



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: Determinación de las temperaturas racionales de transporte del crudo cubano CM650 utilizado en la termoeléctrica de Felton Lidio Ramón Pérez.

Autor: Leodanis Avila Feria

Tutor: Ms.C. Héctor L. Laurencio Alfonso

Moa – 2010
Año 52 de la Revolución

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Moa, 29 de Junio de 2010

Año 52 de la Revolución

Yo **Leodanis Avila Feria**, autor del Trabajo de Diploma titulado: **Determinación de las temperaturas racionales 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: **Leodanis Avila Feria**

Tutor (es): **Ms.C. Héctor L. Laurencio Alfonso**

Pensamiento

En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y den más, que digan mejor ahora que mañana.”

Che

Agradecimientos

A mi tutor M. Sc. Héctor L. Laurencio Alfonso por la confianza y ayuda depositada durante la realización de la tesis.

A mi tía Dulce Feria que siempre se preocupó por mí y hoy le demuestro que su apoyo no fue en vano.

A mi hermano Yadian Delgado Feria por tenerme como un hijo y darme siempre su ayuda incondicional.

A mis dos amigos Roberto y Yosbani que siempre estuvieron conmigo y me dieron su apoyo.

A todos los profesores de la facultad de Ingeniería Mecánica que de una forma u otra me ayudaron a alcanzar este éxito.

A la revolución por darme la oportunidad de estudiar y hoy alcanzar el nivel superior.

A todos

Muchas Gracias

Dedicatoria

Dedico la culminación de este trabajo:

En especial a mi querida madre Margot Feria Rodríguez que aunque no pudo estar conmigo físicamente en este momento tan importante para mí se que estaría orgullosa de verme desarrollarme como un hombre de bien y poder alcanzar este título.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio, relacionado con las propiedades de transporte de emulsiones preparadas con petróleo crudo cubano; con el fin de contribuir a las soluciones relacionadas a los métodos de cálculos aplicables a fluidos no newtonianos en específico. A partir del estudio reológico se hace la caracterización en cuanto al comportamiento del fluido, donde se ilustra el comportamiento de la viscosidad aparente con relación al gradiente de velocidad, observándose que la emulsión presenta propiedades pseudoplásticas para diferentes temperaturas. Se proponen modelos y procedimiento de cálculo apropiado para la selección y evaluación de sistemas de transporte, relacionado con las propiedades reológicas del fluido. Los modelos propuestos para la estimación de pérdidas de carga y potencia son válidos para fluidos pseudoplásticos que se transportan en régimen laminar. Como propósito del efecto económico y medioambiental relacionado al transporte de emulsiones de petróleo; se analiza las incidencias más significativas, como el consumo de energía eléctrica para el transporte y peligros a la salud humana, causados al interactuar con el petróleo. (Laurencio, 2007).

ABSTRAC

Presently work is carried out a study, related with the properties of transport of prepared emulsions with Cuban raw petroleum; with the purpose of contributing to the solutions related to the methods of applicable calculations to fluids non newtonianos in specific. Starting from the study reológico the characterization is made as for the behavior of the fluid, where the behavior of the apparent viscosity is illustrated with relationship to the gradient of speed, being observed that the emulsion presents properties seudoplásticas for different temperatures. They intend models and procedure of appropriate calculation for the selection and evaluation of systems of transport, related with the properties reológicas of the fluid. The models proposed for the estimate of lost of load and power are been worth for flowing seudoplásticos that are transported in régime to laminate. As purpose of the economic and environmental effect related to the transport of emulsions of petroleum; it is analyzed the most significant incidences, as the electric power consumption for the transport and dangers to the human health, caused to the interactuar with the petroleum. (Laurencio, 2007).

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.	
1.1- Introducción	4
1.2- Estudios Precedentes	4
1.3- Descripción del flujo tecnológico de la instalación	9
1.4. Propiedades generales de los petróleos	10
1.4.1- Clasificación del petróleo	11
1.4.2- Clases del Petróleo cubano	13
1.5- Factores que influyen sobre la viscosidad	14
1.5.1- Modelos de viscosidad de la mezcla	15
1.6- Tendencias para la determinación del gradiente de presión en tuberías	18
1.7- Interacciones térmicas en los sistemas de transporte.....	22
1.8- Aplicación del transporte de petróleo por tuberías	23
1.8.1- Ventajas de transporte por sistemas de tubería.....	24
1.9- Conclusiones del capítulo	25
CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN TEÓRICA DEL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO	
2.1- Introducción	27
2.2- Modelos reológicos de fluidos	27
2.2.1- Curvas de flujo	32
2.3- Procedimientos metodológicos sobre la determinación del gradiente de presión en conductos circulares	33
2.3.1- Modelo matemático de la potencia necesaria en el transporte de fluidos seudoplásticos por tuberías	40
2.4- Expresión para el análisis de costo de transporte.....	41

2.4.1- Costo por calentamiento de combustible	41
2.5- Gradiente de temperatura en la tubería de transporte	42
2.5.1- Determinación del Nusselt	44
2.5.2- Temperatura final en el conducto.....	44
2.6- Materiales y técnicas utilizadas.....	45
2.6.1-Diseño de experimentos y procesamiento estadístico	46
2.6.2- Procesamiento estadístico de los datos.....	46
2.7- Conclusiones del capítulo	48
 CAPÍTULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO EN EL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO.	
3.1- Introducción	50
3.2- Características reológicas.....	50
3.2.1- Resultados experimentales de las propiedades reológicas	51
3.2.2- Estimación de los parámetros reológicos.....	52
3.2.3- Comportamiento pseudoplástico de la viscosidad aparente	53
3.2.4- Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas	54
3.3- Gradiente de temperatura en la tubería de transporte	56
3.4- Obtención de los parámetros racionales de transporte y valoración económica.....	58
3.5 Impacto medioambiental	60
3.6- Conclusiones del capítulo	61
CONCLUSIONES GENERALES.....	62
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXOS	

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 de sólidos en conductos tubulares, a distancias cada vez mayores.

El estudio del flujo simultáneo de gas y de líquido a través de un conducto, es una de las combinaciones de flujo bifásico más complejas que existen. Esto se debe principalmente a la gran variedad de configuraciones relacionadas con la distribución espacial de ambas fases en la tubería y a que la fase gaseosa es compresible. Estas configuraciones espaciales se conocen como patrones de flujo. El flujo de gas y de líquido es encontrado frecuentemente en la industria petrolera, química, nuclear, en plantas termoeléctricas, etc.

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 incide 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 transportarlo 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, donde 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. 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.

En estudios realizados a esta instalación de primer y segundo impulso se detecto el **Problema** relacionado con el insuficiente conocimiento respecto a las propiedades racionales de transporte en el sistema de bombeo del petróleo crudo cubano CM650 de la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.

El **Objetivo de investigación** parte de establecer la metodología para el cálculo de parámetros racionales del petróleo crudo cubano CM650 en la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.

Se utilizará como **Campo de acción** la Instalación de bombeo primer y segundo impulso

Una vez determinado el campo de acción se plantea la siguiente **Hipótesis**

✚ Mediante el estudio teórico conjugado con métodos existentes, permitan obtener un modelo útil para predecir los valores satisfactorios de los parámetros de trabajo en la instalación de transporte de petróleo crudo cubano CM 650 de primer y segundo impulso de la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.

Como **Tareas de trabajo** se tienen en cuenta los siguientes aspectos fundamentales

- ✚ Determinación de las pérdidas de calor durante el transporte del petróleo crudo cubano CM650.
- ✚ Obtención de la relación por medio de la experimentación entre el flujo de vapor y la temperatura de salida del petróleo en el intercambio.
- ✚ Validación del modelo que describe el gradiente de temperatura.
- ✚ Establecimiento de la relación de costo por calentamiento en el intercambiador de calor.
- ✚ Obtención del modelo que describa la temperatura y velocidad racional del petróleo crudo cubano CM650.

Los **Métodos de investigación** que se utilizaran son los siguientes

-  Método de investigación documental y bibliografía para la sistematización del conjunto de conocimientos de estudio.
-  Método de la modelación matemática del gradiente de temperatura.
-  Método de la investigación experimental para describir, caracterizar el objetivo de estudio y sus principales regularidades.

MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- 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 de sólidos en conductos tubulares, a distancias cada vez mayores.

El papel de los sistemas de transporte en la industria petrolífera es considerable en los tiempos actuales. La instalación de un nuevo oleoducto requiere gran cantidad de estudios previos debido a la complejidad de montaje de los mismos. La realización de estudios en este campo, permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que existen entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos que están presentes en el transporte de petróleos pesados por sistemas de tuberías. En tal sentido, el **objetivo** del capítulo es:

Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionada al transporte y propiedades de fluidos complejos; orientado en las ventajas del proceso en estudio, que soporten como base la investigación del transporte de petróleo crudo cubano (CM-650), dando alcance a las tareas y objetivos a seguir para la realización de la investigación, a partir del problema formulado.

1.2- Estudios Precedentes

“La teoría de los fluidos deberá basarse necesariamente en la experimentación” (D’Alambert 1744), demostró que no existe resistencia al movimiento de un cuerpo cuando éste se mueve a través de un fluido ideal (no viscoso o invíscido), 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, (Laurencio, 2007).

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 Poiseuille, 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 Gottlieh 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 con resultados reconocidos; la revisión bibliográfica ha estado dirigida en dos líneas fundamentales:

- ✚ Los trabajos sobre la temática de fluidos no newtonianos desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuado en los últimos años.

- ✚ La información relacionada con el enfoque teórico – metodológico.

Guzmán (2001), este autor conceptualiza con claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador su empleo para sustentar teóricamente la investigación. A pesar que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia se mantiene vigente.

Una vez definida la teoría de sistema, como base teórica de la investigación, fue necesaria la búsqueda de métodos que permitieran la identificación y el análisis de los diferentes aspectos que tributan al proceso de transporte por tuberías como sistema integrado. El análisis se basa en la obtención del gradiente de presión creado entre el inicio y el final de un tramo de tubería, teniendo en cuenta el comportamiento reológico del fluido, para nuestro caso el petróleo crudo; incorporando en el análisis el gradiente de temperatura que evidencia el fluido al transportarse, lo que conduce a un flujo no estacionario.

El problema de los efectos viscosos de disipación de energía, se empezó a abordar experimentalmente con flujos a baja velocidad en tuberías, en 1839 por el médico francés Jean Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero alemán Gotthif Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827, independientemente al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier- Stokes.

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 (Laurencio y Delgado, 2008). De la Paz (2002), realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones toleradas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose la determinación de sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de deformación ensayadas. Se encuentra como insuficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para variaciones de temperaturas; siendo estas variables, de gran influencia en la estructura y propiedades reológicas 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, (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 la fluencia 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 en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm; implicando, el número generalizado de Reynolds (Re^*) para diferentes grados de abertura.

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 del 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 pérdida 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

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

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.

Izquierdo (1989), en su trabajo 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.

El 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 (Ibarz et al., 2001), (Vélez, 2003)

Saldás (2008), en sus estudios realizado llega a 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, (modelo de Ostwald de Waele), cumpliendo con la ley de potencia además de presentar un error promedio de 10.92% correspondiéndose este a la validación del modelo para el cálculo de potencia necesaria y de temperaturas en unidad de longitud en conductos.

En el caso de la transferencia de calor muchos han sido los autores que abordan estos procesos como fue Incropera et al. (2003), el cual recoge la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de calor y masa, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituye un pilar fundamental para la comprensión de las mismas en sus más diversas formas.

1.3 - Descripción del flujo tecnológico de la instalación

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 dos tanques de recepción y almacenamiento del mismo en la termoeléctrica, con capacidad de 15 000 m³ cada uno, estos cuentan con dispositivos interiores (serpentín) y exteriores (calentador) para el calentamiento del combustible entre 60 y 70 °C, con el fin de facilitar su bombeo.

El combustible es succionado desde los tanques por dos bombas de engranes para cada unidad, situadas en la casa de bombas de petróleo primer impulso, transportándolo con una temperatura entre 60 y 70 °C hasta la casa de bombas de petróleo segundo Impulso, manteniendo la presión constante de 0,45 MPa en la succión de las bombas del segundo impulso.

En la casa de bombas del 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) para luego entrar al horno.

1.4 - 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 soporte 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.

1.4.1- Clasificación del petróleo

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.

La clasificación del petróleo se basa en la clase de compuestos químicos 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 (aproximado a 0,85 kg/lit).
- ✚ 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 de 0,95 kg/lit.
- ✚ Por destilación producen un abundante residuo de asfalto. Las asfáltitas o rafealitas argentinas fueron originadas por yacimientos de este tipo, que al aflorar perdieron sus hidrocarburos volátiles y sufrieron la oxidación y polimerización de los etilénicos.

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:

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

1.4.2 - Clases del Petróleo cubano

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 elaborarse a partir del año 1997).

Los números que representan a cada uno de estos combustibles definen la viscosidad en CentiStokes (cSt) a 50 °C. En la tabla 1.2 se dan las especificaciones del CM-650, al ser el crudo analizado en esta investigación.

Tabla 1.1. Especificaciones 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

Fuente: Contrato CUPET – UNE 2005.

Las características Físico-Química de los combustibles cubanos varían considerablemente con respecto a los combustibles de producciones internacionales, por lo que éste se caracteriza como un combustible de baja calidad. Estas características traen múltiples dificultades en el transporte y en los generadores de vapor, que van desde su preparación, manipulación y quema.

1.5 - Factores que influyen sobre la viscosidad

Efecto de la temperatura.

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos (Garcell, 1993).

a) Disminución de la viscosidad del medio dispersante.

b) Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de líquidos se representa bien mediante la ecuación de Andrade (Reid Y Sherwood, 1966; Laurencio et al., 2007).

$$\mu_m = C \cdot e^{B \cdot t} \quad (1.1)$$

En la que t es la temperatura; C y B son constantes, cuyos valores dependen de la correlación unidades de μ y de t.

De acuerdo con la ecuación 1.1, la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura.

- Efecto del pH.

En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoelectrico, el equilibrio atracción – 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.

1.5.1- 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 1.2, 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 del líquido y del gas, respectivamente (Haoulo et al.,2005).

Tabla 1.2. 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)	$\mu_M = \mu_L (1 - \beta)(1 + 2.5\beta) + \mu_G \beta ; \beta = \frac{\rho_L x}{\rho_L x + \rho_G (1 - x)}$
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 1.3 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 y del gas, respectivamente (Haoulo et al, 2005).

Tabla 1.3. 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 líquido con deslizamiento se evalúa con el ajuste de la correlación de Eaton et al. (1967) propuesto por García (2004).

1.6 - Tendencias para la determinación del gradiente de presión en tuberías

El parámetro más importante del flujo en tuberías es el gradiente de presión. El comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad en un flujo multifásico no newtoniano, es sustancialmente diferente del comportamiento de un flujo monofásico. Datos experimentales del comportamiento del gradiente de presión en sistemas multiifásicos en tuberías horizontales han sido obtenidos en varios trabajos (Doron y Barnea, 1995; Doron et al, 1997). La predicción de las caídas de presión y los patrones de flujo es un problema muy complejo. Las dos aproximaciones principales que se han usado son:

- 1) Correlaciones de datos empíricos, usando posiblemente un razonamiento semi-teórico (por ejemplo: Newitt et al., 1955; Turian y Yuan, 1977; entre otros)
- 2) Desarrollos de aproximaciones teóricas basadas en una modelación fenomenológica, tal como los modelos de dos capas de Wilson (1988), Televantos et al. (1979), Gillies et al. (1991)

y los modelos de tres capas de Doron y et al. (1997), entre muchos otros. La principal limitación de los modelos teóricos existentes es su inhabilidad para predecir, de manera suficientemente exacta, mientras que las correlaciones empíricas tienen un intervalo limitado de aplicabilidad.

En el caso de tuberías rectas los números adimensionales que permite establecer el criterio de semejanza en diferentes condiciones de flujo para fluidos son (Otero, 1989, Laurencio, 2007):

$$\text{Número de presión} \dots \left(\frac{H}{\frac{v^2}{2 \cdot g}} \right) = \left(\frac{\Delta p}{\frac{v^2}{2} \cdot \rho} \right) \quad (1.2)$$

$$\text{Número de geometría} \dots \left(\frac{L}{D} \right); (\text{Rugosa}) \dots \left(\frac{\xi}{D} \right) \quad (1.3)$$

Número de Reynolds (Re^*), para fluidos pseudoplásticos y dilatantes (Garcell, 2001). (Turro, 2002) y (Laurencio, 2007).

$$\text{Re}^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (1.4)$$

Estos números se suelen ordenar en la forma siguiente:

$$\left(\frac{H}{\frac{v^2}{2 \cdot g}} \right) = k_1 \cdot \left(\frac{\xi}{D} \right)^a \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^b \cdot (\text{Re}^*)^c \quad (1.5)$$

Donde: a, b, c, k_1 : Son los coeficientes de ajuste del modelo. Esta expresión evidencia el efecto del escalado al variar las dimensiones de la tubería. Para ($b=1$), se reduce a la ecuación de Darcy-Weibach.

$$\left(\frac{H}{\frac{v^2}{2 \cdot g}} \right) = \lambda \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1.6)$$

Donde: λ es el coeficiente de fricción por rozamiento del fluido (adimensional).

$$\lambda = k_1 \cdot \left(\frac{\xi}{D} \right)^a \cdot (\text{Re}^*)^c \quad (1.7)$$

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, para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Welty et al., 1976); (Bandala, 2001), (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).

Darby (2001) y Gardea (2008), tratan el factor de fricción de Fanning f_F con la gráfica obtenida por Dodge y Metzner para fluidos que se ajustan a la ley de potencia, adaptada por Levenspiel (1986), que se presenta en la figura 1.1. Para este caso $f_F = \lambda/4$, siendo f el factor de fricción de la fórmula de Darcy.

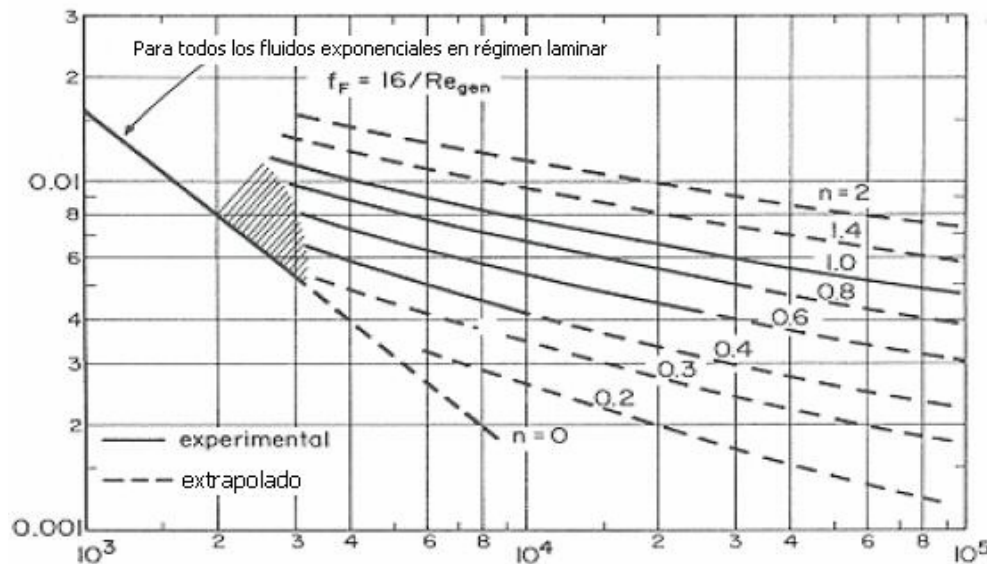


Figura 1.2. Diagrama de f_F para fluidos que se ajustan a ley de potencia.

Fuente: Gardea (2008).

Los coeficientes de fricción para el manejo de fluidos seudoplásticos en diferentes accesorios de 1 pulgada, fueron medidos por Martínez et al. (2001), dicho coeficiente fue expresado como función del número de Reynolds generalizado.

Manssur y Rajie (1988) desarrollaron una ecuación explícita generalizada para el factor de fricción de fluidos newtonianos y no newtonianos en conductos circulares y no circulares, considerada por sus creadores como un paso primario en el desarrollo de una expresión universal para la determinación del factor de fricción de todo tipo de fluido, conducto y régimen de circulación, utilizando la ecuación para el cálculo del Reynolds generalizado.

$$\lambda^* = \psi \cdot (Re^* \cdot n) \cdot e^{\beta \cdot (Re^* \cdot n)} \quad (1.8)$$

En la que las funciones ψ y β son determinados experimentalmente.

Este modelo no incluye los efectos de la rugosidad de la tubería (e/d) para la determinación del coeficiente de fricción de fluidos no newtonianos, lo cual limita su aplicación para el caso de tuberías rugosas. Wojs (1993) al realizar estudios friccionales en tuberías lisas y rugosas con soluciones diluidas de polímeros, desarrollo una ecuación teórico experimental que aunque concuerda adecuadamente con los resultados experimentales, su aplicación aun se encuentra limitada por estar el factor de fricción de Darcy implícito en la ecuación.

$$\frac{1}{\lambda^*} = -A \cdot \log \left[\left(\frac{B}{\text{Re}^* \cdot \lambda^{*\frac{1-n}{2}}} \right) + \frac{(e/d)}{\alpha} \right] \quad (1.9)$$

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

Turiño (1996) recomienda el arreglo de la ecuación de Darcy-Weibach, donde la constante hidráulica de la tubería (R) agrupa las características geométricas del conducto, las propiedades de la resistencia friccional del fluido según el régimen de corriente en el conducto.

$$H = R \cdot Q^n \quad (1.10)$$

Cuando el fluido transportado se ajusta a la ley de potencia, la característica friccional en una tubería (en régimen laminar), puede expresarse por el modelo (Gusman, 2001 y Laurencio, 2007).

$$R = \frac{2K}{\gamma} \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \quad (1.11)$$

Donde: n - Índice de la ley de potencia (adimensional). K - Índice de consistencia másica ($\text{Pa} \cdot \text{s}$). γ - Peso específico, (N / m^3).

En los fluidos que siguen el modelo de Ostwald de Waele, el Re_{cr} puede estimarse en función de n (Garcell, 2001), el Reynolds crítico se determina por la siguiente ecuación.

$$Re_{cr} = 2100 + 875 \cdot (1 - n). \quad (1.12)$$

Así, a medida que n disminuye, alejándose de la unidad, el régimen laminar se extiende a valores mayores de Re .

1.7 - Interacciones térmicas en los sistemas de transporte

Selección del aislamiento térmico.

El aire es un conductor muy malo y por consiguiente las pérdidas por conducción serán pequeñas. Por otra parte puesto que la corriente por convección se forman muy fácilmente existe una considerable pérdida de calor desde una superficie no aislada. El aprovechamiento del calor es una necesidad económica y normalmente es preciso aplicar a la superficie caliente algún tipo de aislamiento

Para la selección de un buen material aislante se debe de cumplir dos exigencias fundamentales como son

✚ Que tenga una baja conductividad calorífica.

✚ Que suprima las corrientes de convección.

Los materiales frecuentemente utilizados son corcho, amianto, magnesia al 85%, y lana de vidrio. El corcho es muy buen aislante pero se deteriora a temperaturas moderadas; la magnesia al 85% con amianto y el amianto solo se utilizan mucho para el aislamiento de tuberías de vapor, la magnesia al 85% es probablemente el aislante mas ampliamente utilizado. Con frecuencia se utilizan placas metálicas delgadas para proteger el aislante.

Espesor económico del aislamiento

Al aumentar el espesor del aislamiento se reduce las pérdidas de calor y de esta forma disminuye los costos de operación. Los costos del aislamiento aumentan con el espesor, de forma que existirá un espesor a partir del cual un aumento del mismo

no ahorrara el calor suficiente para compensar su costo adicional. En general cuanto menor es la tubería menor es el espesor utilizado. Para temperaturas de 100 a 150 °C y para tuberías de hasta 150 mm diámetro (LYLE 1947) recomienda un aislamiento de magnesia al 85 % de 25 mm de espesor y 50 mm para tubería de diámetro inferior a 230mm. Con temperatura de 200 a 250 °C sugiere 38 mm para tubería de diámetro inferior a 75 mm y 50 para tubería de diámetro superior a 230 mm.

1.8 - Aplicación del transporte de petróleo 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 en 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: 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 ellos.

1.8.1- Ventajas de transporte por sistemas de tubería

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 (Laurencio, 2007).

En la actualidad en las industrias cubanas se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge en este tipo de transporte, debido a su gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte.

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 esta determinada por las significativas ventajas que este 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 reserva de agua suficiente y la dependencia de la capacidad de tráfico de la tubería, gastos de energía, desgaste de la tubería debido a la granulometría y propiedades del material a transportar, sin embargo estas desventajas son compensadas con las ventajas y en el caso de transportar petróleo la mayoría de estas desventajas no interviene en el proceso.

Las investigaciones dentro del transporte por tuberías, específicamente del desplazamiento de flujos líquidos se han desarrollado en tres direcciones fundamentales (Turro, 2002):

- ✚ 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.

1.9 – Conclusiones del capítulo

- ✚ Se hace referencia en general, al estudio de las propiedades superficiales y de flujo de suspensiones acuosas con partículas, pulpas minerales, polímeros y emulsiones de combustibles pesados y extrapesados; encontrando muy poca información sobre estos aspectos para los petróleos pesados de Cuba.
- ✚ La esencia física del proceso de flujo por tuberías del petróleo pesado cubano es poco conocida; aparejado a las imprecisiones de las teorías científicas existentes,

para la predicción del gradiente de presión en tuberías de diámetros relativamente grande.

- ✚ Es insuficiente la información acerca del flujo de petróleo cubano a través de tuberías y el carácter no estacionario al presentar gradientes de temperaturas; de ahí la necesidad del estudio teórico y experimental de este sistema en particular.

INVESTIGACIÓN TEÓRICA DEL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO

2.1- Introducción

Los conocimientos Teóricos acerca del comportamiento y propiedades de transporte del petróleo crudo cubano, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la resolución de problemas asociados a la evaluación y diseño de los sistemas de transporte del fluido por sistemas de tuberías a nivel de la industria cubana; en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer la investigación teórica que posibilite describir el comportamiento de flujo por tuberías según las propiedades de transporte del petróleo crudo cubano (CM-650); asociados a fluidos no newtonianos y no estacionarios.

2.2 - Modelos reológicos de 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.

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtoniano y no newtoniano (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988; Díaz, 1989). A su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos. Como objetivo de este capítulo se establece, la caracterización de los principales factores y parámetros relacionados a las propiedades de transporte de fluidos complejos y en específico a los casos de estudio.

Los modelos más difundidos, (Garcell, 1988; Turro, 2002; Gardea (2008) 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 $\left(-\frac{dv_x}{dy}\right) = \dot{\gamma}$. (Figura 2.1-a).

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

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 $n < 1$). (Figura 2.1-b).

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

Donde: n - índice de flujo, (adimensional). K - índice de consistencia másica, (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:

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

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

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

Según Khatib (2006), el comportamiento de la viscosidad en el caso de fluidos seudoplastico puede ser descrito por el modelo de Sisko, el mismo viene dado por.

$$\mu_a = A + K' \cdot \left(\overset{o}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.5)$$

Ajustando este modelo a los datos experimentales, donde se obtienen los parámetros de modelo, A y K'.

El gradiente de velocidad se puede expresar en función de la velocidad media del fluido en la sección recta, v, y del índice de comportamiento al flujo n. Para los líquidos seudoplásticos y dilatantes, que se ajustan al modelo de Ostwald de Waele, la expresión es:

$$\overset{o}{\gamma} = \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{8 \cdot v}{D} \right) \quad (2.6)$$

 **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).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \overset{o}{\gamma} \quad (2.7)$$

Donde: τ_0 - Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia. μ_p - Viscosidad plástica.

Para $\tau_o = 0$ la ecuación 2.7, se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu$. La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene, combinando la ecuación 2.7 en la ecuación 2.3.

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_o}{\gamma} \quad (2.8)$$

✚ **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_o . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley. (Figura 2.1-c).

$$\tau_{x,y} = \tau_o + K \cdot \left(\frac{o}{\gamma} \right)^n \quad (2.9)$$

Los parámetros k , n y τ_o , 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 2.9 se transforma en el modelo de Bingham, para $\tau_o = 0$, en el modelo de Ostwald de Waele, y para $\tau_o = 0$ y $n = 1$ se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan las ecuaciones 2.9 y 2.3, se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_o}{\gamma} + K \cdot \left(\frac{o}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.10)$$

2- De viscosidad dependiente del tiempo

✚ **Tixotrópicos:** La viscosidad de estos materiales disminuyen 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 establecer el modelo de la variación de la viscosidad con el tiempo, se ideó la siguiente ecuación:

$$\mu(t) = \mu_0 - \int_{-\infty}^t M_T(t-t') \frac{df(D^2)}{dt'} dt' \quad (2.11)$$

Donde

$$M_T(t-t') = \int_0^{\infty} \frac{R(II)}{II} \exp\left[-\frac{(t-t')}{II}\right] dII \quad (2.12)$$

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 (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:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \mu D \quad (2.13)$$

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; τ 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.

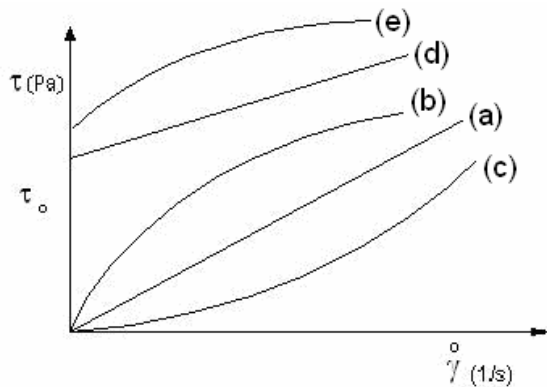


Figura 2.1. Curvas de flujo típica: (a) Newtonianos; (b)-Seudoplástico; (c)-Dilatantes; (d)-Plástico ideal (Bingham); (e)-Plástico real.

Fuente: Garcell, 2001.

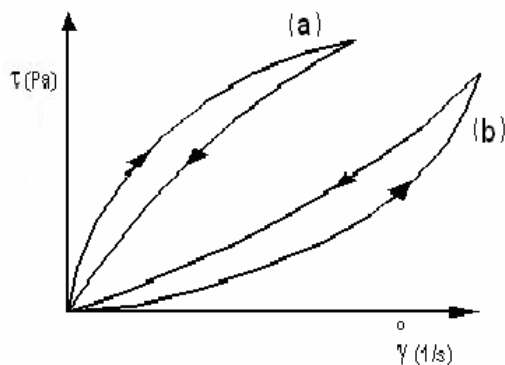


Figura 2.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)-Tixotrópico; (b)-Reopéctico.

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 - Procedimientos metodológicos sobre la determinación del gradiente de presión en conductos circulares

Para el diseño de sistemas de tuberías se requiere conocer la relación entre los gradientes de presión (dp/dx), requeridos para lograr flujos volumétricos, (Q), en un intervalo de diferentes diámetros, (D), del tubo, a distintas temperaturas de operación y diferentes propiedades físicas de los fluidos (Gardea, 2008).

Las expresiones que relacionan las variables señaladas en el régimen laminar, para los modelos reológicos más difundidos en la literatura, presentan ciertas limitaciones que se manifiestan en desviaciones de su precisión en los sistemas de flujo con diámetros relativamente grandes. De ahí, que, en los cálculos de ingeniería, se prefiera hacer uso de las expresiones que relacionan el factor de fricción de Fanning o el de Darcy con el número de Reynolds y con otros números adimensionales, tanto en régimen laminar como en turbulento, los cuales son correlacionados de forma experimental.

La obtención del modelo empírico-teórico para el transporte de petróleo en tuberías se elabora a partir del uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, de momentum y de energía. Para el análisis de las fuerzas que intervienen, se ha considerado una sección de tubería inclinada, con movimiento del fluido hacia arriba y un ángulo θ desde la horizontal como se muestra en la figura 2.3.

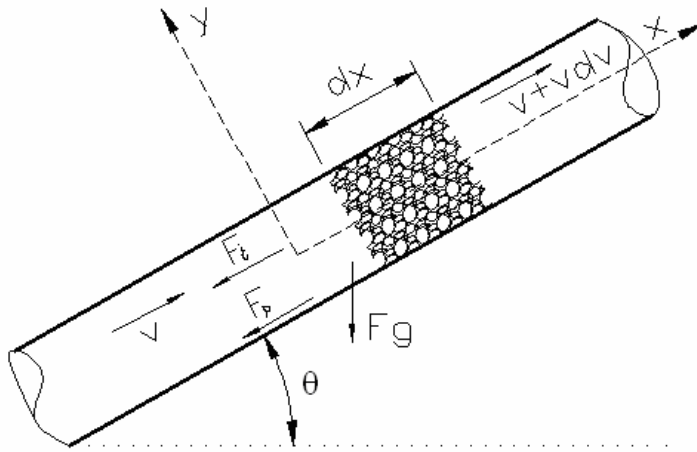


Figura 2.3. Sección de tubería inclinada, con movimiento del fluido.

El modelo homogéneo más conocido según Haoulo et al. (2005), es el denominado modelo de flujo homogéneo, para este caso se le ha adicionado al modelo el gradiente de presión causado por la turbulencia. Las ecuaciones básicas de conservación de masa y de momentum en régimen permanente del modelo homogéneo para flujo unidimensional isotérmico en tuberías son:

Continuidad:

$$\frac{d}{dx} \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad (2.14)$$

Momentum:

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dx} - \frac{P \cdot \tau_p}{A} - F_i - \rho \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.15)$$

Donde: v ; ρ - Son la velocidad promedio y la densidad del fluido, respectivamente.

A ; P ; θ - El área de la sección transversal, el perímetro y el ángulo de inclinación de la tubería, respectivamente. $\frac{dp}{dx}$ - Es el gradiente de presión en la dirección del flujo.

τ_p - Es el esfuerzo de corte en la pared de la tubería. g : Es la aceleración de gravedad. F_i : Es la fuerza de presión adicional en la tubería, causada por efector inerciales de la turbulencia (incremento del recorrido radial de las partículas en la

tubería), principalmente en la zona inicial de cada tramo recto y en tuberías de diámetros relativamente grande. Este fenómeno es descrito en varias literaturas (Haoulo, M. y García F., 2004) y (Nekrasov 1968), planteándose esta longitud $l = 66,5 \cdot d$.

Al desarrollar el lado izquierdo de la ecuación 2.15, las derivadas totales también llamadas derivadas materiales, son:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.16)$$

Al trabajar con un flujo estacionario la derivada parcial con respecto al tiempo desaparece, donde queda.

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.17)$$

Sustituyendo la ecuación 2.17 en 2.15 y presentándola como una ecuación explícita en términos del gradiente de presión, tenemos que:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{P \cdot \tau_p}{A} + F_i + \rho \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} + \rho \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.18)$$

En la ecuación 2.18, el gradiente de presión longitudinal total en la tubería se puede descomponer en cuatro componentes.

$$-\frac{dp}{dx} = \left(\frac{dp}{dx} \right)_v + \left(\frac{dp}{dx} \right)_i + \left(\frac{dp}{dx} \right)_M + \left(\frac{dp}{dx} \right)_G \quad (2.19)$$

Donde:

El primer componente es el gradiente de presión debido al esfuerzo de corte del fluido con la pared de la tubería, es costumbre asumir este a la pérdida de carga total de la tubería recta. Este gradiente de presión para un fluido no newtoniano en flujo permanente, con un diámetro constante, se obtiene partiendo de un análisis de

la distribución de esfuerzos cortantes en tubería, considerando el fluido como estacionario.

Consideremos en la figura 2.4, un flujo en una tubería cilíndrica de diámetro (D), a una temperatura constante y una longitud (X).

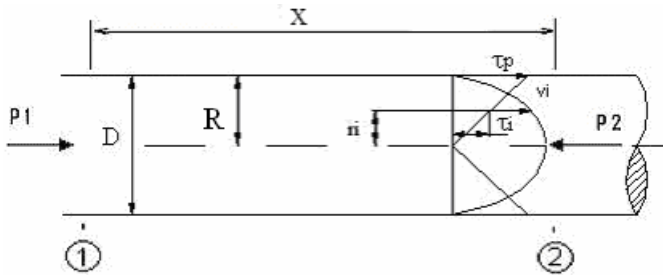


Figura 2.4. Sección de tubería que describe el Flujo de un fluido no newtoniano, independiente del tiempo, por una tubería de sección circular y diámetro igual a D.

Donde: τ_p - Esfuerzo de corte en la pared de la tubería. v_i - Velocidad en un punto genérico de radio r_i . τ_i - Tensión tangencial en un punto genérico de radio r_i . D - Diámetro de la tubería.

Según Méndez y Ojeda (2007), para obtener el gradiente de presión en la dirección x , se considera un flujo laminar totalmente desarrollado en un tubo de paredes rígidas. Utilizando las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas y considerando que no hay variaciones en la dirección θ , la ecuación de cantidad de movimiento con las simplificaciones anteriores se puede escribir como:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r \cdot \tau_p) \quad (2.20)$$

Para describir el comportamiento reológico del petróleo, se emplea la ley de potencia (ecuación 2.2), expresada en función del tensor de deformación (Laurencio, 2007). Del análisis de la figura 2.4, luego de analizar las fuerzas involucradas, considerando que la velocidad en la pared del tubo es cero y la condición de frontera de que en $R = r_i$; se puede conocer todo sobre el flujo, donde se llega a una expresión del caudal en función de los esfuerzos de corte.

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\tau_p^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2.21)$$

Integrando la ecuación (2.21), considerando un fluido pseudoplástico que cumple la ley de potencia, y v en la tubería es cero, se tiene.

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{n}{3 \cdot n + 1} \left[\frac{\tau_p}{k} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.22)$$

El esfuerzo de corte en la pared de un tubo, para todo fluido no newtoniano, independiente del tiempo y de acuerdo con los estudios de Rabinowisch-Mooney (Méndez y Ojeda, 2007), será.

$$\tau_p = \frac{D}{4} \cdot \left(\frac{dp}{dx} \right) \quad (2.23)$$

Sustituyendo la ecuación 2.23 en la ecuación 2.22 y trabajándola en función del diámetro de la tubería, se llega a la ecuación para el gradiente de presión de fluidos que cumple la ley de potencia.

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_v = 2K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot Q^n \quad (2.24)$$

Expresada en función de la velocidad del fluido en la tubería queda.

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_v = 2K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot v^n \quad (2.25)$$

Este modelo es utilizado por diversos autores, Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001), para la estimación de pérdidas de cargas en tuberías rectas cuando se transporta fluidos pseudoplásticos y dilatantes. En estos trabajos no se especifica el régimen de flujo en que es válido este modelo y se ha notado errores significativos de sus resultados al utilizarlo en tuberías de diámetro relativamente grande (Laurencio, 2007).

El segundo componente es el gradiente de presión por efectos inerciales, puede estimarse mediante la ecuación de Weisbach – Darcy; para el flujo por tuberías rectas circulares.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_M = \lambda_i \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2.26)$$

Donde: λ_i Coeficiente de fricción por rozamiento adicional del fluido (adimensional), en este caso representará los efectos adicionales que se manifiestan en tuberías de gran diámetro (efecto de las fuerzas de inercias que no son contemplados por la ecuación 2.25) y se determina por experimentación, correlacionándolo con el número de Reynolds generalizado (ecuación 1.8) con el factor de fricción del gradiente de presión adicional. Este coeficiente puede ser correlacionado de forma directa mediante la ecuación 2.26, pero no tendría explícita los efectos antes mencionados, no obstante en el trabajo se obtendrá el gradiente de presión por las dos vías.

$$\lambda_i = \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \quad (2.27)$$

Los términos a y b , son coeficientes que dependen del régimen del fluido y de las características propias de este; se determina de forma experimental para cada fluido (Garcell, 2001).

Para nuestro caso de los fluidos no newtonianos no existen suficientes evidencias del efecto de la rugosidad de la pared del tubo sobre el coeficiente de fricción, dado que la subcapa laminar es mas gruesa en los fluidos no newtonianos que en los newtonianos (Darby, 2001). Realizando la sustitución de la ecuación 2.27 en la 2.26 queda que.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_I = \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2.28)$$

El tercer componente es el gradiente de presión debido a los cambios de energía cinética o de aceleración y a los cambios de densidad debido a variaciones de

temperaturas en el fluido $(dp/dx)_M$. Expresado en términos de la tasa de flujo másico total $\dot{m}_M = A \cdot \rho \cdot v$, queda:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_M = \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (2.29)$$

La ecuación 2.29, varía en función de la definición de densidad de la mezcla utilizada y se debe tener en cuenta para flujo no estacionario, en el caso que las variaciones de temperatura ocasionen variaciones significativas en la densidad, para variaciones pequeñas de densidad el término puede ser despreciable.

El cuarto componente $(dp/dx)_G$, es debido a los cambios de energía potencial como consecuencia de los cambios de pendiente en la tubería. En el caso de tubería horizontal el gradiente de presión debido a los cambios de energía potencial es cero, y por esta razón no se considera en este, flujos con una alta fracción volumétrica de líquido, este puede ser el término predominante.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_G = \rho \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.30)$$

Del análisis realizado y sustituyendo las ecuaciones 2.25, 2.28, 2.29 y 2.30 en la ecuación 2.19; se obtiene la expresión del gradiente de presión para el transporte del petróleo pesado por tuberías en tramos rectos. El modelo cumple con el comportamiento de un fluido pseudoplástico, lo que queda explícito como.

$$-\frac{dp}{dx} = \left[2 \cdot K \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot v^n + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{\rho}{D} \cdot \frac{v^2}{2} + \left(\frac{\dot{m}}{A} \right) \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{1}{\rho} \right) + \rho \cdot g \cdot \sin \theta \right] \quad (2.31)$$

En una tubería horizontal recta, el $\sin\theta = 0$ y el gradiente de presión debido a los cambios de energía cinética en el fluido es nulo; por lo que la ecuación 2.31 queda como.

$$-\frac{dp}{dx} = 2 \cdot K \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot v^n + \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \cdot \frac{\rho}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.32)$$

En función del flujo volumétrico se expresa por.

$$-\frac{dp}{dx} = 2 \cdot K \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^n + \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot Q^2 \quad (2.33)$$

Los modelos obtenidos (ecuación 2.32 y 2.33) una vez identificados tienen gran aplicación práctica, para la obtención de los gradientes de presión en tuberías que transportan fluidos con comportamiento pseudoplástico. Los mismos minimizan los errores de escalado y de régimen de flujo.

2.3.1 - Modelo matemático de la potencia necesaria en el transporte de fluidos pseudoplásticos por tuberías

La potencia consumida por el equipo de bombeo en kW, se determina según la conocida ecuación (Díaz, 1990).

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{1000\eta} \quad (2.34)$$

Para cualquier fluido, la potencia hidráulica específica (W/m), para su transporte por una tubería será.

$$\frac{N_h}{L} = Q \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (2.35)$$

Tomando al caudal Q en (m^3/s), longitud de la tubería L (m) y la caída de presión ΔP en (Pa).

La potencia hidráulica para el transporte de un fluido pseudoplástico (para transportar el petróleo), estaría dada por la combinación de la ecuación 2.33 y la 2.35, donde.

$$\frac{N_h}{L} = 2 \cdot K \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^{n+1} + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot Q^3 \quad (2.36)$$

En caso de que la tubería tenga diferencia de nivel entre el punto de carga y de descarga, hay que tener en cuenta la potencia estática; debido al efecto de la diferencia de altura, en este caso será el tercer término de la ecuación siguiente.

$$\frac{N_h}{L} = 2 \cdot K \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^{n+1} + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot Q^3 + \Delta Z \cdot \rho \cdot g \cdot Q \quad (2.37)$$

Con esta ecuación, se determina la potencia que se necesita para transportar un fluido pseudoplástico, como: el petróleo cubano, emulsiones de petróleo y otros una vez identificado el modelo.

2.4 - Expresión para el análisis de costo de transporte

Para un sistema de transporte, debe tomarse en cuenta principalmente: la tubería, para cuya selección es importante considerar la temperatura y presión de operación y el costo del material; el sistema de impulsión, que está en relación directa con la altura que se tenga que elevar el fluido, la presión requerida en la entrega, longitud y diámetro del tubo, con la velocidad del flujo, y con propiedades físicas y reológicas del fluido.

$$C_{bom} = \frac{C_e \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot \frac{N_h}{L} \cdot 10^{-3} \quad (2.38)$$

Donde: C_e : tarifa de corriente eléctrica, CUC / Kw*h. N_h : potencia hidráulica para transportar el fluido, W. t_t : tiempo de trabajo de la instalación o equipo en, horas/año, η_m : Rendimiento del motor eléctrico. η_b : Rendimiento de la bomba.

2.4.1 - Costo por calentamiento de combustible

El calentamiento del petróleo es uno de los pilares más importantes en el proceso de cualquier industria ya que este facilita la pulverización del combustible en los quemadores de las calderas, provocando una mejor combustión del combustible, de esta forma está estimulando un mejoramiento en cuanto a consumo de combustible.

Para determinar el costo por calentamiento del combustible total en función de la

temperatura óptima se utiliza la siguiente expresión.

$$C_t = C_v \cdot Q_v \cdot tt \cdot 3600 \quad (2.39)$$

Donde C_t costo por calentamiento del combustible, C_v costo por generación de vapor Q_v : flujo másico de vapor, tt tiempo de trabajo

Para determinar el flujo másico del vapor se utiliza la expresión 2.40

$$Q_v = A(\Delta t) \quad (2.40)$$

Para la determinación del costo por generación de vapor se utilizó la expresión 2.41

$$\frac{Q_{vapor}}{Q_{comb}} = \frac{C_{vapor}}{C_{comb}} (CUC / kg) \quad (2.41)$$

Despejando de la ecuación 2.41 obtenemos la expresión 2.42.

$$C_v = C_{comb} \frac{Q_{comb}}{Q_{vapor}} \quad (2.42)$$

Donde C_v costo por generación de vapor , C_{comb} costo del combustible, Q_{vapor} flujo de vapor, Q_{comb} flujo de combustible

2.5 - Gradiente de temperatura en la tubería de transporte

Para la determinación del gradiente de temperatura es necesaria una temperatura definida en la superficie externa puesto que sin esta suposición, el flujo y el gradiente de temperatura serian desconocidos. En realidad las temperaturas asignadas a la pared exterior depende no solamente de las resistencias entre las superficies calientes y frías, sino también a la habilidad de la atmósfera más fría que lo rodea para remover el calor que llega a la superficie externa. El flujo de calor de una turbina al aire ambiente usualmente es una pérdida y por tanto es deseable reportarla. En otras palabras las máximas pérdidas de calor en una tubería tiene lugar cuando el radio crítico es igual a la razón de la conductividad térmica del aislante al coeficiente de superficie de transferencia de calor por lo que es deseable mantener el radio crítico tan pequeño como sea posible de manera que el aislante proporcione una reducción y no un aumento en las pérdidas de calor por una

tubería. Esto, obviamente se puede lograr usando un material aislante de una baja conductividad térmica de manera que el radio crítico sea menor que el radio de la tubería (Donald F. Othmer)

Modelación de las pérdidas de calor por unidad de longitud

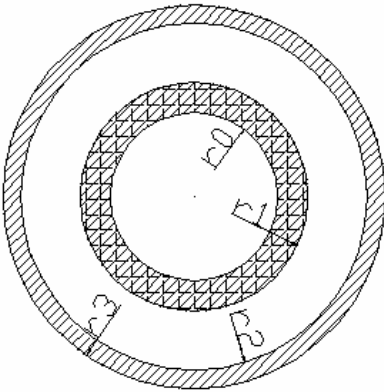


Figura 2.5 Radios de la tubería.

Del balance de energía para el cilindro (figura 2.5) la ecuación de conducción para las tres resistencias son:

$$-K_A \cdot r \frac{dt^A}{dr} = r_o q_o \quad -K_B \cdot r \frac{dt^B}{dr} = r_o q_o \quad -K_C \cdot r \frac{dt^C}{dr} = r_o q_o \quad (2.43)$$

Integrando las ecuaciones y tomando como constante a K_A , K_B y K_C nos queda que:

$$t_o - t_1 = r_o q_o \left(\frac{\ln \frac{r_1}{r_o}}{K_A} \right) \quad t_1 - t_2 = r_o q_o \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{K_B} \right) \quad t_2 - t_3 = r_o q_o \left(\frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{K_C} \right) \quad (2.44)$$

Flujo de calor del interior al exterior del conducto.

$$q_s = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_o}{k_A} \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_o} \right) + \frac{r_o}{k_B} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{r_o}{k_C} \cdot \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) + \frac{r_o}{r_3} \cdot h_e} \quad (2.45)$$

Donde h_i coeficiente de convección del petróleo, h_e conductividad térmica del aire, t_i Temperatura inicial, t_e temperatura del aire, r_o radio interior de la tubería, r_1 radio

exterior de la tubería, r_2 radio exterior del aislante, r_3 radio exterior del insulado, k_A coeficiente de transferencia de calor de la tubería (acero al carbono), k_B coeficiente de transferencia de calor del aislante (lana de vidrio), k_C coeficiente de transferencia de calor del insulado (zinc)

2.5.1 - Determinación del Nusselt

Cuanto mayor es el número de Nusselt más eficaz es la convección, un número de Nusselt de $NU_p = 1$, para una capa de fluido, representa transferencia de calor a través de ésta por conducción pura. El número de Nusselt se emplea tanto en convección forzada como natural en este caso determinaremos por la expresión 2.46.

$$NU_p = 0.023 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{0.3} \quad (2.46)$$

$$h_e = NU_p \cdot \frac{k}{D} \quad (2.47)$$

Donde P_r número de Prandt, R_e número de Reynold, h_e conductividad térmica del aire D diámetro interior del conducto, k coeficiente global de transferencia de calor.

2.5.2 - Temperatura final en el conducto.

Para determinar la temperatura final del conducto se utiliza la expresión 2.48.

$$t_f - t_i = \frac{q_s \cdot \pi \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (2.48)$$

Donde t_f temperatura final, t_i temperatura inicial q_s pérdida de calor L longitud del conducto, $\dot{m}$ flujo másico.

El flujo másico se expresa en función del caudal y la densidad según la expresión (2.49)

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (2.49)$$

El flujo de calor del interior al exterior se expresa mediante la ecuación 2.45, la relación de temperatura inicial y final se determina por la ecuación 2.48 donde sustituyendo la ecuación 2.45 en la 2.48 nos queda el gradiente de temperatura por unidad de longitud quedando de la siguiente forma:

$$\frac{t_f - t_i}{L} = \frac{\pi}{m \cdot c_p} \cdot \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_0}{k_A} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{r_0}{k_B} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_0}{k_C} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_0}{r_3} \cdot h_e} \quad (2.50)$$

2.6-Materiales y técnicas utilizadas

1. Obtención de los parámetros reológicos.

El estudio reológico del petróleo pesado CM-650, fue obtenido en la investigación realizada en la Universidad de Oriente. Se determinó el esfuerzo de corte (τ) en función gradiente de velocidad (γ), haciendo uso del viscosímetro rotacional HAAKE VT550, (Figura 2.6). El gradiente de velocidad se experimento desde 4,5 a 268 1/s, para los niveles de temperatura de 29; 38,6; 50,2; 57,4 y 69.8 °C, en correspondencia con las condiciones más frecuentes de su transporte por tuberías.



Figura 2.6. Viscosímetro rotacional HAAKE VT550.

El sensor utilizado es el MV2 y cuenta con un procedimiento interno que contempla los factores de corrección necesarios para determinar los valores de esfuerzo de corte y de gradiente de velocidad. Para garantizar una correcta lectura de los valores de viscosidad fue necesario comprobar la calibración del equipo, para ello se utilizó un aceite de refrigeración A-100 de viscosidad conocida y los resultados obtenidos

fueron satisfactorios, no siendo necesaria la variación de las constantes brindadas por el fabricante para el sensor MV2.

El control de temperatura se obtuvo utilizando un termostato de más-menos 0,5 °C de precisión.

La muestra de petróleo se introduce en el interior de la copa, que ha de estar perfectamente limpia y la muestra introducida debe ser representativa de lo que se quiere analizar, teniendo un volumen suficiente para cubrir totalmente el sensor, el cual no excede los 80 mL. Finalmente se programa el modo de funcionamiento deseado.

Con la experimentación se plantearon las curvas de flujo de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad, para diferentes valores de temperaturas.

2.6.1-Diseño de experimentos y procesamiento estadístico

Las situaciones en las que se puede aplicar el DEE son muy numerosas, en las cuales se observan una o más variables experimentales dependientes o respuestas (y) cuyo valor depende de los valores de una o más variables independientes (x) controlables llamadas factores.

El número de experimento cuando intervienen k factores, se pueden utilizar los diseños factoriales completos a tres niveles; que se determina con un arreglo de la función exponencial:

$$N = 3^K \quad (2.51)$$

Donde N número de experimentos, K Número de factores.

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que K=2 luego, el número de experimento sería: $N=3^2=9$ experimentos.

2.6.2- Procesamiento estadístico de los 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:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.52)$$

Donde, x_i elementos de la serie, n número de pruebas.

Desviación media:

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (2.53)$$

La varianza muestral:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (2.54)$$

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 .

$$t = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S_x} \quad (2.55)$$

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:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100 \quad (2.56)$$

El error relativo promedio se expresa por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot \frac{100}{n} \quad (2.57)$$

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 las operaciones de sistemas de flujo en los procedimientos metodológicos tradicionales así como los materiales y métodos que se emplean en la investigación y obtención de los parámetros energéticos del sistema.

Estas ecuaciones conforman el modelo matemático de la operación de transporte de petróleo pesado, las cuales tienen en consideración los siguientes aspectos.

- ✚ Los parámetros de rendimiento de la bomba.
- ✚ Variación de la velocidad de transportación.
- ✚ Variación del diámetro de la tubería.
- ✚ Cambio de las propiedades reológicas del fluido, tanto newtoniano como no newtoniano.

Se obtuvo un modelo matemático para la simulación de la potencia necesaria del fluido. Este modelo es válido para el cálculo de operación y la simulación operacional de sistemas de tuberías cuando se conocen las propiedades reológicas y de transporte del fluido empleado en las industrias de procesos.

CONCLUSIONES GENERALES

- De acuerdo a los reogramos experimentales analizados, el petróleo pesado estudiado presenta un comportamiento pseudoplástico. Al incrementar la temperatura, la viscosidad aparente para el caso de las cinco temperaturas experimentadas (29, 38,6, 50,2, 57,4 y 69,8 °C) disminuye con el aumento del gradiente de velocidad.
- En los datos relacionados se puede notar que el índice de consistencia másica disminuye con el incremento de la temperatura, mientras que los valores de índice de flujo muestran una variación poco significativa para los valores promedio de 0,917 y 0,92.
- A partir del trabajo, se plantearon los modelos para la obtención de la temperatura racional de transporte del crudo cubano CM 650; donde se utilizaron tres diámetros de 0,426, 0,324, 0,219 m cada uno con una longitud de 106, 73, 7,45, 4,40 m respectivamente obteniendo a partir de esto el costo de transporte que demanda cada diámetro de tubería.
- Para el caso en estudio, se encuentra que el diámetro de 0,324 m es el que demanda menos calentamiento con un costo de 299000 CUC en un año. Por otra parte el mayor diámetro (0,426 m) que cuenta con una longitud de 106,73 m consume alrededor de 549000 CUC al año, con una diferencia de 250000 CUC respecto al diámetro 0,324 teniendo en cuenta la significativa diferencia en cuanto a la longitud (99,28 m).

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO EN EL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO.

3.1- Introducción

En los estudios precedentes, se ha comprobado que uno de los mayores errores que se cometen, es tratar como newtonianos a fluidos pseudo-plásticos, de aquí la importancia del análisis de estudios experimentales del comportamiento de sus propiedades de transporte, que permitan una mejor selección de los métodos de cálculo apropiados al modelo de fluido estudiado. El método de correlación, aplicado en parte de los resultados, tiene una aplicabilidad universal para conjuntos de datos de toda clase de procesos físicos. Las correlaciones empíricas tienen implícito el comportamiento físico del fenómeno en estudio. Este es un método válido indiferentemente de la complejidad del problema en estudio. Sin embargo, su precisión es adecuada si se utilizan dentro del intervalo de aplicación en el cual fueron desarrolladas.

Como objetivos del capítulo se propone: analizar la influencia de los factores influyentes en el comportamiento de las emulsiones del crudo cubano, comprobando el grado de validación de los modelo propuesto en el capítulo II.

3.2- Características reológicas

A partir del los resultados de las propiedades reológicas de la emulsión, se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante (τ) en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), a diferentes temperaturas.

Con los resultados mostrados en la tabla 3.1 se construyen las curvas de flujo ajustando los datos experimentales. Mediante el modelo se establecieron los distintos valores de las pendientes de los gráficos obtenidos; índice de consistencia e índice de flujo para cada temperatura experimentada.

3.2.1- Resultados experimentales de las propiedades reológicas

Las curvas características del esfuerzo de corte contra el gradiente de velocidad para el crudo cubano CM 650 se observan en la Figura. 3.1; obtenidas a partir de la lectura del reómetro para cada temperatura; determinándose la forma típica del comportamiento reológico reflejados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos del estudio reológico al CM-650.

Nº	Gradiente de velocidad, $\dot{\gamma}$ (1/s)	Esfuerzo de corte, τ (Pa) Para diferentes valores de temperatura				
		29°C	38,6°C	50,2°C	57,4°C	69,8°C
1	4,5	51,82	29,04	13,13	8,12	5,12
2	7,5	88,98	41,91	19,82	15,54	9,73
3	13	143	71,85	28,71	23,36	16,63
4	21	209,1	115,11	55,87	37,43	25,52
5	41	423,9	213,4	99,95	69,26	46,35
6	58	547,6	294,54	118,6	96,01	64,24
7	97	-	483,1	220,6	153,8	112,24
8	162	-	-	354,6	235,9	154,71
9	268	-	-	546,3	393,5	244,45

La figura 3.1 representa la dependencia entre; el gradiente de velocidad y el esfuerzo de corte, para cada valor de temperatura.

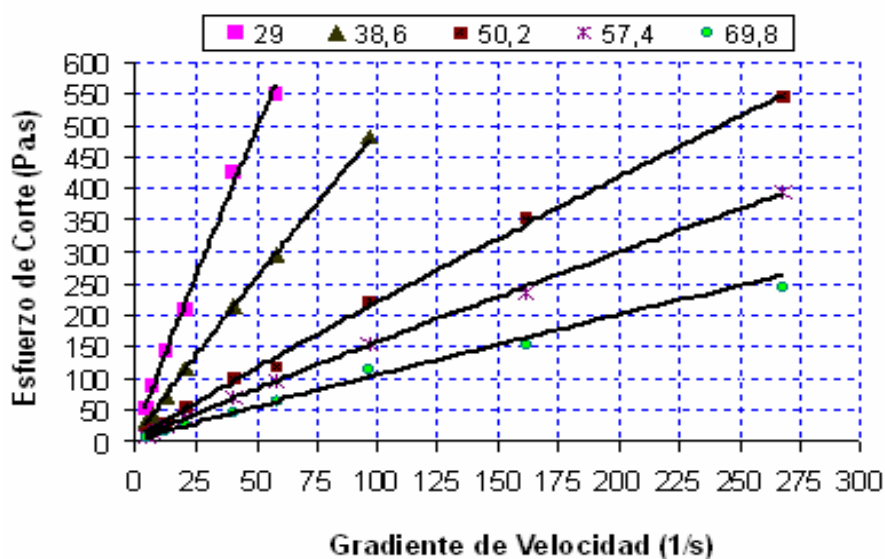


Figura 3.1: Dependencia entre el gradiente de velocidad y esfuerzo de corte.

Se observa en la figura 3.1, que el crudo cubano CM 650, posee comportamiento pseudoplástico; sus datos han sido ajustados al modelo de Oswald de Waele, como se refleja en la tabla 3.1. Este comportamiento está caracterizado por los parámetros reológicos: índice de consistencia (K) e índice de la ley de potencia (n).

Tabla 3.2: Correlaciones de esfuerzo de corte vs. gradiente de velocidad

Temperatura	Esfuerzo de corte vs. Gradiente de velocidad
29 °C	$\tau_{x,y} = 1355 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0,917}$
38,6 °C	$\tau_{x,y} = 6,89 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0,926}$
50,2 °C	$\tau_{x,y} = 3,097 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0,926}$
57,4 °C	$\tau_{x,y} = 2,22 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0,925}$
69,8 °C	$\tau_{x,y} = 1,459 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{0,929}$

3.2.2- Estimación de los parámetros reológicos

Al representar gráficamente los datos experimentales de τ vs. $\dot{\gamma}$ se obtuvieron pseudocurvas de flujo (Figura 3.1), que por su forma corresponden al modelo reológico de Oswald de Weale, esto permitirá realizar el ajuste de los datos mostrados en la Tabla 3.1.

En la tabla 3.3, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico.

Tabla 3.3. Parámetros reológicos obtenidos y desviación media cuadrática.

No	Parámetros	Temperatura				
		29 °C	38,6 °C	50,2 °C	57,4 °C	69,8 °C
1	K (pa.s)	13,55	6,89	3,097	2,22	1,459
2	n (adim)	0,917	0,926	0,926	0,925	0,929
3	R ²	0,997	0,999	0,997	0,998	0,997

El estadístico R² indica que el modelo se ajusta con un 99,7 % como mínimo, de la variabilidad del esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes.

En los datos relacionados, se puede notar que al aumentar la temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, mientras que el índice de flujo, muestra variaciones poco significativas para el valor promedio de 0.92.

3.2.3- Comportamiento pseudoplástico de la viscosidad aparente

Empleando los resultados mostrados en la tabla 3.3 y sustituyendo en la ecuación 2.4, se grafica la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad, lo que permite obtener la figura 3.2.

Tabla 3.4. Dependencia entre la viscosidad aparente y el gradiente de velocidad.

Nº	Gradiente de velocidad, $\dot{\gamma}$ (1/s)	Viscosidad aparente, μ_a (Pa·s) Para diferentes valores de temperatura				
		29°C	38,6°C	50,2°C	57,4°C	69,8°C
1	4,5	11,97	6,17	2,77	1,99	1,31
2	7,5	11,47	5,94	2,67	1,91	1,26
3	13	11,00	5,72	2,57	1,84	1,22
4	21	10,54	5,50	2,47	1,77	1,18
5	41	9,97	5,24	2,35	1,68	1,12
6	58	9,69	5,10	2,29	1,64	1,09
7	97	9,28	4,91	2,21	1,58	1,05
8	162	8,90	4,73	2,12	1,52	1,02
9	268	8,54	4,56	2,05	1,46	0,98

Los valores de la tabla 3.4 reflejan que la viscosidad aparente para la emulsión de petróleo crudo cubano, no es constante; aspecto muy importante al trabajar con este tipo de fluido.

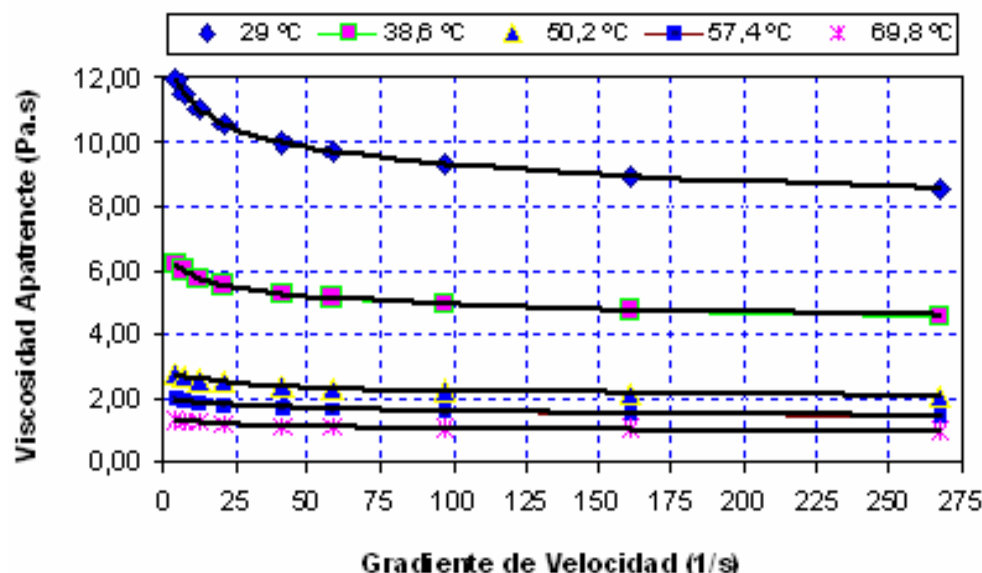


Figura 3.2: Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

En la figura 3.2, se observa, que los valores de viscosidad aparente disminuyen con el aumento de la temperatura. Basado en este análisis, se obtienen la dependencia de la viscosidad aparente en función de la temperatura.

3.2.4- Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas

Los valores del índice de consistencia, K , disminuyen con el aumento de la temperatura. La tabla 3.3 muestra que, los valores de n , varían poco con dicho incremento.

Este resultado permite establecer el comportamiento del Índice de consistencia a partir de las variaciones de las temperaturas y establecer su variación para plantear la curva que se observa en la figura 3.3.

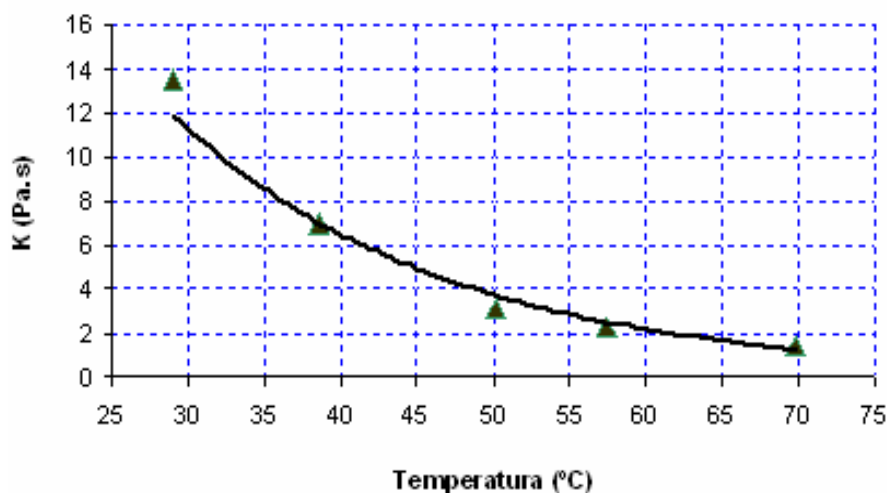


Figura 3.3. Comportamiento del índice de consistencia en función de la temperatura.

Con el empleo de los coeficientes relacionados en la ecuación 1.1, y determinado los valores, se obtiene la ecuación 3.1, que rige el comportamiento del índice de consistencia en función de la temperatura.

$$K = 59,86 \cdot e^{-0,056t} \quad (3.1)$$

Con la figura 3.3 y los resultados de la ecuación 3.1 se obtienen los valores de tendencia de los puntos observados, estos tienen una relación exponencial con una probabilidad de 0,96; lo que indica el grado de exactitud, lo expuesto por otros investigadores (Garcell, 1993; Caldiño et al., 2004).

Tabla 3.5. Dependencia entre índice de consistencia másica experimental y del modelo.

°N	t (°C)	K (Pa.s)	Kmodelo (Pa.s)	Promedio	Varianza	Error
1	29	13,548	11,9374	12,74269	1,297	0,1349
2	38,6	6,8944	7,00004	6,947218	0,0056	0,0151
3	50,2	3,0972	3,6728	3,385002	0,1657	0,1567
4	57,4	2,2216	2,46117	2,341383	0,0287	0,0973
5	69,8	1,4585	1,23515	1,346827	0,0249	0,1808

En la tabla 3.5 se tiene en cuenta la dependencia entre el índice de consistencia másica experimental y del modelo donde presenta un error promedio de 0,11696 el cual se le atribuye al control irregular de la temperatura

3.3- Gradiente de temperatura en la tubería de transporte

Para la determinación de las pérdidas de calor (q_s) se tuvieron en cuenta la temperatura inicial (t_i) en un rango de 54 a 70 °C y la temperatura exterior (t_e) a 29 °C así como los radios de la tubería (r_0, r_1, r_2, r_3), tabla 3.4, también se tuvo presente el coeficiente de conducción térmico del aire (h_e) igual a 16,943 W/m.k según la expresión 2.47, teniendo presente el NU_p el cual se determinó por la expresión 2.46, también se relacionaron los coeficientes de transferencia de calor de la tubería (k_A, k_B, k_C), (ver anexos tabla 1.1, 1.2, 1.3) donde se obtuvo como resultado según la ecuación 2.45 la relación de pérdidas de calor según los diámetros de la tubería que se recogen, en la tabla 3.7.

Tabla 3.6. Relación de radio de la tubería de conducción del crudo cubano CM 650.

r	D ₁ (m) 0.219 x 0.0063	D ₂ (m) 0.324 x 0.008	D ₃ (m) 0.426 x 0.006	D ₄ (m) 0.219 x 0.0063	D ₅ (m) 0.159 x 0.0045	D ₆ (m) 0.426 x 0.008
r ₀	0,1095	0,162	0,213	0,1095	0,079	0,213
r ₁	0,1158	0,170	0,219	0,1158	0,084	0,219
r ₂	0,1658	0,670	0,719	0,1658	0,584	0,719
r ₃	0,1688	0,673	0,722	0,1688	0,587	0,722

Tabla 3.7. Relación de pérdidas de calor según los diámetros de la tubería.

D(m)	D ₁ (m) 0,219	D ₂ (m) 0,324	D ₃ (m) 0,426	D ₄ (m) 0,219	D ₅ (m) 0,159	D ₆ (m) 0,426
q _s (kJ)	2,11	3,2	2,71	2,72	4,894	2,71
Δt/L (°C/m)	0,132	0,197	0,169	0,17	0,306	0,169

Tabla 3.8. Relación de temperaturas desde la salida del calentador # 1 hasta la entrada de la bomba # 3.

Mediciones de temperatura para un flujo de 0,05m ³ /s	
Salida del Calentador	Succión de la bomba
0PD13T201	2PD33T201
60	59,5
60	59,5
54,5	54
54,5	54
59,5	54
65	59,5
65	59,5
Promedio	
62,5	54
Δt (°C)	
8,5	

Para obtener el gradiente de temperatura fue necesario realizar un muestreo según la tabla 3.8 donde fue preciso sacar el promedio para ajustarse a una mejor tendencia obteniendo así la diferencia de temperatura la cual se utilizó para la determinación de la tabla 3.9

Tabla 3.9. Determinación del gradiente de temperatura.

Para un flujo de 0,05 m ³ /s				
Diámetros (m)	Long (m)	Δt (teo.)	Δt (exp.)	Error
0,426	106,73	5,313	-	-
0,324	7,45	0,354	-	-
0,219	4,4	2,259	-	-
Promedio		7,926	8,5	0,0724199

La tabla 3.9 muestra el gradiente de temperatura con un error de 0,072 para diferentes diámetros y longitudes lo que demuestra una buena relación.

3.4- Obtención de los parámetros racionales de transporte y valoración económica

De los resultados experimentales se obtiene la expresión que relaciona el flujo de vapor en el intercambiador con las temperaturas de entrada y salida del combustible la que se expresa como (Avila 2010).

$$Q_v = 0,0326(t_s - t_e) \quad (3.1)$$

El modelo se obtiene con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9692$ lo que explica una buena relación con los datos experimentales, ya que a medida que aumenta el flujo es necesario un mayor calentamiento del vapor lo que provoca calentamiento del combustible mejorando sus propiedades.

Para el costo de transporte se utiliza la expresión 2.38 la cual se combina con la ecuación 2.36 y se obtiene la expresión 3.2 en la que se relacionan los parámetros reológicos.

$$C_{bombeo} = \frac{C_{elec} \cdot tt \cdot L_{tub}}{\eta_{bomba} \cdot \eta_{motor}} \left[2 \cdot 59,86 e^{-0,05\alpha} \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^{n+1} + \frac{a}{(R_{et})^b} \cdot \frac{8\rho}{\pi \cdot D^5} \cdot Q^3 \right] \quad (3.2)$$

Tabla 3.10. Relación de parámetros para la determinación del costo de bombeo.

η_{bomba}	Rendimiento de la bomba	0,548
η_{motor}	Rendimiento del motor	0,92
Ce (kW/h)	Costo eléctrico	0,09
Cp (cuc/kg)	Costo petróleo	0,205
Cv (cuc/kg)	Costo del vapor	0,017
Qp m/s	Flujo de petróleo	0,016
tt (horas /año)	Tiempo de trabajo	7042,3

En la tabla 3.10 se recogen los parámetros de trabajo de la instalación de primer y segundo impulso de la termoeléctrica de felton los cuales se ajustan a la ecuación 3.2 obteniendo el costo de bombeo en CUC/año

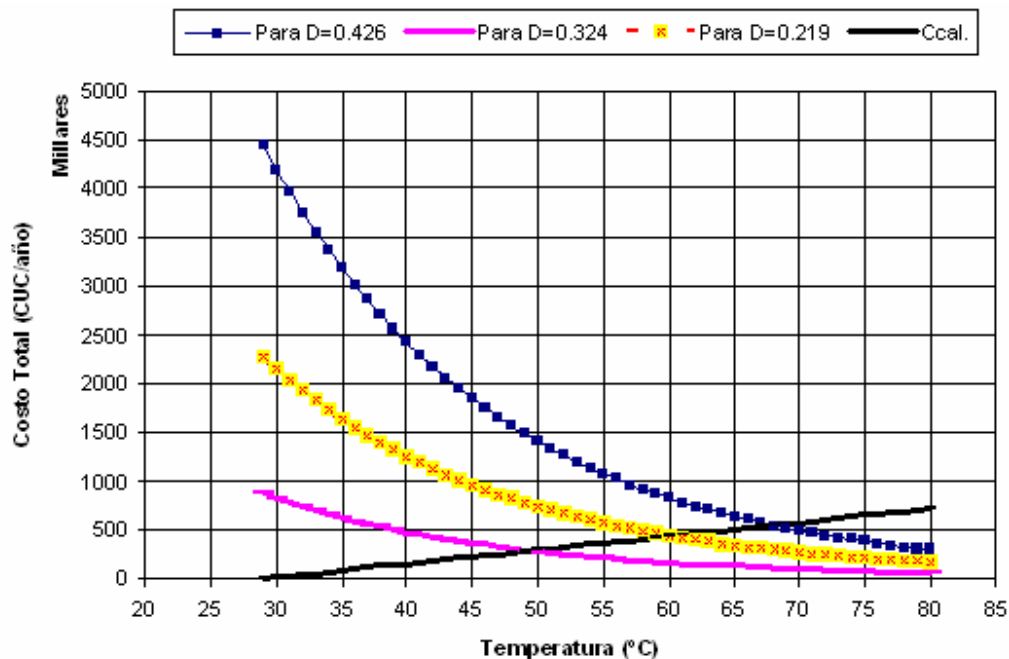


Figura 3.4. Relación del costo total en función de la temperatura racional respecto a los diferentes diámetros.

Según la figura 3.4 se pueden obtener los valores de temperatura racional para el transporte de petróleo pesado por tubería, teniendo en cuenta la variación de diámetros.

Tabla 3.11. Relación de temperatura racional en función de los diferentes diámetros.

Temp. Racional (°C)	Diámetro (m)	Long. (m)	C.total (CUC/año)
68	0,426	106,73	549000
49	0,324	7,45	299000
60	0,219	4,4	338000
Promedio	59		

Se puede observar que para lograr un mayor ahorro en cuanto al calentamiento de combustible teniendo en cuenta los diámetros con que se trabajan, el más factible es el diámetro de 0,324 m, el cual demanda una temperatura racional de calentamiento alrededor de 49 °C, provocando un costo total al año de 299000 CUC comparándolo con el mayor diámetro de tubería que es de 0,426 m, el cual demanda una temperatura de calentamiento de 68 °C, provocando un costo total alrededor de 549000 CUC/año sin dejar de mencionar la diferencia de longitudes que hay entre

los dos diámetros que es de 99.28 m

Teniendo la temperatura promedio de 59 °C con la que se recomienda transportar el combustible, es necesario recoger lo que se ahorra la industria si se pusiera en práctica este modelo, teniendo en cuenta que el diámetro mayor es de 0,426 m demanda una temperatura de 68 °C provoca un costo anual de 549000 CUC aproximadamente, sin embargo transportando el crudo pesado a una temperatura promedio de 59 °C con el diámetro recomendado de 0,324 infringe en un costo anual aproximadamente de 299000 CUC dejando evidente que la empresa se ahorraría un monto de 250000 CUC al año.

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, existe la posibilidad de irritación en ojos y piel y además se puede producir una dermatitis después de un contacto directo y prolongado con la piel. 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

-  De acuerdo a los reogramas experimentales analizados, el petróleo pesado estudiado presenta un comportamiento pseudoplástico. Al incrementar la temperatura, la viscosidad aparente para el caso de las cinco temperaturas experimentadas (29, 38,6, 50,2, 57,4 y 69,8 °C) disminuye con el aumento del gradiente de velocidad.
-  Los valores del índice de flujo calculados, indican que su valor se ubica entre 0.917 y 0.926, notándose la poca influencia que ejercen las variaciones de las temperaturas tratadas en el comportamiento del índice de flujo.
-  Para el caso de la instalación de felton, se obtuvieron las temperaturas racionales de transporte del petróleo pesado. Las mismas se definen a partir de los diámetros y la longitud de cada tramo de tubería.

CONCLUSIONES GENERALES

- De acuerdo a los reogramos experimentales analizados, el petróleo pesado estudiado presenta un comportamiento pseudoplástico. Al incrementar la temperatura, la viscosidad aparente para el caso de las cinco temperaturas experimentadas (29, 38,6, 50,2, 57,4 y 69,8 °C) disminuye con el aumento del gradiente de velocidad.
- En los datos relacionados se puede notar que el índice de consistencia másica disminuye con el incremento de la temperatura, mientras que los valores de índice de flujo muestran una variación poco significativa para los valores promedio de 0,917 y 0,92.
- A partir del trabajo, se plantearon los modelos para la obtención de la temperatura racional de transporte del crudo cubano CM 650; donde se utilizaron tres diámetros de 0,426, 0,324, 0,219 m cada uno con una longitud de 106, 73, 7,45, 4,40 m respectivamente obteniendo a partir de esto el costo de transporte que demanda cada diámetro de tubería.
- Para el caso en estudio, se encuentra que el diámetro de 0,324 m es el que demanda menos calentamiento con un costo de 299000 CUC en un año. Por otra parte el mayor diámetro (0,426 m) que cuenta con una longitud de 106,73 m consume alrededor de 549000 CUC al año, con una diferencia de 250000 CUC respecto al diámetro 0,324 teniendo en cuenta la significativa diferencia en cuanto a la longitud (99,28 m).

RECOMENDACIONES

-  Se recomienda en cuanto la temperatura de bombeo del crudo, mantener en un rango cercano a los 68 °C, teniendo en cuenta que el mayor diámetro con que se cuenta en este estudio es de 0,426 con una longitud de 106,73.
-  Considerar en futuras investigaciones, la obtención de los parámetros del modelo del gradiente de presión para diferentes diámetros de tuberías con el fin de validar su aplicación en el transporte de petróleo crudo cubano.
-  Aplicar la metodología planteada en este trabajo en la planificación de operación de las instalaciones de transporte de petróleo pesado, con el objetivo de disminuir los costos de transporte.

BIBLIOGRAFÍA

- ✚ Banerjee, T., Ma, D. y Das, K., “Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves”. Canadian Journal of Chemical Engineering. (72) 207-211, 1994.
- ✚ Caldiño, V. y Salgado, M., “Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris”, 7mo Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México, 2004.
- ✚ Concha, A., Quiroga, H., Benjumea, P., “Modelamiento de la propagación de los frentes de contaminación generados por el transporte de combustibles por poliducto”, 2006.
- ✚ Columbie, M., Estudio del transporte de fuel oil desde Mazut hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa Ernesto Che Guevara. Tesis de ingeniería mecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2006. pp.54
- ✚ De la Paz, N., “Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida”. Revista Cubana de Farmacia. 36(1) 21-7, 2002.
- ✚ García, E. y Steffe, J., “Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newtonian Fluids in Pipe Flow”. Journal of Food Process Engineering. (9) 93-120, 1987.
- ✚ Guzmán, D., Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2001. 124h
- ✚ Ibarz, J., Vélez y Barbosa, G., Transporte de Alimentos Fluidos a Través de Tuberías, Inéditos, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001. 60h

- ✚ Izquierdo, R., “Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Empresa Cmdte Pedro Soto Alba”. Minería y Geología. (3)16-22, 1989.
- ✚ Laurencio, H. y Delgado, Y., “Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado”. Minería y Geología. 24(2), 2008. www.ismm.edu.cu/revistamg. [Consultada: 15 Diciembre 2008]
- ✚ Laurencio, H. y Delgado, Y., “Comportamiento reológicos de la emulsión de petróleo pesado”. Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. 16(2) 244-250, 2008. <http://redalyc.uaemex.mx>. [Consultada: 15 Diciembre 2008]
- ✚ 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.
- ✚ Mechetti, M. y Zapana, L., “Estudios electrorreológicos de fluidos basados en dispersiones de asfaltenos”, Congreso Producción 2000 y III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú, Misiones, Argentina, 2000.
- ✚ Mechetti, M. y Zapana L., “Estudio comparativo de actividad electrorreológica en petróleos argentinos”, I Encuentro Internacional de Física aplicada a la Industria del Petróleo y IV Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada, Bucaramanga, Colombia, 2000.
- ✚ Nakayama, T., Niwa, E. y Hamada I., “Pipe transportation of minced fish paste”. Journal of Food Science. 45 (4) 844-847, 1980.
- ✚ 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.

- ✚ Perona, P., “An experimental investigation of laminar-turbulent transition in complex fluids”. Journal of Food Engineering. 60 137-145, 2003.
- ✚ Sablani, S. y Shayya, H., “Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids”. Journal of non Newtonian fluid. 57(2) 327-335, 2003.
- ✚ Steffe, M. y Morgan, G, “Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods”. Food Technology. 11(7) 78-85, 1986.
- ✚ Vélez, J., Apuntes de Ingeniería de Alimentos I, Universidad de las Américas, Puebla, México, Inéditos, 2003

ANEXOS

Tabla 1.1. Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids.

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300K			
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg. K)	K (W/m.k)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Carbon steels Plain carbon (Mn $\leq$ 1% Si $\leq$ 0.1%)		7854	434	60,5	17,7

Tabla 1.2. Thermophysical Properties of Common Materials.

Description / Composition	Typical Properties at 300K		
	Density ρ (kg/m ³)	Thermal Conductivity k (W/m.k)	Specific Heat c_p (J/kg.K)
Blanket and Batt	16	0,046	-
Glass fiber, paper faced	28	0,038	-
	40	0,035	-
Glass fiber, coated, duct liner	32	0,038	835
Cellular glass	145	0,058	1000
Glass fiber, organic bonded	105	0,036	795
Polystyrene, expanded			
Extruded(R-12)	55	0,027	1210
Molded beads	16	0,040	1210

Tabla 1.3. Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids.

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300K			
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg. K)	k (W/m.k)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Aluminum Pure	933	2702	903	237	97,1
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5%Mg, 0.6%Mn)	775	2770	875	177	73,0
Alloy 195, Cast (4.5%Cu)		2790	883	168	68,2
Zinc	693	7140	389	116	41,8

Tabla 1.4. Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure.

T (K)	T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (KJ/kg. K)	$\mu \cdot 10^7$ (N . s/m ²)	$\nu \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ W/m.k	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
AIRE								
250	23	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	27	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707

Tabla 1.5. Thermophysical Properties of Saturated Fluids.

T (K)	T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m.k)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr	$\beta \cdot 10^3$ (K ⁻¹)
300	27	884,1	1,909	48,6	550	145	0,859	6,400	0,70
310	37	877,9	1,951	25,3	288	145	0,847	3,400	0,70
320	47	871,8	1,993	14,1	161	143	0,823	1,965	0,70
330	57	865,8	2,035	8,36	96,6	141	0,800	1	0,70