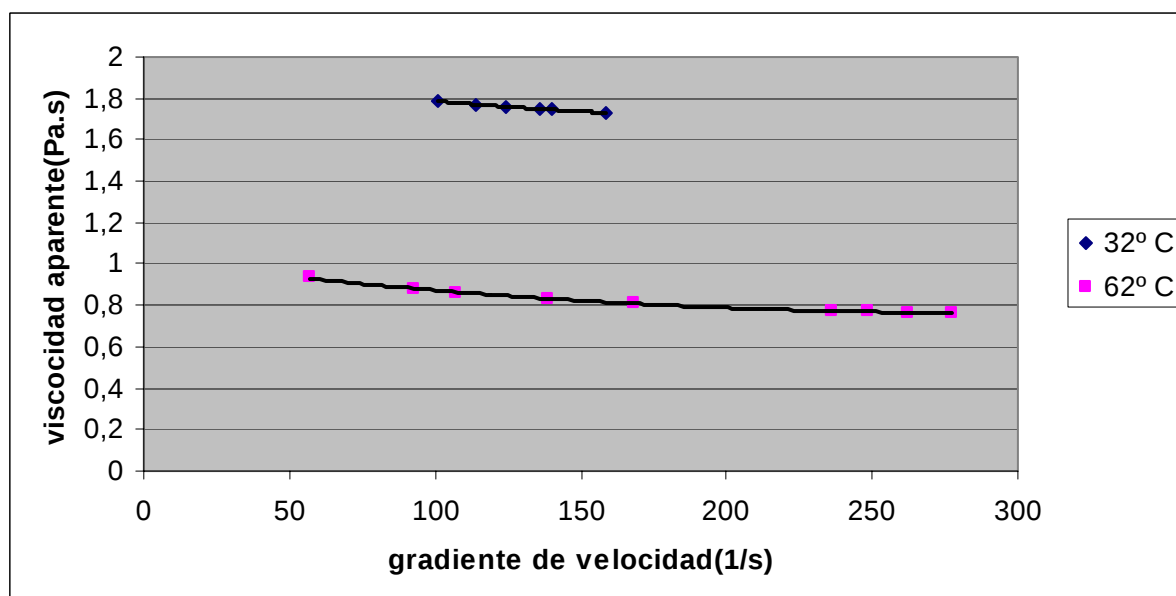
Tabla 3.3. Correlaciones de esfuerzo de corte *vs* gradiente de velocidad.

Temperatura	32 °C	62 °C
Modelo	$\tau_{x,y} = 2.467 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0.93}$	$\tau_{x,y} = 1.58 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0.87}$

Tabla 3.4. Parámetros reológicos del petróleo CM 650

Parámetros	Temperatura 32 °C	Temperatura 62 °C
K(Pa.s)	2.47	1.58
n(adim)	0.93	0.87
R ²	0.97	0.97

Para la obtención de la realización de la Figura 3.2, se tomaron en consideración las ecuaciones 2.4 y 2.24, cuyos resultados nos muestran la relación existente entre la viscosidad aparente y el gradiente de velocidad existente en el fluido de estudio, observándose como la viscosidad aparente disminuye lentamente a medida que ya en progreso el gradiente de velocidad.

**Figura 3.2.** Influencia de la viscosidad aparente en el gradiente de velocidad

De igual forma se puede apreciar en la Figura 3.3 como la caída de presión aumenta progresivamente junto con la velocidad, notándose que para la temperatura de 32 °C esta relación aumenta de forma más notable que en el caso de 62 °C.

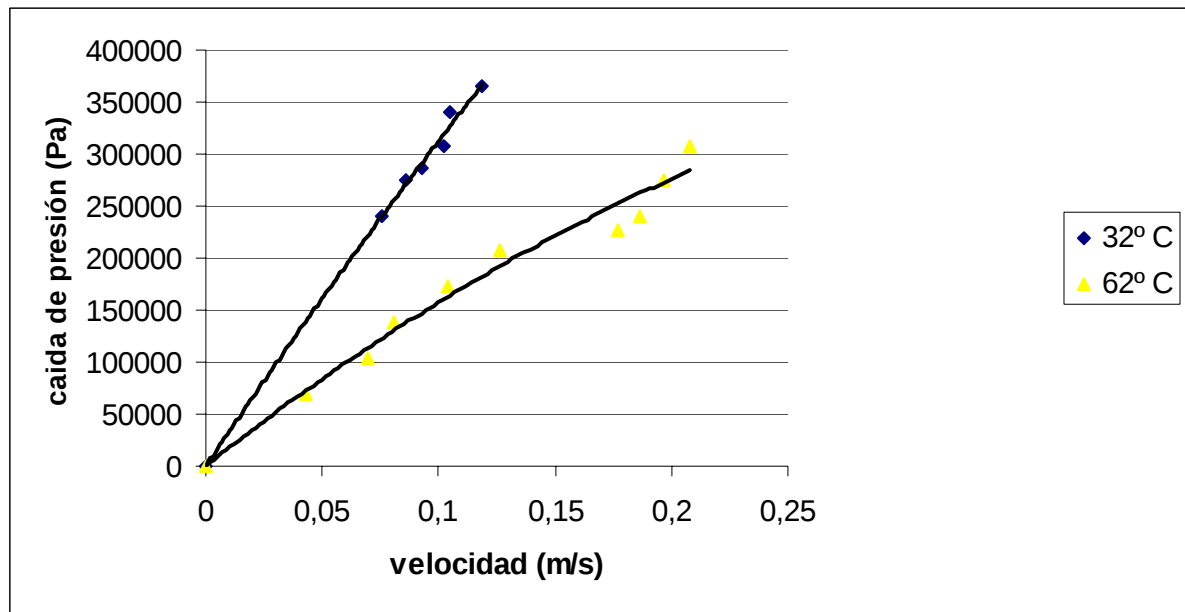


Figura 3.3. Influencia de la velocidad en la caída de presión.

En la Figura 3.4 se puede apreciar el comportamiento del índice de consistencia másica (k) respecto a la temperatura, observándose como a medida que aumenta la temperatura, (k) disminuye. La mayor influencia de la temperatura se ha reflejado en el índice de consistencia másica, siendo esta última, proporcional a la viscosidad de la mezcla para dicho planteamiento nos hemos apoyado en la ecuación (2.4).

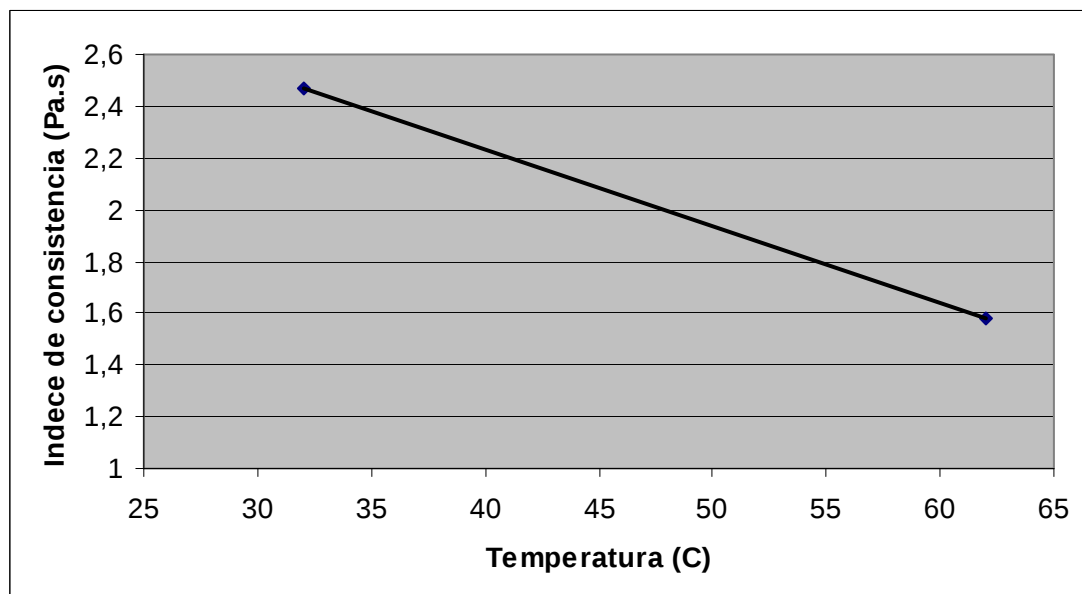


Figura 3.4. Influencia de la temperatura en el índice de consistencia másica.

3.3- Características de la bomba de engranaje

Para la realización de este apéndice se nos hizo necesario conocer las curvas características de la bomba encargada de transportar el crudo mejorado 650, así como las características de la instalación (ver anexo IV). Aunque las características expuestas en las Figuras (3.5 y 3.6) y Figuras (ver anexo VII) fueron tomadas del pasaporte de una de las bombas con las que cuenta la instalación, los cálculos fueron ejecutados para el caudal de la unión de dos bombas en paralelo que es como realmente estas trabajan.

En la Figura expuesta en el anexo VII se pone a la vista como varía el caudal de ambas bombas en función de la presión, observándose como el caudal permanece casi constante mientras aumenta la presión. En la figura 3.5 se muestra como se comporta el rendimiento de la bomba a medida que se incrementa la presión. La figura 3.6 nos indica que para un comienzo en el incremento de la presión se necesita una potencia inicial de 5 Kw, manteniéndose constante el incremento de ambos parámetros, uno en dependencia del otro.

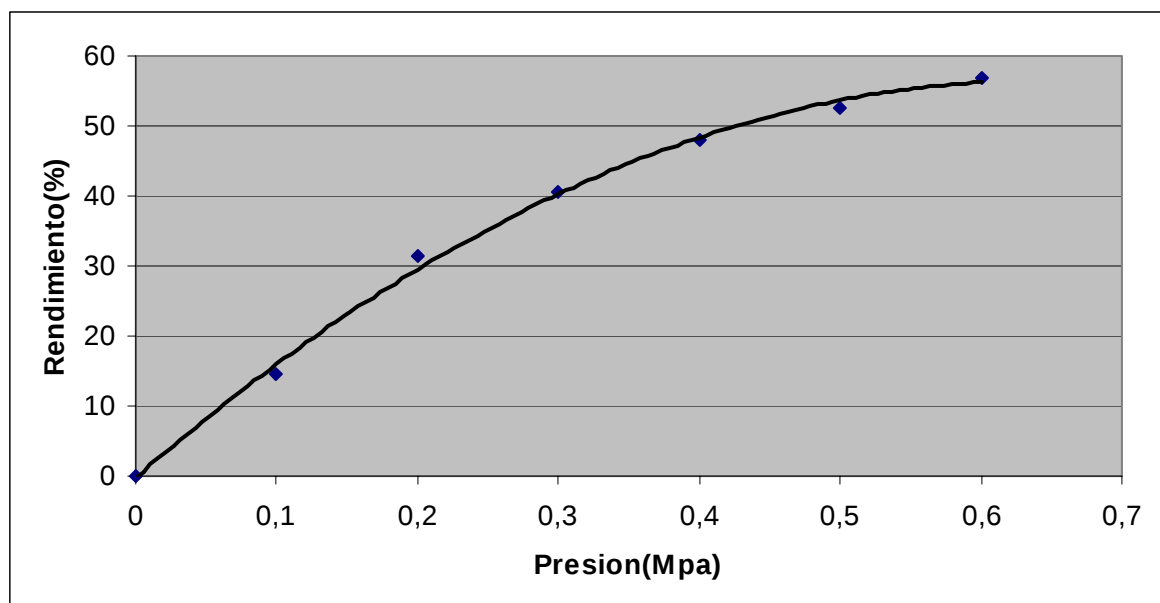


Figura 3.5. Variación del rendimiento con la presión

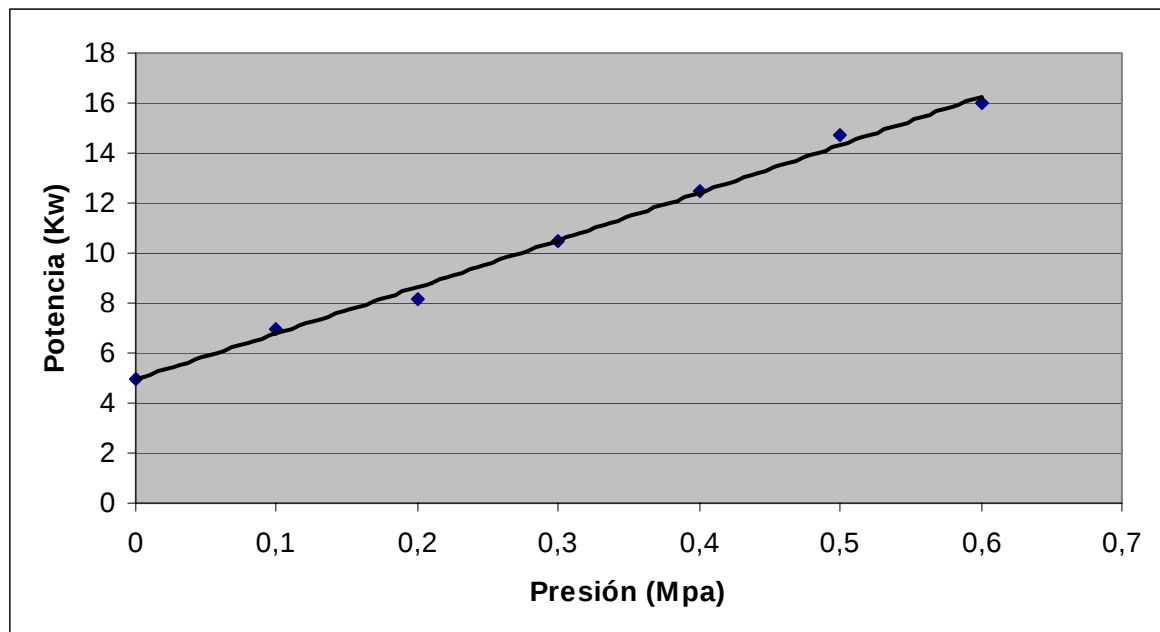


Figura 3.6. Variación de la potencia en cuanto a la presión

A continuación en la Figura (3.7) se muestra como se comporta la caída de presión en la succión con relación al caudal, para la realización de este grafico nos apoyamos en la suma de las ecuaciones (2.18 y 2.20), el calculo se le realizo a cada tramo de la instalación teniendo en cuenta la longitud de estos, así como los diámetros, y la velocidad con que se desplaza el fluido por cada sección de tubería. Tanto en la grafica como en las ecuaciones nos podemos percatar que las perdidas aumentan junto con el caudal ya que ambas son directamente proporcionales.

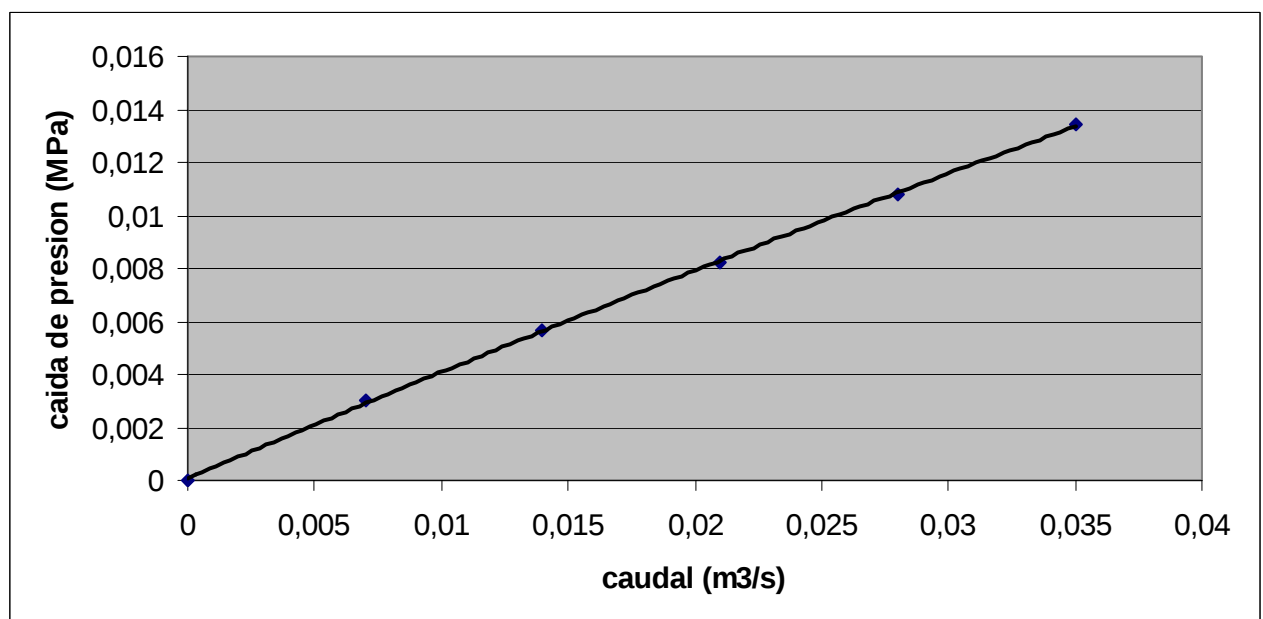


Figura 3.7. Influencia del caudal en la caída de presión

Con la ayuda de parámetros asociados a la Figura 3.7 se logro obtener la correlación existente entre la velocidad y las pérdidas tanto en la succión como en el retorno, esta relación se llevo a cabo sin tener en cuenta la longitud de las tuberías lográndose la obtención de la figura (3.8). Esta nos demuestra que existe un comportamiento creciente, similar al de las perdidas en función del caudal.

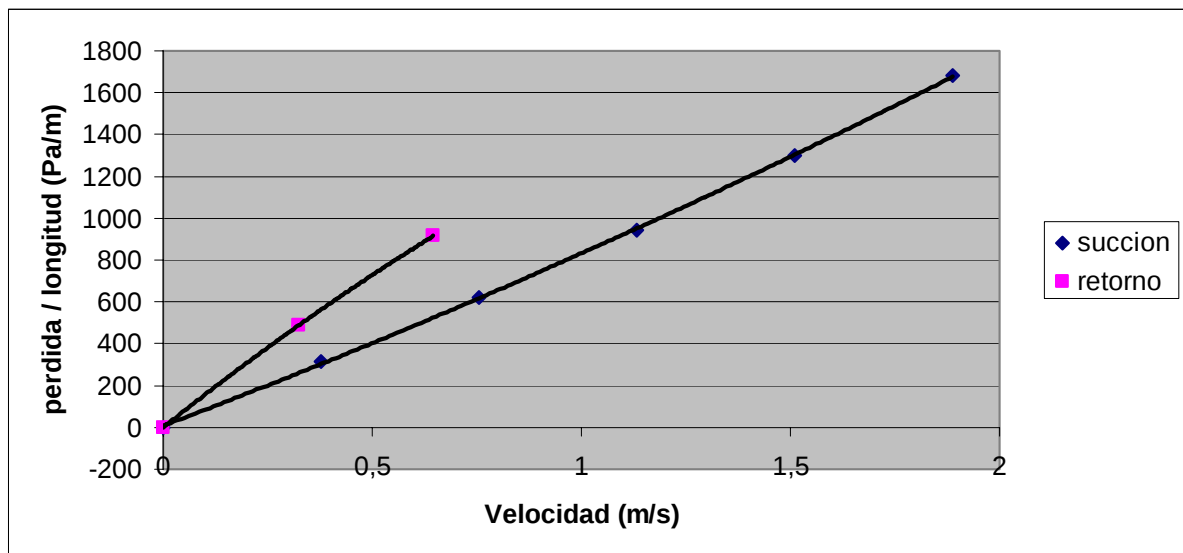


Figura 3.8. Influencia de la velocidad en las perdidas de carga.

Para la realización del análisis de la recirculación se hizo necesario tomar una variación de caudal, donde 0 m³/s corresponde al caudal mínimo y 0.01m³/s al máximo de operación del sistema, a través de los mismos se pudo obtener la figura 3.9 la cual se basa en el estudio de la potencia que se consume en el trasiego de este caudal, permitiéndonos observar como aumenta doblemente la potencia a medida que se incrementa el caudal de recirculación, lo que demuestra que a medida que se recircula una mayor cantidad de fluido se hace necesario consumir cierta cantidad de potencia entregada por las bombas demostrándonos así la ineficiencia existente en el aprovechamiento de esta. La realización de esta figura 3.9 se efectuó con el fin de brindarnos una información más detallada sobre el análisis económico del transporte del petróleo de la instalación, el cual será ejecutado en el apéndice que aparece a continuación.

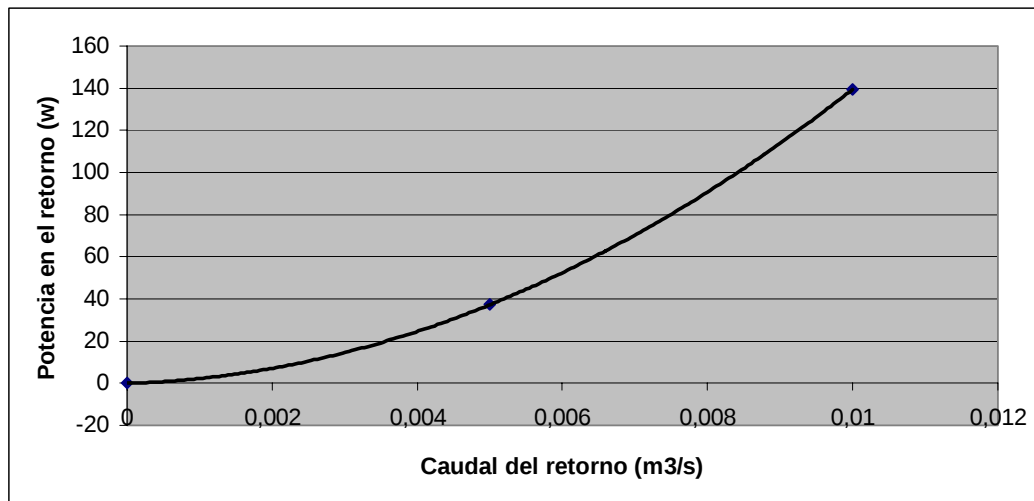


Figura 3.9. Potencia consumida en la recirculación.

3.4. Efecto económico de transporte

Una gran parte de los gastos capitales durante el transporte, lo constituye los gastos de energía eléctrica, su economía es una de las direcciones estratégicas de la producción en la actual etapa. Una correcta selección y organización en la explotación del equipamiento de bombeo en régimen económico permite el ahorro de la energía eléctrica y aumentar la efectividad del transporte de fluidos; teniendo siempre presente los problemas que ésta puede causarle al medio circundante (Laurencio, 2004).

Para el análisis de la valoración económica del transporte del crudo mejorado 650 en la instalación analizada, se determinó la caída de presión en el tubería, para ello nos apoyamos en la ecuación (2.18 y 2.20).utilizada por diversos autores Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001), para el cálculo de pérdidas de cargas en tuberías cuando se transporta fluidos seudoplásticos y dilatantes, en particular petróleos pesados y el número de Re^* se determinó por la ecuación 2.11 utilizada para fluidos seudoplásticos y dilatantes según su naturaleza reológica (*Turro 2002*). Estos cálculos fueron efectuados para el caso de estudio de la temperatura de 62°C ya que en la instalación el crudo es calentado para el mejoramiento de su transporte.

Tabla 3.5. Parámetros obtenidos e través de la utilización de la metodología de cálculo.

Parámetros	Valores
K Índice de consistencia másica ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.58
n Índice de la ley de potencia (adimensional).	0.87
D diámetro de la tubería (m)	0.2; 0.3; 0.4
ρ densidad del fluido (Kg/m^3)	992.4
L longitud de la tubería (m)	2.4; 7.25; 112.76
ξ coeficientes de perdidas locales	1.815 para diámetro 0.2 0.533 para diámetro 0.3 2.951 para diámetro 0.3 0.325 válvulas mariposas
Caída de presión total en la succión	0,04115704 MPa
Caída de presión total en el retorno	0,02139984 MPa

Tabla 3.6. Resultados del cálculo de reynolds en la succión

Para diámetro 0.2m		Para diámetro 0.3m		Para diámetro 0.4m	
Re* (adimensional)	Velocidad (m/s)	Re* (adimensional)	velocidad (m/s)	Re* (adimensional)	velocidad (m/s)
0	0	0	0	0	0
24,5659746	0,22292994	13,9819308	0,09907997	9,37351125	0,05573248
53,7647826	0,44585987	30,6006777	0,19815994	20,5147486	0,11146497
85,0121533	0,66878981	48,3853812	0,29723992	32,4376455	0,16719745
117,668926	0,89171975	66,9722576	0,39631989	44,8983204	0,22292994
151,415419	1,11464968	86,1793579	0,49539986	57,7747946	0,27866242

La tabla 3.6 nos muestra como el fluido de estudio presenta un comportamiento laminar en todo su recorrido, ya que el numero de reynolds no sobrepasa los valores del reynolds critico el cual es de 2300. El mayor valor de reynolds presente en el

estudio es de 151,415 el cual esta asociado al trasiego del mayor flujo posible a través de la sección de la tubería de 0.2m

3.4.1. Costo unitario de consumo energético para transportar el crudo mejorado 650.

Se define como costo unitario de transporte, al costo en que se incurre al transportar un metro cúbico de un fluido, a una distancia de un metro en una hora de trabajo. El mismo se expresa por la siguiente ecuación.

$$C_T = \left(\frac{G_b}{Q \cdot L} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

C_T - Costo unitario de Transportación, *CUC*

G_b - Gasto horario de la bomba, *CUC*

Q - Caudal del fluido transportado, m^3/h .

L - Longitud de la línea, (*m*)

Gasto horario de la bomba

En este análisis solo se tienen en cuenta los gastos por consumo de energía eléctrica.

$$G_b = C_{elec} \quad (3.2)$$

Donde:

C_{elec} - Costo por el consumo de energía eléctrica.

$$C_{elec} = \frac{T_a \cdot N_n \cdot K_p \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \quad (3.3)$$

Donde:

T_a - Tarifa de corriente eléctrica.

N_n -Potencia necesaria para transportar el fluido, entregada por la bomba.

K_p - Coeficiente de pérdida.

t_t - Cantidad de horas de funcionamiento.

η_m - Rendimiento del motor eléctrico.

η_b - Rendimiento de la bomba.

Tabla 3.7. Valores de los parámetros analizados para el cálculo del costo de energía eléctrica.

Parámetros succión	Valores	Parámetros retorno	Valores
$Q \text{ (m}^3/h\text{)}$	108	$Q \text{ (m}^3/h\text{)}$	36
$L \text{ (m)}$	122.41	$L \text{ (m)}$	116.45
$T_a \text{ (CUC / kw.h)}$	0.11	$T_a \text{ (CUC / kw.h)}$	0.11
$N_n \text{ (w)}$	469.40	$N_n \text{ (w)}$	139.49
$K_p \text{ (adimensional)}$	1.04	$K_p \text{ (adimensional)}$	1.04
$t_t \text{ (h)}$	24	$t_t \text{ (h)}$	24
η_m	0.93	η_m	0.93
η_b	0.57	η_b	0.57

Basándonos en los datos expuestos en la tabla 3.7 y apoyándonos en la sustitución de la ecuación 3.3 y 3.2 en la ecuación 3.1 se obtuvo el costo unitario de transportación del crudo, el cual para la succión es de 0.1839 CUC, mientras que para la recirculación el costo es de 0.1723 CUC, lo cual nos reafirma lo planteado con antelación en el análisis de la figura 3.9, ya que el costo en el retorno es prácticamente parecido al de la succión. Estos resultados, en cierta medida dan una visión del costo por consumo de energía para transportar el fluido de estudio y que la potencia de transporte del fluido se ajusta a la del motor por lo que el análisis de los resultados encaja en el flujo productivo.

3.5. Impacto Medioambiental

El impacto de las industrias de procesos y químicas al medio ambiente a nivel mundial, ha despertado una mayor conciencia ecológica y el sentir de la necesidad imperiosa de preservar la naturaleza. De ello, que en todo sistema para transporte de petróleo, es necesario tener presente la incidencia negativa al medio, las mismas se mencionan a continuación.

La protección del medio 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 de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas. Nuestro país, desde el triunfo de la revolución se ha desarrollado notablemente en la industria, por lo que no estamos exentos de esta problemática.

A nivel nacional, el transporte de petróleo por oleoductos en Cuba a partir de 1999 hasta el 2005 ha aumentado de un 21 hasta un 24%, siendo un claro reflejo del desarrollo actual de la industria petrolera cubana, el mismo ha actuado de significativamente en la protección al entorno.

Efectos humanos

Inhalación: La mezcla de vapores sólo se produce cuando el crudo se encuentra a altas temperaturas, sin embargo, en condiciones normales de exposición, el riesgo es mínimo ya que, al no tener volátiles, no se pueden inhalar. No obstante, es necesario disponer de un equipo adecuado para el contacto con el crudo. El sulfuro de hidrógeno puede desprenderse en ciertas condiciones, como altas temperaturas. Este compuesto es altamente tóxico y los síntomas principales son: Irritación de ojos, nerviosismo, náuseas, cefaleas, insomnio y en casos severos, inconsciencia y muerte.

Ingestión: En caso de que ocurra se producirán náuseas y vómitos, también puede irritar el tracto gastrointestinal.

Aspiración: A causa de su alta viscosidad, la aspiración a los pulmones es sólo una remota posibilidad.

Contacto con la piel: A altas temperaturas pueden producirse quemaduras en caso que no se tomen precauciones y la higiene personal es pobre, existe la posibilidad

de irritación en ojos y piel y además se puede producir una dermatitis después de un contacto directo prolongado con la piel o incluso por la ropa empapada. En este caso también podría producirse acné y foliculitis. Algunos individuos pueden ser particularmente susceptibles a descamaciones en la piel y dermatitis. En casos muy raros se produce cáncer de piel, debido a los componentes cancerígenos que pueden estar presentes en el crudo.

3.6. Conclusiones del capítulo

- Se comprobó que al incrementar la temperatura en el petróleo disminuye la viscosidad aparente y por ende el índice de consistencia, ocurriendo lo mismo con el índice de flujo,
- De acuerdo con los reogramas, el petróleo estudiado presenta un comportamiento seudoplástico.
- Se obtuvo el análisis del efecto económico en el transporte del crudo demostrando que existe una ineficiencia en este, ya que el costo unitario en la succión es de 0.1839 CUC y el de la recirculación es de 0.1723 CUC

CONCLUSIONES GENERALES

- El crudo mejorado 650 de acuerdo con los reogramas experimentales analizados, se encuentra situado dentro de los fluidos que presentan un comportamiento pseudoplástico.

Temperatura	32 °C	62 °C
Modelo	$\tau_{x,y} = 2.467 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0.93}$	$\tau_{x,y} = 1.58 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0.87}$

- Fueron obtenidos por experimentación el gradiente de presión al igual que la potencia que se necesita para el transporte del fluido por tuberías siendo esta 469,40 w para la succión y 139.49 w para la recirculación.
- Se realizó el análisis de las incidencias económicas en el transporte del crudo mejorado 650 observándose que existe una ineficiencia en este, ya que el costo unitario en la succión es de 0.1839 CUC y el de la recirculación es de 0.1723 CUC, lo cual nos permite apreciar que la inversión en el retorno es prácticamente la misma que en la succión. Junto con esto se elaboró el análisis de los incidentes que trae consigo el transporte del petróleo por tuberías al medio ambiente y los efectos que puede ejercer en el ser humano.

RECOMENDACIONES

Dadas las conclusiones realizadas del estudio y los resultados obtenidos se abordan las siguientes recomendaciones.

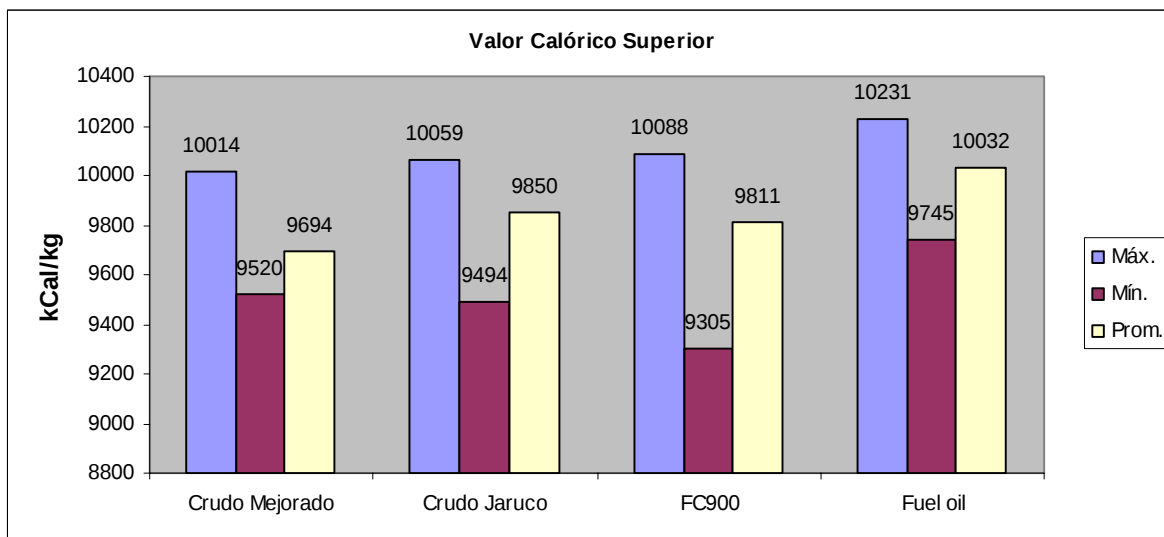
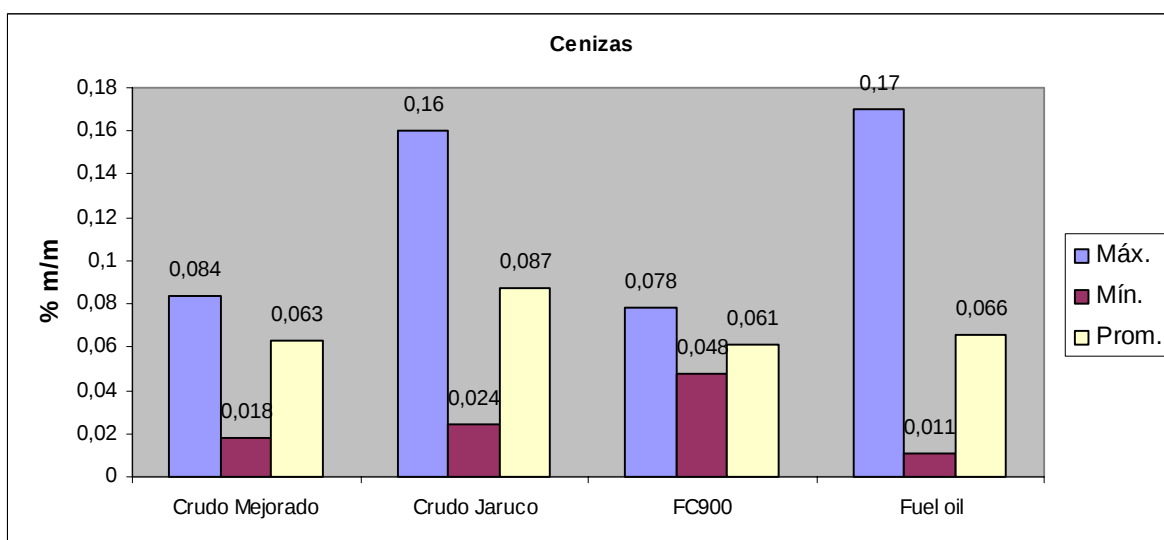
- 1- En el cálculo y evaluación del transporte del crudo mejorado 650, se recomienda tener en cuenta el comportamiento de las propiedades reológicas y la influencia de la temperatura sobre este, con el fin de obtener mayor exactitud en los cálculos de pérdidas de cargas.
- 2- Rediseñar la instalación con el fin de eliminar la recirculación, la cual incurre en un gasto innecesario de energía y relacionado a esto el costo de transportación.
- 3- Se recomienda como método más eficiente colocar un variador de frecuencia en la bomba, disminuyendo el consumo de energía por caída de presión.
- 4- En caso de un vertido del crudo, éste debe ser absorbido o contenido mediante arena, tierra o cualquier otro material de control; evitar que acceda a desagües, zanjas o canales. En caso de altas temperaturas no exponerse, debido a que se desprende en ciertas condiciones sulfuro de hidrógeno siendo este compuesto altamente tóxico.

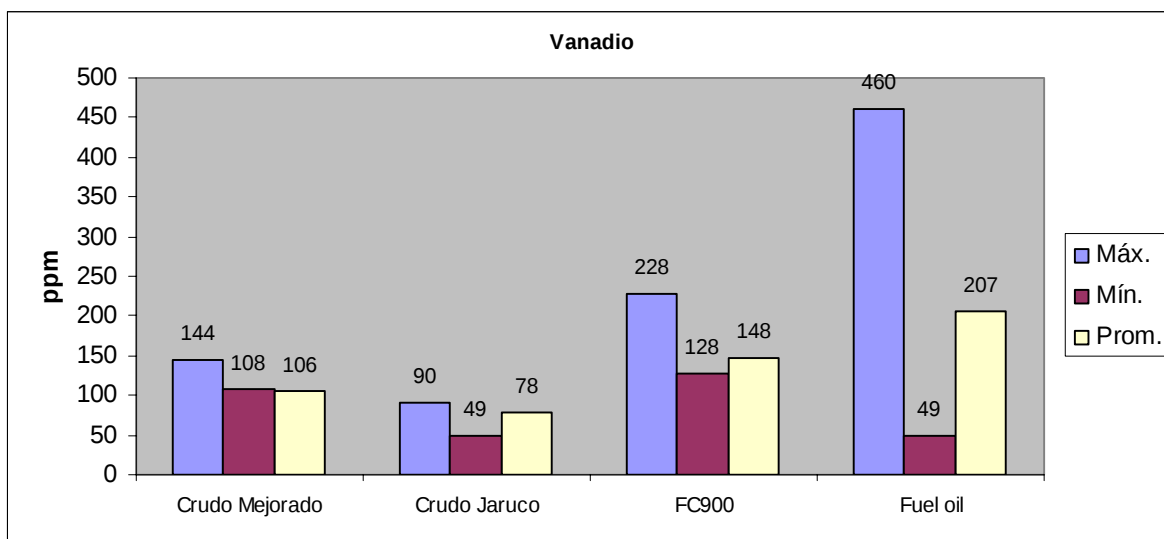
BIBLIOGRAFÍA

1. BANERJEE, T. P: *Das. Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves*. Canadian Journal of Chemical Engineering: 72 (Abril), 207-211 (1994).
2. CALDIÑO V. I; SALGADO M. G. *Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México. VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. (2004).
3. CERPA, A. y col. *Mineral contents and particle-size effect on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions*. Clay and clays minerals, 1999, 47 (515): 20-25.
4. 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.
5. CERPA, A. y Garcell. L .R *Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas*. La Habana: Informe al evento Metalurgia 98, 1998.
6. COLUMBIE. O, M: *Estudio del transporte de fuel oil desde Mazut hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa "Ernesto Che Guevara*, Héctor Laurencio (tutor). Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), 2006.
7. DE LA PAZ N. *Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida*. Centro de Investigación y Desarrollo de Medicamentos, Rev Cubana Farm 2002;36 (1):21-7
8. FERRO, A. *Estudio de la sustitución de las pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente P*. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000.
9. GARCELL L. R., A. DÍAZ y G. SURÍS. *"Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa"*. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, (1988).
10. GARCELL, L. *Comportamiento reológico de la pulpa laterítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad Ingeniería Química, 1993.

11. GARCELL, L: *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas*. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
12. GARCÍA E.J. y. STEFFE J.F. *Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newtonian Fluids in Pipe Flow*. Journal of Food Process Engineering: 9, 93-120, 1987.
13. HAOULO, M; GARCÍA F; 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 v.20 n.4 ISSN 0798-4065 versión impresa Caracas oct. 2005.
14. IBARZ, A. J; VÉLEZ y G. BARBASA. *Transporte de Alimentos Fluidos a Traves de Tuberías*. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
15. IZQUIERDO, P. R. *Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Emp. Cmdte Pedro Soto Alba*. Revista Minería y Geología, 1989, (3): 16-22.
16. LAURENCIO. A. H: *Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad (cola) en el proceso carbonato amoniaco*, Tesis de grado, Moa.2004- 84pag.
17. LAURENCIO A, H. y DELGADO D, Y. (2008). *Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado*. Minería y Geología, Vol. 24, No. 02, Paper ID: 04. ISSN 1993-8012.
18. MACEDO, C; MARTÍNEZ, J. y Vélez. J. *Diseño, Construcción y Validación de una Unidad Piloto Para el Manejo de Fluidos Newtonianos*. Información Tecnológica: 12 (6), 169-176, 2001.
19. MARTÍNEZ, L. P; J, A: Linares. *Resistance Coefficients of Fittings for Power-Law Fluids in Laminar Flow*. Journal of Food Process Engineering: 24, 135-144 (2001).
20. MECHETTI, M; FORNÉS, A; MATURANO, S. y ZAPANA L. *Efecto electrorreológico en crudos argentinos*, Congreso Producción 2000 y III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú. Misiones, Argentina, 2000.
21. NAKAYAMA, T. E: *Pipe Transportation of Minced Fish Paste*. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980).

22. NEKRASOV, B: *Hidráulica*. Editorial Pueblo y educación, La Habana, 1968.
23. PERONA, P: *An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids*. Journal of Food Engineering: 60, 137-145 (2003).
24. PLACENCIA, A. P: *“Formulación de emulsiones petróleo pesado en agua”*, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Petroecuador/ESPE. (2002).
25. 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. Quito – Ecuador, 2000.
26. SABLANI S.S. y Shayya W.H., *Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids*. 57, 327-335, 2003.
27. SALDÁS PAUMIER, L. *Determinación de las propiedades de transporte del Petróleo Mesa-30 destilado en la Refinería Níco López*. Héctor Laurencio (tutor). Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), 2008.
28. TORRES MAYAN, A. R. *Fabricación de un reómetro de tubo capilar para la investigación de propiedades de transporte de fluidos industriales*. Héctor Laurencio (tutor). Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), 2008.
29. TOOSE, E. M: *A boundery integral method for two dimentional) (non) – Newtonian drops is slow visions flow*. Journal of Non–Newtonian Fluid Mechanics, 1995, (2): 129 – 154.
30. TURRO B. A., *Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniaca*, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002. p.154
31. VÉLEZ J., *Apuntes de Ingeniería de Alimentos I*. Universidad de las Américas, Puebla, México. Inéditos, 2003.

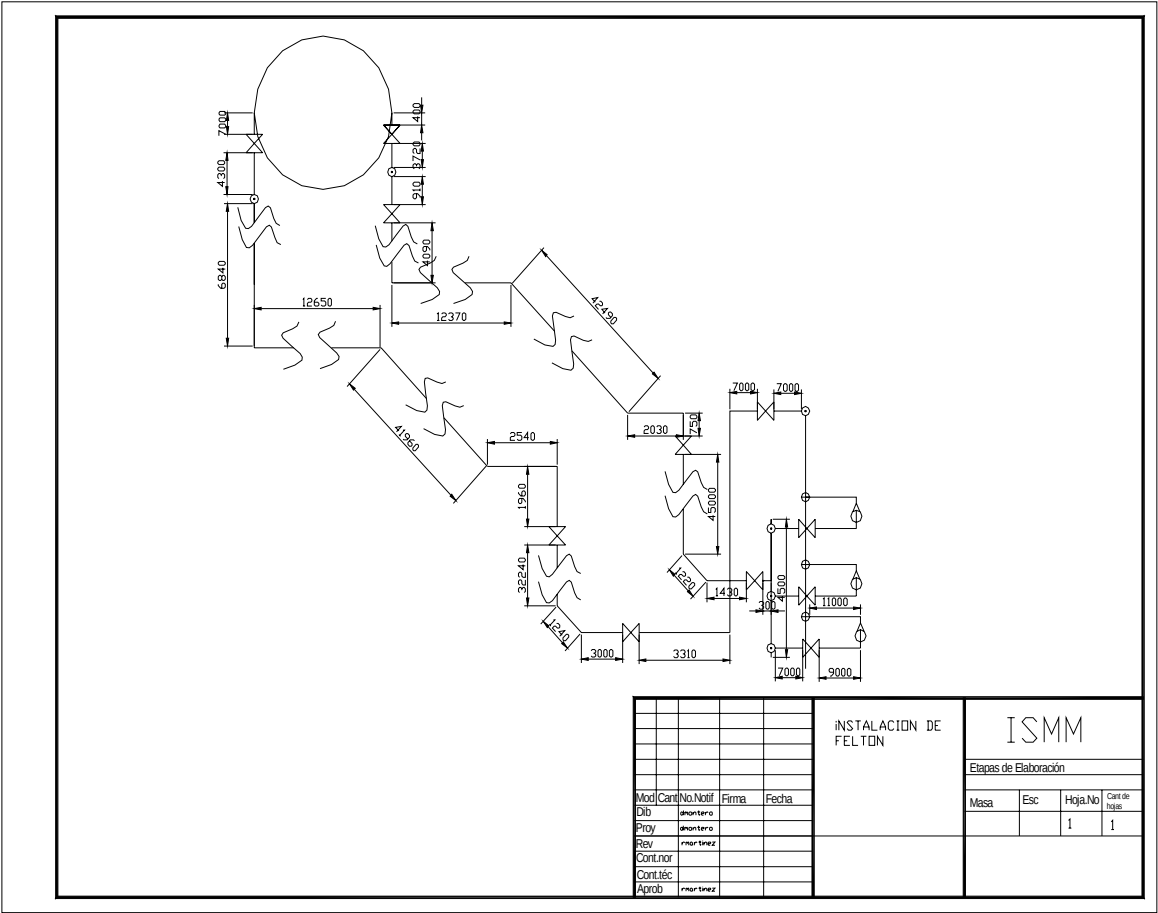
Anexos**Anexo I - Comportamiento del valor calórico superior para diferentes combustibles****Anexo II -Comportamiento de la Ceniza para diferentes combustibles****Anexo III -Comportamiento del vanadio para diferentes combustibles**



Anexos IV - características de la instalación

SUCCIÓN			
Accesorio	Leg	Cantidad	Leg total
Diámetro 219 mm			
Válvula de compuerta abierta	1.5	3	4.5
Codo 90°	4.4	2	8.8
Filtro			
Tubería recta			2.4
Diámetro 324 mm			
Válvula de compuerta abierta	2.25	1	2.25
Codo 45°	4.7	1	4.7
Tubería recta			7.25
Diámetro 426 mm			
Válvula de compuerta abierta	2.9	3	8.7
Codo 90°	8.5	4	34.0
Codo 45°	6.1	2	12.2
Calentador			
Tubería recta			112.76
DESCARGA			
Diámetro 219 mm			
Válvula de compuerta abierta	1.5	5	7.5
Codo 90°	4.4	35	154.0
Codo 45°	3.25	4	13.0
Cheque	16.76	1	16.76
Tubería recta			667.0

<u>RECIRCULACIÓN CORTA</u>			
Diámetro 159 mm			
Válvula de compuerta abierta	1.1	3	3.3
Válvula reguladora		1	
Codo 90°	3.25	6	19.5
Tubería recta			9.97
<u>RECIRCULACIÓN LARGA</u>			
Diámetro 159 mm			
Válvula de compuerta abierta	1.1	3	3.3
Válvula reguladora		1	
Codo 90°	3.25	5	16.25
Codo 45°	2.3	1	2.3
Tubería recta			12.81
Diámetro 426 mm			
Válvula de compuerta abierta	2.9	2	5.8
Codo 90°	8.5	4	34.0
Codo 45°	6.1	2	12.2
Tubería recta			103.64



Anexo V Reómetro de tubo capilar ISMM.







Figura 2. Foto de la instalación de compresores del ISMM

Anexo VI Resultados de la metodología de cálculo realizada en el Excel.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Pb(Mpa)	n(%)	P(kw)	Q(l/s)	2 veces Pb	2 veces Q	Q(m ³ /s)	2 vecesQ(m ³ /s)				
0	0	5	15	0	30	0,015	0,03				
0,1	14,5	7	15	0,2	30	0,015	0,03				
0,2	31,3	8,2	15	0,4	30	0,015	0,03				
0,3	40,5	10,5	14,9	0,6	29,8	0,0149	0,0298				
0,4	48	12,5	14,9	0,8	29,8	0,0149	0,0298				
0,5	52,5	14,7	14,7	1	29,4	0,0147	0,0294				
0,6	57	16	14,5	1,2	29	0,0145	0,029				
calculo de velocidad para variaciones de caudales para diametro 0,15 m											
Q (m ³ /s)	Veloc.(m/s)	caida de presion f succión	caida de presion f retorno	perdidas locales succión	perdidas locales retorno	caudales para el retorno					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,007	0,39631989	0	5911,39088	0,00591139	150,706377	0,00015071	0,005				
0,014	0,79263977	0	10804,0298	0,01080403	602,825507	0,00060283	0,01				
0,021	1,18895966	0	0	0	0	0					
0,028	1,58527955	0	0	0	0	0					
0,035	1,98159943	0	0	0	0	0					
		Pa	Mpa	Pa	Mpa		753,531884				
calculo de velocidad para variaciones de caudales para diametro 0,2 m											
Q	Veloc.	caida de presion f succión	caida de presion f retorno	perdidas locales succión	perdidas locales retorno	caudales para el retorno					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,007	0,22292994	525,35678	0,00052536	0	44,7579486	4,4758E-05	0			0,005	
0,014	0,44585987	960,175096	0,00096018	0	179,031794	0,00017903	0			0,01	
0,021	0,66878981	1366,31184	0,00136631	0	402,821537	0,00040282	0				
0,028	0,89171975	1754,8764	0,00175488	0	716,127178	0,00071613	0				
0,035	1,11464968	2130,87633	0,00213088	0	1118,94871	0,00111895	0				
		Pa	Mpa	Pa	Mpa	Pa	Mpa				
calculo de velocidad para variaciones de caudales para diametro 0,3 m											

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
calculo de velocidad para variaciones de caudales para diametro 0,3 m											
Q	Veloc.	caida de presion f succión	caida de presion f retorno			perdidas locales succión		perdidas locales retorno		caudales para el retorno	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
0,007	0,09907997	439,703031	0,0004397	0	0	2,59630504	2,5963E-06	0		0,005	
0,014	0,19815994	803,628918	0,00080363	0	0	10,3852202	1,0385E-05	0		0,01	
0,021	0,29723992	1143,54946	0,00114355	0	0	23,3667454	2,3367E-05	0			
0,028	0,39631989	1468,76276	0,00146876	0	0	41,5408807	4,1541E-05	0			
0,035	0,49539986	1783,45996	0,00178346	0	0	64,907626	6,4908E-05	0			
		Pa	Mpa	Pa	Mpa	Pa	Mpa				
calculo de velocidad para variaciones de caudales para diametro 0,4 m											
Q	Veloc.	caida de presion f succión	caida de presion f retorno			perdidas locales succión		perdidas locales retorno		caudales para el retorno	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
0,007	0,05573248	2021,52856	0,00202153	1386,50305	0,0013865	4,54823369	4,5482E-06	2,0649627	2,065E-06	0,005	
0,014	0,11146497	3694,67276	0,00369467	2534,06018	0,00253406	18,1929348	1,8193E-05	8,25985081	8,2599E-06	0,01	
0,021	0,16719745	5257,4527	0,00525745	0	0	40,9341032	4,0934E-05	0			
0,028	0,22292994	6752,61633	0,00675262	0	0	72,771739	7,2772E-05	0			
0,035	0,27866242	8199,43233	0,00819943	0	0	113,705842	0,00011371	0			
		Pa	Mpa	Pa	Mpa	Pa	Mpa				
calculo de la variacion de presion para todas las perdidas en la succion											
caida de presion total en la succion				caida de presion total del retorno				Calculo de las perdidas totales en la instalacion			
Del fluido	Locales			Del fluido	Locales			en la succion	en el retorno		P
0	0			0	0			P totales	P totales		N
0,00298659	5,1902E-05			0,00729789	0,00015277			0,00303849	3038,49086	0,00745067	7450,66527
0,00545848	0,00020761			0,01333809	0,00061109			0,00566609	5666,08672	0,01394918	13949,1753
0,00776731	0,00046712							0,00823444	8234,43638	Mpa	Pa
0,00997626	0,00083044							0,0108067	10806,6953		
0,01211377	0,00129756							0,01341133	13411,3308		
								Mpa	Pa		

A	B	C	D	E	F	G	H
Calculo de Reynolds para toda la instalacion							
En la succión				En el retorno			
para 0,2	0,3	0,4	Total reynolds	Para 0,15	0,4	Total reynolds	
0	0	0	0	0	0	0	
24,5659746	13,9819308	9,37351125	47,9214167	25,0538321	6,40881337	31,4626455	
53,7647826	30,6006777	20,5147486	104,880209	54,8325013	14,0262482	68,8587495	
85,0121533	48,3853812	32,4376455	165,83518			100,321395	
117,668926	66,9722576	44,8983204	229,539504				
151,415419	86,1793579	57,7747946	295,369572				
			843,545881				

M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Vel.m/s	perdidas entre la longitud					perdidas entre la longitud		
0	0					0		
0,039808917	17,9680454					13,3979931		
0,079617834	32,9271523					24,5302975		
	46,9881767					0		
	60,5302241							
	73,7241768							
Potencia en el retorno			Potencia en la succion					
N (w)			N (w)					
0			0					
37,25332634			21,269436					
139,4917534			79,3252141					
			172,923164					
			302,587468					
			469,396578					

Mediciones realizadas en el reómetro

mediciones realizadas para una temp de 32grados								
presion en Pa			tiempo en s			Volumen en m3		
P1	P2	P3	t1	t2	t3	V1	V2	V3
240627	240972	239592,8	46	46	58	0,0001	0,0001	0,00012
274066,6	275101	275100,8	44	40	40	0,0001	0,0001	0,0001
286132,4	286132	286132,4	36	38	40	0,0001	0,0001	0,0001
306816,7	306817	306816,7	36	35	33	0,0001	0,0001	0,0001
341290,5	341291	341290,5	35	34	32	0,0001	0,0001	0,0001
348185,2	375764	374040,6	80	25	35	0,00027	0,0001	0,0001

presion		tiempo		vol	
<i>O</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
240397,20000	515016,28000	50,00000	48,00000	0,00011	0,00000
274756,06667	356523,21333	41,33333	5,33333	0,00010	0,00000
286132,40000	0,00000	38,00000	4,00000	0,00010	0,00000
306816,70000	0,00000	34,66667	2,33333	0,00010	0,00000
341290,50000	0,00000	33,66667	2,33333	0,00010	0,00000
365996,70000	238679934,60996	46,66667	858,33333	0,00016	0,00000

velocidad						
<i>Q</i>	<i>esfuerzo cort.</i>	<i>gr v</i>	<i>O</i>	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>Visc.aparente</i>
2,13333E-06	180,2979	100,6526697	0,075489502	2,467	0,93	1,786369843
2,41935E-06	206,06705	114,1474328	0,085610575	2,467	0,93	1,770706245
2,63158E-06	214,5993	124,1603655	0,093120274	2,467	0,93	1,760314801
2,88462E-06	230,112525	136,0988622	0,102074147	2,467	0,93	1,749038361
2,9703E-06	255,967875	140,1414027	0,105106052	2,467	0,93	1,745458379
3,35714E-06	274,497525	158,393152	0,118794864	2,467	0,93	1,730563746

mediciones realizadas para una temp de 62grados

presion en Pa		tiempo en s		Volumen en m3	
P1	P2	t1	t2	V1	V2
68947,57	68947,6	41	42	5E-05	0,00005
103421,4	103421	27	24	5E-05	0,00005
137895,1	137895	22	22	5E-05	0,00005
172368,9	172369	19	15	5E-05	0,00005
206842,7	206843	14	14	5E-05	0,00005
227182,3	227527	10	10	5E-05	0,00005
241316,5	241317	10	9	5E-05	0,00005
275445,6	275790	9	9	5E-05	0,00005
308540,4	308540	9	8	5E-05	0,00005

presion		tiempo		vol	
<i>O</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
68947,57	0	41,5	0,5	0,00005	0
103421,4	0	25,5	4,5	0,00005	0

137895,1	0	22	0	0,00005	0
172368,9	0	17	8	0,00005	0
206842,7	0	14	0	0,00005	0
227354,7	59409,04	10	0	0,00005	0
241316,5	0	9,5	0,5	0,00005	0
275618	59409,05	9	0	0,00005	0
308540,4	0	8,5	0,5	0,00005	0

Q	velocidad			K	n	Visc. Aparente
	esfuerzo cort.	grad v	O			
1,20482E-06	51,7106775	56,8445047	0,042633379	1,58	0,87	0,934431744
1,96078E-06	77,56605	92,5116449	0,069383734	1,58	0,87	0,877104935
2,27273E-06	103,421325	107,2294066	0,080422055	1,58	0,87	0,860431457
2,94118E-06	129,276675	138,7674674	0,104075601	1,58	0,87	0,832069668
3,57143E-06	155,132025	168,5033532	0,126377515	1,58	0,87	0,811330824
0,000005	170,5159875	235,9046945	0,176928521	1,58	0,87	0,776607054
5,26316E-06	180,987375	248,3207311	0,186240548	1,58	0,87	0,771445766
5,55556E-06	206,7134625	262,1163272	0,196587245	1,58	0,87	0,766042487
5,88235E-06	231,4053	277,5349347	0,208151201	1,58	0,87	0,760371432

Anexo VII Relación de la presión en cuanto al caudal

