

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**

**MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS
RACIONALES DE TRANSPORTE POR TUBERÍAS DEL
COMBUSTIBLE CUBANO CRUDO MEJORADO 650**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Técnicas

HÉCTOR LUIS LAURENCIO ALFONSO

**Holguín
2012**

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**

**MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS
RACIONALES DE TRANSPORTE POR TUBERÍAS DEL
COMBUSTIBLE CUBANO CRUDO MEJORADO 650**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Técnicas

Autor: Prof. Aux., Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso, Ms. C.

Tutores: Prof. Tit., Ing. José Falcón Hernández, Dr. C.

Prof. Aux., Ing. Alberto Turro Breff, Dr. C.

**Holguín
2012**

PENSAMIENTO

“...Frecuentemente digo que cuando usted puede medir lo que está hablando y expresarlo en números, usted sabe algo de ello, pero cuando usted no pueda expresarlo en números su conocimiento es pobre y de una calidad poco satisfactoria; puede ser el principio del conocimiento, pero en sus pensamientos usted apenas ha avanzado al estado de la ciencia, cualquiera que sea el asunto de que se traté...”

William Thomson

“La revolución energética que impulsa Cuba para hacer más seguro y eficiente el sistema nacional, marcará un antes y un después en la isla.”

Fidel Castro Ruz

DEDICATORIA

...a mis padres, esposa, familiares y estudiantes que me apoyaron en todo momento. Al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, en el que me he formado como profesional y al que cada día dedico mi trabajo. En especial a mi hijo Héctor Manuel...

AGRADECIMIENTO

Luchar por un porvenir mejor, es el esfuerzo diario de un hombre cuando tiene una convicción segura de su futuro, reconoce el valor de aquellos que han brindado sus experiencias, conocimientos y su valioso tiempo.

Agradezco a todas aquellas personas, que de una manera u otra han contribuido a la realización de este trabajo; a mi tutor el Dr. C. José Falcón Hernández, al Lic. Mario Andrés Navarro Consuegra, a la Ms. C. Melek Campo Sofía, al Ms. C. Ignacio Romero Rueda, al Dr. C. Isnel Rodríguez González y al Dr. C. Tomás Fernández Columbié, en especial a mis compañeros del departamento de ingeniería mecánica.

A la revolución cubana que me ha dado la oportunidad de formarme como profesional.

A todos, muchas gracias.

SÍNTESIS

SÍNTESIS

En el presente trabajo se realiza un estudio teórico y experimental, donde se desarrollan relaciones funcionales para variaciones de presión en tuberías durante el transporte del combustible cubano CM-650. La revisión bibliográfica pone en evidencia las limitaciones de los trabajos analizados, en cuanto a desarrollo de modelos matemáticos y correlaciones empíricas que permitan evaluar los efectos simultáneos de la fuerza viscosa y de mezcla durante el transporte de fluidos por tuberías en régimen laminar. A partir del estudio experimental se hace la caracterización considerando el comportamiento reológico del combustible; en ella se modela el comportamiento de la viscosidad aparente con relación al gradiente de velocidad y la temperatura, observándose que el combustible presenta comportamiento pseudoplástico para las diferentes temperaturas experimentadas. Se proponen modelos que conforman un método apropiado para la evaluación y racionalización del proceso de transporte por tuberías, el que tiene en cuenta las principales propiedades físicas del combustible pesado CM-650. Los modelos y correlaciones propuestas, posibilitan la simulación de pérdidas de presión y potencia hidráulica para fluidos pseudoplásticos que se transportan en régimen laminar, considerándose los efectos de mezclado entre capas de flujo y el intercambio térmico en las tuberías. Con el propósito de contribuir a soluciones relacionadas a los métodos aplicables para el flujo de fluidos no newtonianos, se analizan las incidencias más significativas al determinar la temperatura racional de bombeo, como son el consumo de energía e impactos sociales y ambientales del proceso de transporte del combustible.

TABLA
DE
CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Introducción. | 1 |
| 1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN. | 8 |
| 1.1. Introducción. | 8 |
| 1.2. Clasificación de los hidrocarburos. | 9 |
| 1.2.1. Clases de combustibles cubanos. | 12 |
| 1.3. Trabajos relacionados con estudios reológicos de fluidos. | 13 |
| 1.4. Modelo reológico del combustible cubano CM-650. | 18 |
| 1.4.1. Factores que influyen sobre el comportamiento reológico. | 20 |
| 1.4.1.1. Efecto del campo electromagnético. | 21 |
| 1.4.1.2. Efecto de la emulsificación. | 22 |
| 1.4.1.3. Efecto de la presión. | 22 |
| 1.4.1.4. Efecto de los aditivos. | 23 |
| 1.4.1.5. Efecto de la temperatura. | 23 |
| 1.5. Trabajos relacionados con el transporte de fluidos complejos por tuberías. | 24 |
| 1.6. Modelos utilizados en el cálculo de transporte de fluidos pseudoplásticos. | 31 |
| 1.7. Aplicación del transporte de combustibles por tuberías. | 36 |
| 1.7.1. Ventajas del transporte por sistemas de tuberías. | 36 |
| 1.8. Conclusiones del capítulo. | 38 |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS RELACIONADOS CON EL TRANSPORTE DEL COMBUSTIBLE CUBANO. | 39 |
| 2.1. Introducción. | 39 |
| 2.2. Procedimientos metodológicos sobre la determinación del gradiente de presión en conductos circulares. | 39 |
| 2.3. Expresiones para la determinación de pérdidas de presión por resistencias locales. | 48 |
| 2.4. Expresiones para la determinación de costos y potencia hidráulica de transporte. | 50 |

| | |
|--|------------|
| 2.5. Modelo de la variación de temperatura del fluido en la tubería. | 53 |
| 2.6. Técnicas experimentales utilizadas. | 56 |
| 2.6.1. Procesamiento estadístico de los datos. | 61 |
| 2.6.2. Proceso de identificación del modelo del gradiente de presión. | 62 |
| 2.7. Conclusiones del capítulo. | 64 |
| 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS RACIONALES EN EL TRANSPORTE DEL COMBUSTIBLE CUBANO CM-650. | 65 |
| 3.1. Introducción. | 65 |
| 3.2. Características fisicoquímicas del combustible cubano CM-650. | 65 |
| 3.2.1. Resultados experimentales de la reología del combustible cubano CM-650. | 66 |
| 3.3. Análisis de la influencia de la temperatura en las propiedades del combustible cubano CM-650. | 70 |
| 3.4. Adecuación del modelo de variación de temperaturas en la tubería. | 74 |
| 3.5. Análisis del modelo del gradiente de presión. | 76 |
| 3.5.1. Obtención de los parámetros del modelo del gradiente de presión. | 81 |
| 3.5.2. Descripción de la influencia de la temperatura sobre las pérdidas de presión. | 83 |
| 3.6. Proceso para la obtención de la temperatura racional de transporte del combustible cubano CM-650. | 84 |
| 3.6.1. Obtención de la temperatura racional de transporte del combustible cubano CM-650, estudio de casos. | 86 |
| 3.7. Valoración de los impactos de la investigación. | 92 |
| 3.7.1. Análisis económico. | 92 |
| 3.7.2. Aporte social. | 94 |
| 3.7.3. Impacto ambiental. | 96 |
| 3.8. Conclusiones del capítulo. | 97 |
| CONCLUSIONES GENERALES. | 98 |
| RECOMENDACIONES. | 99 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. | 100 |
| ANEXOS. | |

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El sector industrial es el mayor consumidor de portadores energéticos, por lo que ocupa en Cuba un lugar importante en los lineamientos para la eficiencia económica. El adecuado rendimiento de los equipos electromecánicos en las instalaciones industriales y el uso racional de los recursos energéticos disponibles, inciden considerablemente en la reducción de los costos productivos.

En este escenario se produce un incremento de la generación eléctrica, principalmente a partir del petróleo crudo cubano. Con la ampliación productiva de estas fuentes nacionales dedicadas al desarrollo energético, se accede a un mayor uso del combustible crudo pesado en el sector industrial y a la vez se disminuyen las importaciones de portadores energéticos (Somoza y García, 2002).

La transportación de los combustibles en las centrales termoeléctricas cubanas y la industria minero metalúrgica, cobra importancia primaria en el trasiego por sistemas de tuberías desde los puertos hasta los depósitos y su posterior destino hacia las plantas. Estos sistemas difundidos mundialmente, cuando operan en los parámetros de máxima eficiencia, son de gran efectividad económica y ambiental con respecto a los demás medios de transporte de combustibles pesados.

Los sistemas de tuberías para el transporte de combustibles resultan tan eficaces que existen hoy en el mundo miles de kilómetros. En Cuba, la transportación por oleoductos, desde 1999 hasta el 2007, aumentó desde un 21 hasta un 24 %, siendo el oleoducto Varadero-Matanzas un claro reflejo del desarrollo actual entre las inversiones ejecutadas

en la industria petrolera cubana, el mismo elimina la transportación del petróleo crudo por barco en este litoral (Laurencio, 2007b).

El mayor problema en el transporte de los petróleos crudos cubanos, radica en que estos son fluidos de elevada viscosidad con comportamiento no newtoniano, que cambian esa propiedad en función del gradiente de velocidad, requiriéndose de la determinación de modelos reológicos que describan su comportamiento de flujo (Laurencio, 2008). Las investigaciones que se han realizado desde 1997 con petróleos pesados y sus mezclas (CM-650; CM-1100 y CM-1400), arrojan características tales como bajo grado API, alto contenido de hidrocarburos aromáticos, asfaltenos, elevado contenido de azufre, nitrógeno y la presencia de hidrocarburos altamente inestables (Om *et al.*, 2004).

El combustible cubano CM-650, formulado a partir de mezclas de petróleo crudo cubano de alta viscosidad, presenta numerosas dificultades para su transporte y manejo, requiriéndose de técnicas especiales para la mejora de sus propiedades. Lo anterior conlleva a que se estudien vías a través de las cuales pueda mejorarse la fluidez del combustible pesado. El calentamiento del combustible a una temperatura adecuada para el bombeo constituye la alternativa más usual y viable aplicada en la actualidad.

Por otra parte, se conoce que las teorías para la determinación de las propiedades reológicas y de transporte de líquidos y mezclas no conducen a un método teórico de estimación, sino a técnicas empíricas basadas en la evaluación de algunas constantes a partir de la estructura o propiedades físicas del fluido del que se trate. Los métodos utilizados para la estimación de las pérdidas de carga en tuberías se basan en estudios y correlación de datos experimentales (Costa, 1984; Turro, 2002; Laurencio, 2007a).

La situación actual del equipamiento, la instrumentación y las líneas de transporte, asociada a la falta de métodos, tecnologías y procedimientos, no favorece la puesta en

práctica del transporte eficiente del combustible cubano CM-650. En tal sentido se han identificado las siguientes deficiencias:

- Desconocimiento de las propiedades de transporte del combustible cubano CM-650, debido a la insuficiencia de estudios en este campo.
- Falta de datos para la proyección, selección y obtención de los parámetros racionales de transporte del combustible crudo cubano.
- Los métodos de cálculo disponibles para el estimado de los parámetros energéticos en instalaciones de transporte han sido elaborados a partir de datos experimentales, obtenidos para sistemas particulares y no existe un método apropiado para determinar los parámetros racionales de transporte del combustible.
- En las condiciones actuales de operación, no se garantizan los parámetros adecuados para el desempeño eficiente del proceso de transporte del combustible pesado.

Para la solución de las deficiencias mencionadas, se requiere de estudios que permitan determinar las propiedades y parámetros racionales de transporte del combustible cubano CM-650, a partir de su naturaleza reológica y de la determinación de los gradientes de presión en las tuberías; por lo que este trabajo se convierte en una obra con un aporte novedoso que contribuirá al funcionamiento racional de las instalaciones de bombeo en puertos, plantas de generación eléctrica e industrias metalúrgicas.

Se presenta como **situación problemática** que el desarrollo de la ciencia y la tecnología, no ha avanzado a profundidad en el estudio y perfeccionamiento de métodos apropiados para los diferentes sistemas de transporte de combustibles cubanos, lo que dificulta en gran medida su diseño, selección y evaluación a nivel industrial. A pesar de las disímiles limitaciones se busca mejorar la eficiencia de los procesos productivos y los medios de producción relacionados con el tema en cuestión.

Dada la situación planteada, se observan insuficiencias en el conocimiento de las propiedades del combustible cubano CM-650 y sus regularidades ante variaciones de temperatura, dificultándose la correcta selección y el establecimiento de los parámetros racionales de transporte, lo que conduce al aumento del consumo energético e ineficiencia en las instalaciones de bombeo. Como consecuencia de la irracionalidad para la selección de temperaturas de flujo, en la mayoría de los casos se han encontrado temperaturas de bombeo muy superiores a la racional (Laurencio, 2010).

El **problema científico** a investigar radica en:

Inconsistencia de los métodos de cálculo relacionados con las principales propiedades y el comportamiento reológico del combustible cubano CM-650, lo que imposibilita el adecuado estudio de selección, evaluación y obtención de parámetros racionales en los sistemas de transporte por tuberías.

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

El proceso de transporte por tuberías del combustible cubano CM-650.

Campo de acción:

Reducción del consumo energético, basado en el establecimiento de parámetros racionales de transporte por tuberías.

Dado el problema a resolver se plantea como **hipótesis**:

Si se establecen las principales propiedades físicas y reológicas del combustible cubano CM-650 y las expresiones matemáticas que describan las regularidades del proceso de flujo por tuberías; es posible obtener un método para la selección y evaluación eficiente de los sistemas de transporte, a partir del establecimiento de parámetros racionales, incluyendo variables tales como temperatura, caída de presión y condiciones de transportación.

Con relación a la hipótesis, se plantea como **novedad científica**:

- Establecimiento del modelo de viscosidad aparente, los parámetros reológicos y la interrelación de las propiedades termofísicas que describen las regularidades del combustible crudo mejorado cubano CM-650.
- Propuesta de un método para la evaluación y obtención de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible crudo mejorado cubano CM-650, incluyéndose en el gradiente de presión los efectos simultáneos de mezclado, intercambio térmico y efecto viscoso.

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

Se define como **objetivo del trabajo**:

Obtener un método apropiado para la proyección, evaluación y búsqueda de los parámetros racionales de transporte del combustible cubano CM-650; basado en el establecimiento de las propiedades, el modelo reológico y los gradientes de presión en las tuberías.

Para cumplir el objetivo general, se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

1. Realizar las investigaciones teóricas y experimentales de las propiedades y parámetros de transporte del combustible cubano CM-650.
2. Analizar la influencia de la temperatura en las propiedades del combustible.
3. Proponer un método de cálculo conformado por un conjunto de ecuaciones, que tenga en cuenta las características reológicas y fenomenológicas del sistema de flujo.
4. Contribuir a la racionalización de los costos de transportación, sobre la base de la mejora de los métodos de cálculo, al tenerse en cuenta los efectos reales de flujo de fluido en tuberías.

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

1. Planteamiento de las limitaciones teóricas y expresiones empíricas desarrolladas para el cálculo de las pérdidas de presión al ser aplicadas al combustible cubano CM-650.
2. Planificación y realización de experimentos.
3. Obtención de los parámetros del modelo reológico y del gradiente de presión.
4. Simulación de las características de transporte del combustible cubano CM-650, para la obtención de la temperatura racional de bombeo.
5. Análisis de las incidencias económicas y ambientales en los sistemas estudiados de transporte de combustibles.

Los **métodos y técnicas de investigación** empleados en el trabajo son los siguientes:

1. Técnica **de investigación bibliográfica** en los archivos de las empresas, las revistas científicas, las oficinas de registro de patentes y los textos clásicos.
2. Método **sistémico** para procesar el conocimiento científico referido a la temática abordada en el presente trabajo.
3. Método **histórico-lógico** para el estudio del desarrollo de las teorías relacionadas con el proceso de flujo de combustibles pesados por tuberías y accesorios.
4. Método **inductivo-deductivo** para el establecimiento de las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para la determinación del gradiente de presión en el caso de fluidos complejos.
5. Método **de modelación físico-matemática** para la obtención de los modelos propuestos, basado en los principios del movimiento de fluidos no newtonianos.
6. Método **de investigación experimental** para obtener los datos experimentales necesarios para validar y describir las principales regularidades del proceso de flujo del combustible pesado cubano.

7. **Técnicas computacionales** para el procesamiento estadístico de los datos experimentales, la validación del modelo matemático y obtención de los parámetros racionales de transporte.

Aportes metodológicos:

- Se establece un método para el cálculo, evaluación y obtención de la temperatura racional de bombeo en los sistemas de transporte del combustible cubano CM-650; cuya aplicación puede generalizarse a otros tipos de fluidos.
- Los resultados y modelos propuestos para describir el sistema de flujo del combustible por tuberías, pueden ser introducidos en temas de asignaturas afines a las carreras de Ingeniería Mecánica, Química y Metalúrgica.

Aportes prácticos:

- La aplicación de los modelos reológicos obtenidos, permiten determinar el comportamiento del fluido, los valores de sus parámetros y estimar la viscosidad aparente en función de la temperatura y el gradiente de velocidad.
- La investigación permite disminuir los costos de transporte del combustible cubano CM-650, mediante el perfeccionamiento de los métodos de cálculo y la reducción del consumo energético.

Producción científica del autor sobre el tema de la tesis:

Como parte del proceso investigativo el autor defendió exitosamente su tesis de maestría, la cual estuvo relacionada con la temática investigada; presentó siete trabajos en eventos científico-técnicos y realizó dos publicaciones en revistas científicas. Además dirigió, como tutor, nueve tesis de ingeniería y una tesis de maestría, las que se vinculan directamente con el tema de investigación doctoral. Los eventos, publicaciones y tutorías antes mencionadas se relacionan en el anexo VII del presente trabajo.

CAPÍTULO 1

MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

El papel que desempeñan los sistemas de transporte en las industrias petrolíferas es considerable en los tiempos actuales. La instalación de un nuevo oleoducto requiere de estudios previos significativos, en los cuales, se tienen en cuenta todas las variantes que pudieran acortar o beneficiar el proceso de transporte.

El análisis riguroso de estudios en este campo, permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que se manifiestan entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos relacionados con el transporte de petróleos pesados por sistemas de tuberías. En tal sentido, se declara como objetivo del capítulo:

- Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionada con las propiedades de fluidos y su transporte por tuberías, orientado a la fundamentación de la investigación del combustible cubano CM-650.

En el desarrollo de la investigación se han consultado diferentes trabajos con resultados reconocidos; la revisión bibliográfica ha estado dirigida a dos líneas fundamentales:

- Las investigaciones efectuadas en los últimos años sobre la temática de fluidos no newtonianos desde el punto de vista científico, técnico y práctico.
- La información relacionada con el enfoque teórico-metodológico.

Los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico se sintetizan según Guzmán (2001), permitiendo sustentar teóricamente el trabajo investigativo. En la búsqueda de la

base teórica metodológica, fue necesaria la aplicación de métodos que permitieran la identificación y el análisis de los diferentes aspectos que tributan al proceso de transporte de fluidos por tuberías como sistema integrado. El análisis del sistema de flujo se basó en la obtención del gradiente de presión creado entre el inicio y el final de la tubería de transporte, a partir del conocimiento del modelo reológico del combustible crudo cubano CM-650; además de tener en cuenta el gradiente de temperatura que evidencia el fluido al transportarse por las tuberías.

1.2. Clasificación de los hidrocarburos

A los hidrocarburos se les define como compuestos químicos de carbón e hidrógeno; elementos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros forman parte de estos. La génesis del petróleo, se ubica en el depósito y descomposición de organismos de origen vegetal y animal, que hace millones de años quedaron atrapados en rocas sedimentarias en ambientes marinos o próximos al mar y que fueron sometidos a enormes presiones y elevadas temperaturas. La palabra petróleo, proveniente del latín “petroleum” y significa aceite de piedra (Momemer, 2004; Laurencio, 2007b).

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

El petróleo se localiza en el subsuelo, impregnado en formaciones de tipo arenoso y calcáreo. Asume los tres estados físicos de la materia (sólido, líquido y gaseoso) según su composición, temperatura y presión a la que se encuentra. Los yacimientos de petróleos crudos están constituidos por hidrocarburos líquidos, bajo las condiciones de presión y

temperatura del depósito, su viscosidad es medida a la temperatura original del yacimiento y a la presión atmosférica, como un líquido estabilizado libre de gas.

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se presentan diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes (Ocampo *et al.*, 1997; Om *et al.*, 2004).

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

1- Petróleo de base parafínicas.

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

2- Petróleo de base asfáltica o nafténica.

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

3- Petróleo de base mixta.

- De composición por bases intermedias, formados por toda clase de hidrocarburos: saturados, no saturados (etilénicos y acetilénicos) y cíclicos (ciclánicos o nafténicos y bencénicos o aromáticos).

1.2.1. Clases de combustibles cubanos

En Cuba se han utilizado diferentes clases de combustibles, obtenidos a partir del petróleo crudo al mezclarlo con otras sustancias para el mejoramiento de sus propiedades, las que favorecen el proceso de transporte y de combustión (Prieto, 2008).

Estas clases son:

1. FC-900: está compuesto por 55 % de crudo cubano mezclado con 45 % fuel oil de alto contenido de vanadio, más un dispersante de asfaltenos a 100 p.p.m. (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 CM-650, CM-1100 y CM-1400 se obtienen al mezclar petróleo crudo con nafta y un dispersante de asfaltenos a 100 p.p.m. (estos combustibles comienzan a elaborarse a partir del año 1997). Los números que representan a cada uno de los combustibles definen la viscosidad en centistokes (cSt) a 50 °C (Prieto, 2008).

Las características fisicoquímicas de los combustibles cubanos varían considerablemente con respecto a los combustibles de producciones internacionales, por lo que se caracterizan como combustibles de baja calidad (Om *et al.*, 2004; Laurencio, 2010). Estas características traen múltiples dificultades en las líneas de transporte y en los generadores de vapor, desde su preparación, manipulación y quema. Su alto contenido de asfaltenos disminuye el poder calórico neto y tienden a formar lodos volátiles propensos a coquizarse en las zonas de bajas temperaturas. En ocasiones estos combustibles pueden presentar inestabilidad por calentamiento al mezclarse o al diluirse con otro combustible.

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

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

Los fenómenos de inestabilidad provocan dificultades por la formación de sedimentos en intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento y tuberías de transporte. A mayor contenido de azufre en el combustible crudo cubano, se observa un incremento en el contenido de asfaltenos y una disminución del contenido de carbono (Prieto, 2008; Om *et al.*, 2004).

1.3. Trabajos relacionados con estudios reológicos de fluidos

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la mecánica de los fluidos se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseulle, interesado en la circulación de la sangre. Sobresalieron también en el aspecto teórico Julios Weibach y Gottlieb Hagen, y se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Ventura y Pitot entre otros (Otero, 1989; Laurencio, 2007b; Ochoa, 2011).

El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e independientemente al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se les conoce como ecuaciones de Navier-Stokes (Laurencio, 2007b; Ochoa, 2011). En Cuba el

desarrollo de los estudios de fluidos no newtonianos no se promueve hasta después del triunfo de la Revolución, y han devenido una de las bases principales del progreso científico-técnico en este campo de la ciencia.

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

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

Se señala como principal limitación de estos trabajos, no tener en cuenta el comportamiento reológico del fluido para variaciones de la temperatura; siendo esta variable de gran influencia en la estructura y propiedades de la materia, según refieren los resultados obtenidos por diferentes investigaciones (Branco y Gasparetto, 2003; Da Silva *et al.*, 2005; Dak *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2008; Andrade *et al.*, 2009; Vandresen *et al.*, 2009; Trapeznikov, 2011).

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

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

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

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

Wang (1991); Wang y Dong (1995) realizaron estudios del comportamiento de la viscosidad en diferentes petróleos pesados, comparando la acción de la temperatura y el campo magnético sobre el área de flujo. En todos los casos la viscosidad disminuyó y según sus recomendaciones el generador de campo magnético puede ser conectado a la tubería en el sistema de bombeo mecánico.

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

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

Por otro lado Mechetti *et al.* (2001) llevaron a cabo estudios electrorreológicos de petróleos crudos y emulsiones; ellos analizaron el comportamiento de la viscosidad en condiciones de flujo para diferentes velocidades de deformación e intensidades de campo, donde observaron un rompimiento rápido de la emulsión, lo que resulta de gran importancia para el proceso de extracción de agua en los crudos. Similar al trabajo antes mencionado, en Balan *et al.* (2008) caracterizan el comportamiento reológico de un petróleo crudo al ser tratado mediante variaciones del campo eléctrico y magnético para diferentes temperaturas. Mediante este estudio se demostró la relación de variaciones de la viscosidad para distintas temperaturas e intensidades del campo electromagnético.

En las últimas décadas se han realizado varios estudios comparativos de viscosidad relacionados con el método de emulsión de los petróleos pesados; aunque no es el método más empleado en el transporte de petróleos, se resaltan los resultados obtenidos con la Oriemulsión en Venezuela; se encuentran además los trabajos de Romo (1993); Romo (1998), donde se determina que las emulsiones con un 70 % de petróleo pesado y 5 % de sustancia tensoactiva, tienen una alta fluidez porque la viscosidad se ha reducido a menos de 1/10 de la viscosidad del petróleo pesado si se logra formar una emulsión directa.

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

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

De igual manera Ferro (2000); Ferro *et al.* (2004) a partir del estudio reológico realizado a un petróleo crudo cubano, precisan la influencia de determinadas variables en la preparación de emulsiones, emplean productos de la pirólisis para su utilización como pinturas asfálticas. En el trabajo experimental se emplearon dos tipos de agentes emulsionantes. En los estudios reológicos de los petróleos se observaron comportamientos pseudoplásticos y plástico ideal para todos los casos.

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

En Díaz y Falcón (2004b), se exponen los resultados del estudio reológico de un petróleo crudo cubano y sus emulsiones; se brinda información de las investigaciones llevadas a

cabo en este campo así como se obtienen experimentalmente las curvas de flujo en viscosímetros rotacionales para el petróleo crudo cubano y 17 emulsiones elaboradas. De forma similar Manals y Falcón (2005) analizan la influencia que presentan los productos de pirólisis y los agentes emulsionantes sobre la tensión superficial y las propiedades del petróleo crudo cubano.

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

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

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

1.4. Modelo reológico del combustible cubano CM-650

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos, a su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988; Garcell *et al.*, 1988; Díaz, 1990; Darby, 2001; Turro, 2002; Gardea, 2008; Laurencio, 2009b).

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

Según Laurencio (2009a) el combustible cubano CM-650 presenta un comportamiento no newtoniano del tipo pseudoplástico, partiendo de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aún cuando se mantienen la temperatura y otras condiciones constantes. Aunque no se analiza la influencia de la temperatura en el rango de operación de bombeo; se demuestra que su viscosidad disminuye con el incremento del gradiente de velocidad; donde esta comienza a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante $\tau > 0$, (figura 1.1b). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele, (ecuación 1.2):

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

Donde: n - índice de flujo; (adimensional). K - índice de consistencia másica; (Pa·s).

$$-\frac{dv_x}{dy} = \overset{\circ}{\gamma} - \text{gradiente de velocidad; (1/s)}.$$

Según Khatib (2006), la viscosidad aparente de acuerdo con la ecuación 1.2 viene dada por la relación:

$$\mu_a = K \cdot \left(\overset{\circ}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (1.3)$$

Para los líquidos pseudoplásticos y dilatantes el gradiente de velocidad en la tubería se puede expresar en función de la velocidad media del fluido (v) y del índice de flujo (n), mediante la ecuación 1.4.

$$\overset{\circ}{\gamma} = \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{8 \cdot v}{D} \right) \quad (1.4)$$

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo de corte como función del gradiente de velocidad, se obtienen las curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo (figura 1.1).

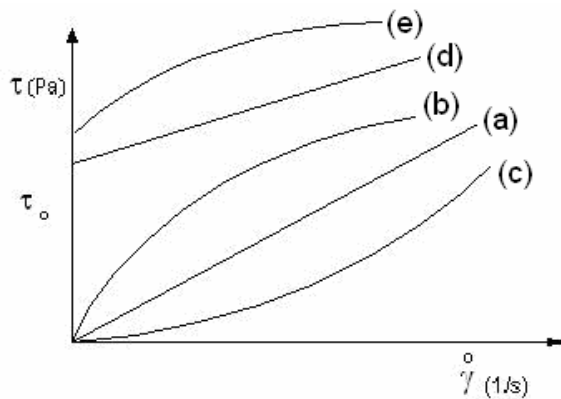


Figura 1.1. Curvas de flujo típica: (a)- newtoniano; (b)- seudoplástico; (c)- dilatante; (d)- plástico ideal (Bingham); (e)- plástico real. **Fuente:** Garcell (2001).

La clasificación reológica tiene su aplicación fundamentalmente en la correcta selección de métodos aplicables a la evaluación de instalaciones, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido, lo que favorece significativamente al objetivo de la investigación del transporte del combustible pesado (Laurencio *et al.*, 2011). En el anexo 2 se pueden observar, de forma general, los modelos reológicos que no se han especificado en este acápite.

1.4.1. Factores que influyen sobre el comportamiento reológico

En las industrias química, minera y petrolera se presenta el flujo multifásico a través de tuberías, muy complejo de modelar debido a la presencia de varias fases (Kunii, 1991). Estas mezclas de comportamiento no newtoniano, en algunos casos presentan un esfuerzo de corte inicial (Gillies *et al.*, 1991; Doron y Barnea, 1995); la reología de estos sistemas se ha estudiado por años y desafortunadamente la mayoría de las aproximaciones matemáticas basadas en sistemas ideales, son de uso limitado para definir el comportamiento reológico al variarse diferentes factores.

En los sistemas coloidales, el efecto de las propiedades de superficie se debe fundamentalmente a que el comportamiento reológico es afectado considerablemente por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, lo que influye directamente sobre la interacción neta entre las partículas (Turro, 2002).

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. Cuando la interacción neta es repulsiva, se observa un comportamiento newtoniano, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva el fluido puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial (Cerpa, 1997; Cerpa y Garcell, 1998; Cerpa y Garcell, 1999).

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

1.4.1.1. Efecto del campo electromagnético

En los fluidos con características coloidales, se manifiestan significativamente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales, que pueden ser afectados por la presencia del campo electromagnético. En los fluidos cuya distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se revelan también estos fenómenos, modificándose el equilibrio de atracción-repulsión entre partículas al desplazarse hacia la atracción, debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals (Tang y Li, 1986; Urakami, 1990; Szymula *et al.*, 2000; Balan *et al.*, 2008). Hasta el momento no se han

reportado los efectos del campo electromagnético en las propiedades del combustible cubano CM-650, por resultar muy costosa su aplicación práctica.

1.4.1.2. Efecto de la emulsificación

Los tipos más comunes de emulsiones de petróleos son aquellas en las que el aceite se dispersa en agua, en cuyo caso el sistema se conoce como emulsiones oleoacuosas o cuando el agua se dispersa en el aceite para formar emulsiones hidrooleosas (Oberbremer *et al.*, 1990; Bayvel y Orzechowsky, 1993; Nehal *et al.*, 1999; Momemer, 2004).

El comportamiento reológico de las emulsiones es más complicado que el de las suspensiones sólidas en líquido, ya que las partículas dispersas en las emulsiones son deformables por naturaleza (Pal y Masliyah, 1990). En la categoría de alta relación de aceite-agua, las emulsiones se comportan como fluidos pseudoplásticos (Schramm, 1992; Laurencio y Delgado, 2008a). El comportamiento reológico depende fundamentalmente del diámetro promedio de las gotas de la fase interna, así como de la concentración.

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

1.4.1.3. Efecto de la presión

La viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no está muy afectada para valores moderados de la presión; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, esta última, crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de estimación de la

viscosidad y en general de las propiedades reológicas de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones (Costa, 1984; Hunter, 2007).

1.4.1.4. Efecto de los aditivos

En ocasiones, distintos tipos de aditivos, capaces de modificar la concentración real de la fase dispersa del sistema, afectan notablemente la reología de este tipo de fluidos (Balagui *et al.*, 2010; Bourbon *et al.*, 2010; Chenlo *et al.*, 2010; Colby, 2010). Además, cualquier sustancia que pueda modificar la carga superficial de la fase dispersa y por tanto su capacidad para atraerse o repelerse modifican drásticamente el comportamiento reológico de los sistemas constituidos por varias fases (Benítez *et al.*, 2004; Risica *et al.*, 2010).

En las mezclas de petróleo con presencia de aditivos, un papel importante, en muchos casos, lo tiene el orden del mezclado y de la adición de los componentes de la mezcla, porque la reversibilidad o la ruptura del sistema depende mucho de la estructura que se logre al final de la preparación de la mezcla (cuando se detiene la agitación) (Falcón, 2011). El combustible cubano CM-650, es formulado a partir de la aplicación del efecto de aditivos en su viscosidad y en la dispersión de los asfaltenos.

1.4.1.5. Efecto de la temperatura

En principio, el comportamiento del fluido siempre y cuando no exista ninguna reacción o proceso físico, pudiera seguir un comportamiento de acuerdo con la ley de Arrhenius. En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura (Balagui *et al.*, 2010; Bourbon *et al.*, 2010; Chenlo *et al.*, 2010; Colby, 2010); en el caso de los fluidos pseudoplásticos el parámetro más afectado es el índice de consistencia másica, notándose poca incidencia en el índice de flujo (Branco y Gasparetto, 2003; Da Silva *et al.*, 2005; Dak *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2008; Laurencio y Delgado 2008b; Andrade *et al.*, 2009; Vandresen *et al.*, 2009).

La disminución de la viscosidad se debe a dos efectos principales (Garcell, 1993; Laurencio y Delgado 2008b; Cárdenas y Fonseca, 2009; Trapeznikov, 2011):

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

Paul (1978); Pelaez y Stachenco (1999) plantean que por debajo del punto de enturbiamiento ciertos crudos tienen un rápido aumento de viscosidad debido a la precipitación de parafina y debilitamiento de enlace entre componentes. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de líquidos se representa mediante la ecuación 1.5 (Reid y Sherwood, 1966; Laurencio y Delgado, 2008b; Andrade *et al.*, 2009; Vandresen *et al.*, 2009; Trapeznikov, 2011):

$$\mu = C \cdot e^{B \cdot t} \quad (1.5)$$

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

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

De acuerdo con la ecuación 1.5, la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura. En la práctica, la aplicación del efecto de la temperatura para la disminución de la viscosidad del combustible es el método de mayor aplicabilidad, prevaleciendo la dificultad de que la temperatura de transporte se selecciona de manera irracional (Laurencio y Delgado, 2008b; Nikolaev, 2011).

1.5. Trabajos relacionados con el transporte de fluidos complejos por tuberías

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

En los estudios realizados por García y Steffe (1987); Liu y Masliyah (1998) se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; en este caso las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron con el índice de flujo, los números de Reynolds y Hedstrom.

En la revisión bibliográfica resultaron significativos los estudios precedentes dedicados al hidrotransporte, los que han servido de aporte a la comprensión de los métodos que describen el comportamiento del flujo de fluidos complejos en tuberías. Dentro de estos trabajos se destacan los resultados de Ivenski (1957); Iakovlev y Dalkov (1961); Pérez (1979) donde sobre la base de las investigaciones teóricas y experimentales, determinaron los parámetros y los regímenes racionales de hidrotransporte de diferentes minerales.

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

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

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, para la cual se utiliza el criterio generalizado de Reynolds.

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

En Izquierdo (1989); Izquierdo *et al.* (2001) se obtiene gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento (λ) y el número generalizado de Reynolds (Re^*). El análisis se realiza determinándose los diferentes regímenes de transporte de las tuberías. De forma similar, Suárez (1998) hace referencia a la elaboración del modelo físico-matemático del movimiento de suspensiones de mineral por tuberías, basado en los resultados de las investigaciones de las propiedades reológicas y la determinación de las pérdidas específicas de presión para el movimiento de las hidromezclas de mineral en régimen turbulento.

Turro (2002) a partir del modelo matemático, propone un sistema de correlaciones para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte de colas, que provienen de los resultados de la caracterización realizada al fluido para diferentes temperaturas. En este trabajo no se tiene en cuenta el estado no estacionario del proceso, al no contemplar en el modelo el gradiente de temperatura durante el recorrido del fluido en las tuberías.

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

Relacionado con la modelación del flujo de fluidos no newtonianos en general, Davidson *et al.* (2004) muestran un estudio teórico de algunos sistemas de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el comportamiento de ciertas clases de fluidos no

newtonianos; obtienen un modelo para fluidos plásticos Bingham, pseudoplásticos y dilatantes en densidad variable, no descrito en trabajos precedentes.

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

Adhikari y Jindal (2000) incorporaron el concepto de las redes neuronales en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano; se obtienen errores de predicción menores a 5,4 % con respecto a los valores experimentales. De forma similar Sánchez (2002) realiza un estudio numérico de mecánica de fluidos 2D en una contracción brusca para fluidos no newtonianos tipo ley de potencia de Ostwald de Waele. Se emplean dos métodos de resolución, el método de los volúmenes finitos y el método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de momentum lineal y de continuidad. En ambos métodos se estudia el comportamiento del fluido para diferentes índices de flujo.

Perona (2003) reportó los resultados obtenidos en la transición de régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidas; se consideró que las discrepancias observadas en su estudio pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Entre las investigaciones relacionadas para el transporte de petróleos pesados por tuberías se pueden encontrar varios trabajos como el de Liang (1999), donde se presentó resultados comparativos de pruebas para transporte de crudo tratado magnéticamente a grandes distancias a través de oleoductos. Las pruebas se corrieron en un aparato de tratamiento magnético para varias intensidades y diferentes configuraciones del campo magnético bajo

ciertas temperaturas, flujo y caída de presión. Las deducciones mostraron que los factores más importantes en el tratamiento son la temperatura y el campo magnético.

Placencia y Martínez (2000); Martínez y Eguez (2001), arribaron a conclusiones significativas en el sentido de la aplicación de las propiedades reológicas de petróleos ecuatorianos al transportarse por tuberías, a pesar de no tenerse en cuenta los criterios de semejanza, importantes a la hora de extrapolar los resultados a escala industrial. En estos trabajos se realiza el estudio solamente para tuberías de una pulgada.

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

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

Salazar *et al.* (2005) presentan un análisis teórico del problema de transporte de recortes de perforación en pozos horizontales. La solución del modelo permite evaluar el comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad, la fracción de volumen de recortes total y la relación de la altura del lecho estacionario y del diámetro de

la tubería. Los resultados numéricos se compararon con datos experimentales, encontrándose una comparación satisfactoria entre los perfiles medidos y los simulados.

Haoulo *et al.* (2005) evalúan el efecto de la densidad y de la viscosidad dinámica de mezcla en la determinación del gradiente de presión longitudinal de flujo de petróleo bifásico en tuberías horizontales para un fluido pseudohomogéneo. Se evaluaron 16 ecuaciones de viscosidad de mezcla y cuatro ecuaciones de densidad de mezcla (anexo 1). La evaluación del desempeño de los diferentes modelos para determinar el gradiente de presión, se realiza comparando los resultados obtenidos por cada modelo con 93 datos experimentales.

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

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

Mediante el estudio realizado por Frigaard *et al.* (2007) se proponen los modelos de desplazamiento por tubería de un petróleo crudo, los mismos son aplicables a diferentes regímenes de flujo, en consideración con diferentes diámetros de tubería, lo cual amplía el campo de aplicación de los modelos para casos prácticos.

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

Para la optimización de los sistemas de flujo de fluidos por tuberías, la función objetivo es usualmente formulada en términos de costos fijos y pocas veces se tienen en cuenta los costos de energía (Abebe y Solomatine, 1998; Walski, 2001). Investigadores como Goulter y Bouchart (1990); Loganathan *et al.* (1995); Xu y Goulter (1999); Tanyimboh y Templeman (2000); Martínez (2007), utilizan sólo los costos de inversión durante la formulación, los cuales no representan resultados satisfactorios de optimización.

Chiong (1985); Hechavarría (2009) incluyen en la función objetivo los costos energéticos, donde los costos de inversión totales de capital incluyen además de los costos fijos, en función de los diámetros y las longitudes de las tuberías, los costos variables producto del bombeo directo. El objetivo del procedimiento es minimizar los costos anuales de capital y los costos energéticos anuales, donde los costos fijos están restringidos a los costos de inversión de las tuberías (Martínez *et al.*, 2007).

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

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

Según lo planteado por Bienvenido (1973); Roque (1989); Turiño (1999); Santos y Martín (1999); León y Percy (2000); Turro (2002), sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacionales de equipos de bombeo, el método más simple para la obtención de los parámetros de funcionamiento y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el empleo de coeficientes de corrección específico para cada fluido, obtenidos por vía experimental.

La revisión bibliográfica descrita no da respuesta satisfactoria a la problemática tratada. En la mayoría de los casos se trata la fenomenología de fluidos no newtonianos, que aunque sirven de base para la investigación no describen en su totalidad el fenómeno estudiado (el transporte de fluidos a temperaturas superiores a la del ambiente y las irregularidades del flujo en régimen laminar). El planteamiento impone la necesidad de dedicar una investigación que contribuya a la mejora de la eficiencia energética en los sistemas de transporte del combustible cubano CM-650, a partir del establecimiento de los parámetros racionales basados en las propiedades reológicas y de transporte de este fluido.

1.6. Modelos utilizados en el cálculo de transporte de fluidos pseudoplásticos

El parámetro más importante del flujo en tuberías es el gradiente de presión. El comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad en un fluido no newtoniano y en particular el de petróleos pesados, es sustancialmente diferente del comportamiento newtoniano (Doron y Barnea, 1995; Doron *et al.*, 1997). La predicción de las caídas de presión y los patrones de flujo constituyen un problema muy complejo, donde las dos aproximaciones principales que se han usado son relacionadas a continuación.

- 1) Correlaciones de datos empíricos, usando potencialmente un razonamiento semi-teórico como por ejemplo los resultados de Newitt *et al.* (1955); Turian y Yuan (1977); Suárez (1998); Izquierdo *et al.* (2001); Turro (2002); Laurencio (2007b).
- 2) Desarrollo 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 *et al.* (1997).

La principal limitación de los modelos teóricos existentes, consiste en su imposibilidad para predecir de manera suficientemente exacta los efectos de mezclado y cambio de densidad del fluido en las tuberías, mientras que las correlaciones empíricas tienen un intervalo limitado de aplicabilidad, cuando no están concebidas bajo criterios de semejanzas para la extrapolación del factor de fricción (Nikolaev, 2011).

Los números adimensionales principales que permiten establecer el criterio de semejanza en diferentes condiciones del flujo de fluidos (Otero, 1989; Laurencio, 2007b), son:

Número de presión:

$$\left(\frac{H}{v^2} \right) = \left(\frac{\Delta p}{\frac{v^2}{2} \cdot \rho} \right) \quad (1.6)$$

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

Número generalizado de Reynolds para fluidos pseudoplásticos y dilatantes (Garcell, 2001; Turro, 2002), el que se describe por la ecuación 1.7:

$$Re^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (1.7)$$

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

Estos números se suelen ordenar en la forma siguiente (ecuación 1.8):

$$\left(\frac{H}{v^2} \right) = k_1 \cdot \left(\frac{k_0}{D} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^{k_3} \cdot (\text{Re}^*)^{k_4} \quad (1.8)$$

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

Esta expresión evidencia el efecto del escalado al variar las dimensiones de la tubería y condiciones de transporte del fluido, la cual se puede reducir a la ecuación de Darcy-Weibach (ecuación 1.9):

$$\left(\frac{H}{v^2} \right) = \lambda \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1.9)$$

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

$$\lambda = k_1 \cdot \left(\frac{k_0}{D} \right)^a \cdot (\text{Re}^*)^c \quad (1.10)$$

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 (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 o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971; Foust *et al.*, 1980; Macedo, 2000; Macedo *et al.*, 2001; Gardea, 2008). La información que existe en este sentido, ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y los trabajos que se han realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe *et al.*, 1986; Ibarz *et al.*, 2001; Vélez, 2003; Perona,

2003; Sablani y Shayya, 2003), no relacionan el intercambio térmico y el efecto de mezclado en el transporte del fluido.

De forma similar Darby (2001); Gardea (2008), tratan el factor de fricción de Fanning (f_F) (para este caso $f_F = \lambda/4$) mediante la gráfica obtenida por Dodge y Metzner para fluidos que se ajustan a la ley de potencia, adaptada por Levenspiel (1986) (figura 1.2), en la cual se incluyó el flujo laminar con mezcla según Laurencio *et al.* (2011).

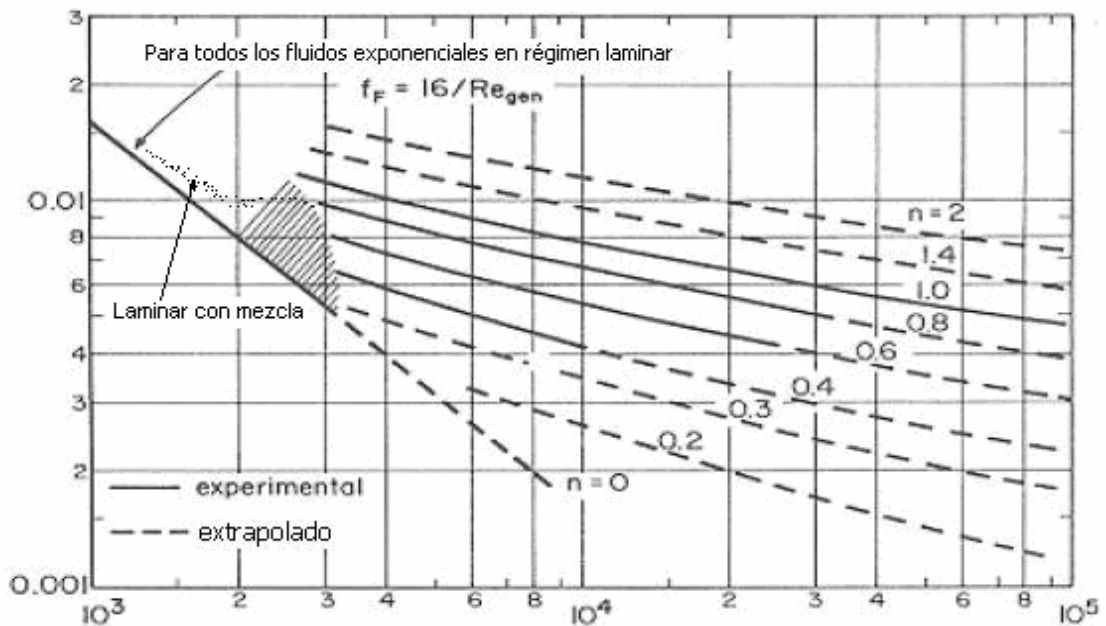


Figura 1.2. Diagrama del factor de fricción para fluidos pseudoplásticos.

Fuente: Gardea (2008).

Según Martínez y Linares (2001) el coeficiente de fricción para el manejo de fluidos pseudoplásticos se puede ajustar a la ecuación 1.11, obtenida por Manssur y Rajie (1988):

$$\lambda^* = \psi \cdot (\text{Re}^* \cdot n) \cdot e^{\beta \cdot (\text{Re}^* \cdot n)} \quad (1.11)$$

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

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

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

$$\frac{1}{\lambda^*} = A \log \left[\left(\frac{B}{\text{Re}^* \lambda^{*\frac{1-n}{2}}} \right) + \frac{(e/d)}{\alpha} \right] \quad (1.12)$$

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.

Por otra parte, Darby (2001) recomienda un conjunto de correlaciones para la determinación del factor de fricción de Fanny (ecuación 1.13):

$$f = (1 - \alpha) \cdot f_L + \frac{\alpha}{(f_T^{-8} + f_{Tr}^{-8})^{1/8}} \quad (1.13)$$

Donde: f_L - factor de fricción laminar. f_T - factor de fricción turbulento. f_{Tr} - factor de fricción de transición. α - coeficiente de modelo.

Los factores de fricción del modelo y el coeficiente α se determinan por las expresiones propuestas por Darby (2001):

$$f_L = \frac{16}{\text{Re}^*} \quad (1.14)$$

$$f_T = \frac{0,0682 \cdot n^{-0.5}}{(\text{Re}^*)^{1/(1,87+2,39 \cdot n)}} \quad (1.15)$$

$$f_{Tr} = 1,79 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re}^{*(0,414+0,757 \cdot n)} \cdot e^{-5,24 \cdot n} \quad (1.16)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + 4^{-(\text{Re}^* - \text{Re}_{cr})}} \quad (1.17)$$

El número de Reynolds crítico se determina por la siguiente ecuación.

$$\text{Re}_{crit.} = 2100 + 875 \cdot (1 - n) \quad (1.18)$$

La simulación de pérdidas de presión en tuberías para el transporte del combustible pesado a partir de los modelos antes descritos, muestran notables desviaciones con relación a las pérdidas experimentales, obtenidas bajo las mismas condiciones de la simulación (Laurencio *et al.*, 2011).

1.7. Aplicación del transporte de combustibles por tuberías

En el mundo del petróleo, los oleoductos y los buques tanqueros son los medios por excelencia para el transporte del crudo. El oleoducto es el complemento indispensable y a veces el competidor del navío de alta mar, mediante el cual se conduce el petróleo desde el yacimiento hasta el puerto de embarque, del yacimiento directamente a la refinería o 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 procesado para obtener los productos derivados; el segundo momento es el de la distribución cuando los subproductos llegan hasta los centros de consumo.

Los oleoductos principales son tuberías de acero cuyo diámetro puede medir hasta más de 0,8 m y 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.

La construcción de un oleoducto que tiene que cruzar montañas, ríos y desiertos, constituye una gran tarea de ingeniería. El sistema de transporte de hidrocarburos por tuberías resulta el más eficiente y económico cuando se han tenido en cuenta los parámetros racionales de operación en diseño.

1.7.1. Ventajas del transporte por sistemas de tuberías

El transporte por tuberías tiene una gran aplicación en las industrias y en el laboreo de minas; además, en la industria metalúrgica tiene efectividad para la transportación de

concentrados de materiales no ferrosos, carbón, petróleo, gas, materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos (Laurencio, 2007b; Trapeznikov, 2011).

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

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

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

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

Las investigaciones dentro del transporte por tuberías, específicamente del desplazamiento de flujos líquidos, se han desarrollado en tres direcciones fundamentales (Turro, 2002; Laurencio, 2007b):

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

1.8. Conclusiones del capítulo

- En la literatura citada, se hace referencia general al estudio de las propiedades reológicas y de flujo de suspensiones acuosas con partículas, pulpas minerales, polímeros, combustibles pesados, extrapesados y emulsiones; encontrándose poca información sobre estos aspectos para las mezclas de combustibles pesados de Cuba.
- La esencia física del proceso de flujo por tuberías del combustible pesado cubano CM-650 es poco conocida, a esto se añaden las imprecisiones de las teorías científicas existentes para la predicción del gradiente de presión en los sistemas de tuberías, teniendo en cuenta variaciones de temperaturas y mezclado durante el transporte del fluido.
- Es insuficiente la información acerca del establecimiento de los parámetros racionales de transporte del combustible cubano CM-650 a través de tuberías; de ahí la necesidad del estudio teórico y experimental de este sistema en particular.

CAPÍTULO 2

**MATERIALES Y MÉTODOS RELACIONADOS CON EL
TRANSPORTE DEL COMBUSTIBLE CUBANO**

2. MATERIALES Y MÉTODOS RELACIONADOS CON EL TRANSPORTE DEL COMBUSTIBLE CUBANO

2.1. Introducción

Los conocimientos teóricos acerca del comportamiento y propiedades de transporte del combustible cubano CM-650, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados a la evaluación y diseño de los sistemas de transporte por tuberías de este fluido en las industrias cubanas; en tal sentido los objetivos del capítulo se sintetizan en:

- Establecer la investigación teórica y métodos que posibilitan describir las propiedades y comportamiento de flujo del combustible cubano CM-650.
- Describir las diferentes técnicas experimentales a utilizar en la investigación.

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

En los cálculos de ingeniería, se prefiere hacer uso de las expresiones que relacionan el factor de fricción de Fanning o el factor de fricción 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.

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

necesidad de determinar expresiones y métodos apropiados para la evaluación del transporte de petróleo, como es el caso específico de la mezcla que constituye el combustible cubano CM-650.

La obtención del modelo teórico-experimental para el transporte del combustible se elabora a partir del uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, de momentum y de energía, considerándose los efectos de los esfuerzos de mezclado entre capas de flujo (Vennard y Streeter, 1986; García, 2003; Mansoori, 2005; Japper *et al.*, 2009).

En general, las pérdidas de presión en las tuberías deben determinarse mediante experimentación. Esto implica que parte de la energía disponible se convierte en energía intrínseca durante un proceso irreversible. Las pérdidas ocurren cuando parte de la energía disponible durante el flujo de un fluido se convierte en energía térmica a través de esfuerzo cortante viscoso y turbulencia (Streeter *et al.*, 2000; Moring, 2006).

Para el análisis de los esfuerzos que intervienen en el flujo del combustible por la tubería, se consideró una sección de tubería inclinada con movimiento del fluido hacia arriba y un ángulo (θ) desde la posición horizontal, según se indica en la figura 2.1.

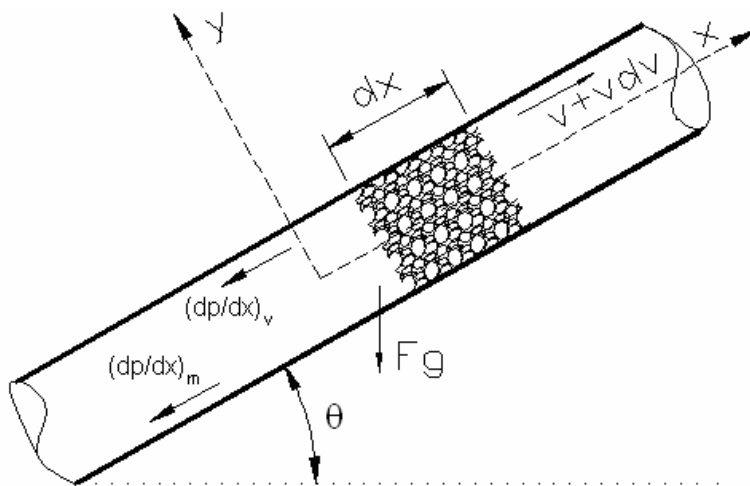


Figura 2.1. Esquema estructural utilizado en la obtención del modelo.

Al modelo de flujo homogéneo referenciado por Haoulo *et al.* (2005), para este caso se le adicionó el gradiente de presión causado por el mezclado entre capas de flujo en la tubería

Donde: A - área de la sección transversal;(m²), P - perímetro de la tubería; (m). θ - ángulo de inclinación de la tubería; (grados sexagesimales). dp/dx - gradiente de presión en la dirección del flujo; (Pa/m). τ_p - esfuerzo de corte en la pared de la tubería; (Pa). g - aceleración de gravedad; (m/s²). $(dp/dx)_m$ - gradiente de presión adicional en la tubería, (Pa/m).

El gradiente de presión adicional $[(dp/dx)_m]$ es causado por el efecto de mezclado entre las capas de flujo, incrementándose este efecto en el régimen turbulento y en tuberías de diámetros relativamente grande (incremento del recorrido radial de las partículas en la tubería) (Laurencio *et al*, 2011).

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

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.3)$$

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

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.4)$$

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

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

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

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

Donde:

El primer componente $[(dp/dx)_v]$ es el gradiente de presión en la tubería debido al esfuerzo viscoso del fluido, es costumbre asumir a este como la pérdida de carga total de la tubería. Este gradiente de presión para un fluido no newtoniano en flujo permanente, con un diámetro constante, se obtiene partiendo del análisis de la distribución de esfuerzos cortantes en la tubería, considerado en la figura 2.2 por un flujo en una tubería cilíndrica de diámetro (D) y la longitud (X).

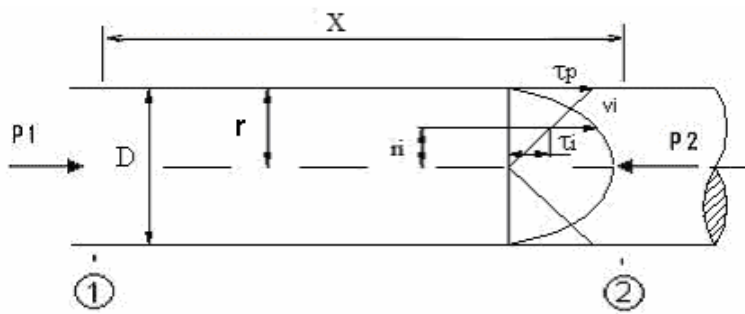


Figura 2.2. Sección de tubería que describe el flujo de un fluido no newtoniano por una tubería de sección circular y diámetro igual a D. v_i - velocidad en un punto genérico de radio r_i . τ_i - tensión tangencial en un punto genérico de radio r_i .

Según Méndez y Ojeda (2007); Hunter (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 de θ ; la ecuación de cantidad de movimiento con las simplificaciones anteriores se escribe como:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_v = -\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r \cdot \tau_p) \quad (2.7)$$

Del examen de la figura 2.2, luego de analizar las fuerzas involucradas, se considera que la velocidad en la pared del tubo es cero y la condición de frontera de que en $R = r_i$; se llega a la expresión del caudal en función de los esfuerzos de corte.

$$\frac{Q}{\pi \cdot r^3} = \frac{1}{\tau_p^3} \int_0^{\tau_p} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2.8)$$

Al integrar la ecuación 2.8 y considerado el combustible CM-650 como pseudoplástico para el desarrollo del modelo, según Laurencio (2010), se asume que la velocidad del fluido en la pared de la tubería es cero, queda:

$$\frac{Q}{\pi \cdot r^3} = \frac{n}{3 \cdot n + 1} \cdot \left(\frac{\tau_p}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.9)$$

El esfuerzo de corte en la pared de un tubo, para todo fluido no newtoniano independiente del tiempo según Rabinovich (1987); Méndez y Ojeda (2007), será:

$$\tau_p = \frac{D}{4} \cdot \left(\frac{dp}{dx} \right)_v \quad (2.10)$$

Al sustituir la ecuación 2.10 en la ecuación 2.9 y modificándola en función del diámetro de la tubería, se llega a la ecuación para el gradiente de presión debido al esfuerzo de corte viscoso entre el fluido y la pared de la tubería.

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_v = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^n \quad (2.11)$$

Expresada la ecuación 2.11 en función de la velocidad del fluido en la tubería queda:

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_v = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot v^n \quad (2.12)$$

Este modelo es utilizado por diversos autores (Placencia y Martínez, 2000; Martínez y Eguez, 2001), para la estimación de pérdidas de cargas cuando se transportan fluidos pseudoplásticos en tuberías rectas de pequeño diámetro. En estos trabajos no se especifica el régimen de flujo en que es válido el modelo y se ha notado la presencia de errores significativos en sus simulaciones para tuberías de diámetro relativamente grande; el

mismo solo considera el recorrido axial de las partículas y el perfil parabólico de velocidades (Laurencio *et al.*, 2011).

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

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_m = \lambda^* \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho. \quad (2.13)$$

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

En este caso λ^* representará los efectos adicionales del gradiente de presión en régimen laminar, manifestados con mayor incidencia en tuberías de gran diámetro (efecto de mezcla entre capas del flujo que no es contemplado por la ecuación 2.11) y se determina por experimentación, correlacionándolo con el número de Reynolds generalizado (Re^*), (ecuación 1.7).

$$\lambda^* = \frac{a}{Re^{*b}}. \quad (2.14)$$

Donde: a y b - son coeficientes que dependen del régimen del fluido y de las características propias de este; estos se determinan de forma experimental para cada fluido, similar a lo planteado por Aguirre *et al.* (1996); Streeter *et al.* (2000); Martínez *et al.* (2007); Laurencio y Turro (2009).

La ecuación 2.14, es aplicable en el caso de los fluidos no newtonianos de elevada viscosidad, donde 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 más gruesa en los fluidos no newtonianos que en los newtonianos (Darby, 2001).

Al sustituir la ecuación 2.14 en la 2.13 y expresándola en función del flujo volumétrico (Q), resulta:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_m = \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} \quad (2.15)$$

El tercer componente $[(dp/dx)_a]$ es el gradiente de presión debido a los cambios de densidad por variaciones de temperaturas en el fluido durante su transporte, considerado por García y Haoulo (2007) para el cambio de propiedades de fluidos con mezclado bifásico, donde de la componente de la ecuación 2.5 se deduce que:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_a = \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (2.16)$$

Resuelta la ecuación 2.16 (anexo I-A) y expresándola en términos del flujo másico resulta que:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_a = \frac{v^2}{L} \cdot (\rho_f - \rho_i) \quad (2.17)$$

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

Si se expresa la ecuación 2.17 en función del flujo volumétrico, queda:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_a = \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) \quad (2.18)$$

La ecuación 2.18, es función de la densidad y se debe tener en cuenta para el flujo con intercambio térmico, en el caso que las variaciones de temperatura sean significativas; para variaciones pequeñas de densidad el término puede ser despreciable.

El cuarto componente $[(dp/dx)_G]$ es debido a los cambios de energía potencial como consecuencia de los cambios de pendiente en la tubería (ecuación 2.19). En el caso de tuberías horizontales este gradiente de presión se hace cero.

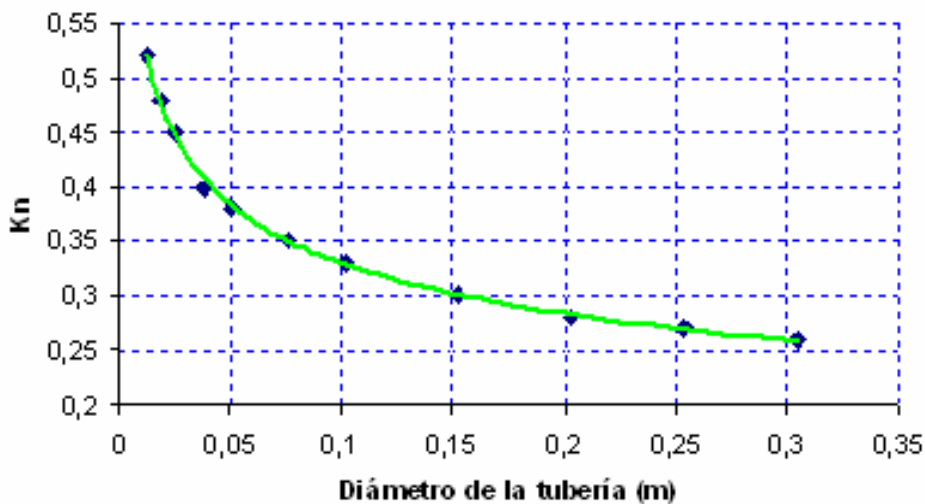


Figura 2.3. Correlación del coeficiente Kn en función del diámetro de la tubería.

Al sustituir la correlación de Kn en función del diámetro y el coeficiente Km en la ecuación 2.25 y esta en la 2.23, se obtiene el modelo que describe la caída de presión en el codo para fluido con comportamiento pseudoplástico, dada por la relación:

$$\Delta p_{codo} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{850}{Re^*} + \frac{0,199}{D^{0,22}} \right] \cdot v^2 \cdot \rho \quad (2.26)$$

Si los datos se necesitan en forma de longitudes equivalentes (L_e), se sumarán todas esas longitudes equivalentes correspondientes a todos los accesorios y se le añadirá a la longitud total de la tubería (Laurencio, 2007b).

Al sustituir la ecuación 2.11 (pérdidas por fricción en la pared de la tubería recta) en la ecuación 2.26, se obtiene la expresión para la determinación de la longitud equivalente en codos estándar, donde:

$$L_{eq.codo} = \left(\frac{n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{850}{Re^*} + \frac{0,199}{D^{0,22}} \right) \cdot \frac{\rho}{4 \cdot K} \cdot v^{2-n} \quad (2.27)$$

El modelo obtenido (ecuación 2.27) es considerado como uno de los aporte del trabajo, el cual no ha sido reportado de esta forma por la literatura especializada, donde no se analizan los efectos del régimen de flujo en la longitud equivalente del codo.

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

Para válvulas de compuerta:

$$\Delta p_{loc} = 1,905 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \text{Re}^{*-0,917 \cdot \delta - 1,98} \quad (2.28)$$

Para válvulas de globo:

$$\Delta p_{loc} = 8,266 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \text{Re}^{*-0,610 \cdot \delta - 0,797} \quad (2.29)$$

Donde: δ - posición de apertura de las válvulas; (%).

2.4. Expresiones para la determinación de costos y potencia hidráulica de transporte

Para un sistema de transporte de combustible, es importante considerar la temperatura y presión de operación, la configuración del sistema de impulsión, la longitud y diámetro de la tubería con el costo del material, relacionados estos factores con la velocidad del fluido y sus propiedades físicas y reológicas. El análisis de los costos de operación del sistema de transporte bajo los factores antes mencionados, conduce a la determinación de los parámetros racionales de operación, ya sea, la velocidad racional, el diámetro económico de la tubería o la temperatura racional de transporte, para el caso del trasiego de fluidos de elevada viscosidad como el combustible cubano CM-650.

Son característicos en la formulación del problema de racionalización del transporte de fluidos, el costo atribuible a las tuberías (costos fijos) y el costo energético en cuanto a costos de explotación (costos variables) (Aguirre *et al.*, 1996; Martínez *et al.*, 2007; Hechavarría, 2009). El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante la siguiente ecuación (Laurencio 2010):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3} \quad (2.30)$$

Donde: C_{bom} - costo de bombeo de la instalación; (CUC/año). N_h - potencia hidráulica; (W). t_{el} - tarifa eléctrica; (CUC/ kW·h). t_i - tiempo de trabajo del equipo; (h/año). η_b - rendimiento de la bomba; (adimensional). η_m - rendimiento del motor eléctrico; (adimensional).

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

$$N_h = Q \cdot \Delta p. \quad (2.31)$$

Tomado a:

Q - flujo volumétrico; (m^3/s). Δp - caída de presión; (Pa).

La potencia hidráulica, para el transporte de un fluido pseudoplástico (combustible cubano CM-650), está dada por la combinación de la ecuación 2.21 y la 2.31, donde se obtiene que:

$$N_h = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot Q}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \cdot Q \quad (2.32)$$

En caso de que la tubería no tenga diferencia de nivel entre el punto de carga y de descarga, y el flujo sea considerado isotérmico, la ecuación 2.32 quedaría de la forma siguiente:

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

Mediante las ecuaciones 2.32 y 2.33, reportadas por este trabajo, se determina la potencia que se necesita para transportar un fluido del tipo pseudoplástico, como es el caso del combustible pesado cubano CM-650.

Para el caso del motor de la bomba bajo la acción del momento electromagnético $M > 0$, la potencia consumida se determina por el modelo propuesto por Morera (1993); Vilaragut (2008), siendo:

$$N_m = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.34)$$

Donde: U - tensión eléctrica; (V). I - corriente eléctrica; (A). $\cos \varphi$ - factor de potencia.

La potencia hidráulica útil (ecuación 2.32) resulta menor que la potencia consumida de la red por el motor (ecuación 2.34), por lo que el rendimiento del conjunto bomba-motor queda expresado por la ecuación:

$$\eta_{isnt.} = \frac{\left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot Q}{D} \right)^{n+1} + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \cdot Q}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \quad (2.35)$$

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

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

$$C_F = \frac{C_{tub}^* + C_{mant}}{V_u} \quad (2.36)$$

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

El calentamiento del fluido es el método más utilizado para disminuir la viscosidad del combustible pesado. Para determinar el costo de calentamiento del combustible se propone la ecuación siguiente (Laurencio, 2010):

$$C_{cal} = C_v \cdot \dot{m}_v \cdot t_t \cdot 3600 \quad (2.37)$$

Donde: C_{cal} - costo por calentamiento del combustible; (CUC/año). C_v - costo específico del vapor. (CUC/kg). \dot{m}_v - flujo másico de vapor; (kg/s).

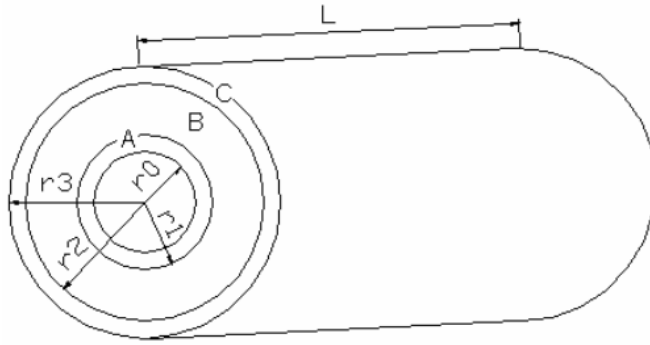
El flujo másico del vapor se obtiene mediante la correlación con el incremento de la temperatura del combustible, a partir de datos experimentales relacionados con el tipo de intercambiador de calor utilizado; los mismos se ajustan a la ecuación 2.38, según Laurencio (2010).

$$\dot{m}_v = k_t \cdot (\Delta t) \quad (2.38)$$

Donde: Δt - diferencia de temperatura del combustible a la entrada y la salida del intercambiador de calor; (°C). k_t - coeficiente de proporcionalidad del intercambiador de calor; el cual se obtiene por experimentación.

2.5. Modelo de la variación de temperatura del fluido en la tubería

Con el objetivo de conocer las variaciones de temperatura durante el transporte del combustible, se realizó la modelación teniendo en cuenta las configuraciones de las tuberías (figura 2.4), las propiedades de los materiales y los fluidos que intervienen en el proceso de transporte.



Donde:

L – longitud de la tubería.

r0 – radio interior de la tubería.

r1 - radio exterior de la tubería.

r2 - radio exterior del aislante.

r3 - radio total.

Figura 2.4. Radios de la sección transversal de la tubería de transporte.

Del balance de energía para la tubería (figura 2.4), se obtienen las ecuaciones de conducción para las tres resistencias.

$$-k_A \cdot r_1 \frac{dt^A}{dr} = r_o q_s; \quad -k_B \cdot r_2 \frac{dt^B}{dr} = r_o q_s; \quad -k_C \cdot r_3 \frac{dt^C}{dr} = r_o q_s. \quad (2.39)$$

Al integrar las ecuaciones anteriores y tomadas como constante a k_A , k_B y k_C , queda que:

$$t_o - t_1 = r_o q_s \left(\frac{\ln \frac{r_1}{r_o}}{k_A} \right); \quad t_1 - t_2 = r_o q_s \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_B} \right); \quad t_2 - t_3 = r_o q_s \left(\frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{k_C} \right). \quad (2.40)$$

Del análisis anterior, el calor transferido del interior al exterior del conducto será:

$$q_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_i - t_e)}{\frac{1}{r_o \cdot h_p} + \frac{1}{k_A} \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_o} \right) + \frac{1}{k_B} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{k_C} \cdot \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) + \frac{1}{r_3 \cdot h_e}}; \quad (W). \quad (2.41)$$

Donde: h_p - coeficiente de convección del combustible; ($W/m^2 \cdot ^\circ C$). h_e - coeficiente de convección del aire (según datos de anexo III, tabla 3); ($W/m^2 \cdot ^\circ C$). t_i - temperatura del fluido en el interior de la tubería; ($^\circ C$). t_e - temperatura exterior del aire; ($^\circ C$). r_0 - radio interior de la tubería; (m). r_1 - radio exterior de la tubería; (m). r_2 - radio exterior del aislante; (m). r_3 - radio exterior del protector del aislamiento; (m). k_A - coeficiente de conductividad térmica de la tubería (anexo III, tabla 2); ($W/m \cdot ^\circ C$). k_B - coeficiente de conductividad térmica del aislante (anexo III, tabla 1) ($W/m \cdot ^\circ C$). k_C - coeficiente de

conductividad térmica del protector del aislamiento (anexo III, tabla 2); (W/m·°C).

El coeficiente de convección para el combustible, tanto en convección forzada como natural, se determina por la expresión propuesta por Laurencio (2010), obtenida a partir de Incropera y De Witt, (2003).

$$h = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D} \quad (2.42)$$

Donde: Pr - número de Prandt; (adimensional). D - diámetro de la tubería; (m).
 k_p - coeficiente de conductividad térmica del petróleo; (W/m·°C).

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

$$\text{Pr} = \frac{\mu_a \cdot c_p}{k} \quad (2.43)$$

Donde: c_p - capacidad calorífica; (J/kg·°C).

Para el aire, el coeficiente de convección, tanto en convección forzada como natural se determina por la expresión (Incropera y De Witt, 2003; Trapeznikov, 2011):

$$h = 0,245 \cdot \text{Re}^{0,6} \cdot \frac{k}{D} \quad (2.44)$$

Donde: D - diámetro exterior del conducto; (m). k - coeficiente de conductividad térmica (anexo III, tabla 3 y tabla 4); (W/m·°C).

Las propiedades termofísicas del aire pueden ser calculadas a través de las ecuaciones empíricas reportadas por Tiwari (2002); Montero (2005) (anexo III-A).

Para determinar la variación de temperatura en el conducto se utiliza la expresión obtenida a partir de Moring (2006), propuesta por Laurencio (2010).

$$t_f - t_i = \frac{q_s}{Q_p \cdot \rho_p \cdot c_{pp}} \quad (2.45)$$

Donde: c_{pp} - capacidad calorífica del combustible; (J/kg·°C). Q_p - flujo volumétrico del combustible; (m³/s). t_f - temperatura final del combustible; (°C). t_i - temperatura inicial del combustible; (°C). L - longitud de la tubería; (m).

Al combinar la ecuación 2.41 con la 2.42 y 2.44, y sustituida en 2.45 se obtiene la ecuación de variación de temperatura aplicable al transporte de combustibles pesados por tuberías.

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_i - t_e)}{Q_p \cdot \rho_p \cdot c_{pp} \left[\frac{1}{r_0 \cdot 0,023 \cdot \text{Re}_p^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D_i} + \frac{1}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \dots + \frac{1}{k_B} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{k_C} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{r_3 \cdot 0,245 \cdot \text{Re}_a^{0,6} \cdot \frac{k_a}{D_e}} \right]} \quad (2.46)$$

El empleo de este modelo (ecuación 2.46), para la simulación del transporte del combustible pesado CM-650, facilita determinar las variaciones de temperaturas del fluido al ser transportado por tuberías, y posibilita conocer si estas variaciones son significativas. La validación del modelo consiste en realizar muestreos de diferencia de temperatura en unidad de longitud en la instalación experimental; para obtener los datos experimentales se contó con instrumentos de medición de alta precisión.

2.6. Técnicas experimentales utilizadas

1- Obtención de los parámetros reológicos.

Los resultados del estudio reológico del combustible CM-650, se obtuvieron en la investigación realizada en la Universidad de Oriente, donde se determinó la relación del esfuerzo de corte (τ) en función del gradiente de velocidad (γ), mediante el uso del viscosímetro rotacional HAAKE VT550 (figura 2.5). El gradiente de velocidad se experimentó 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 temperaturas y condiciones más frecuentes de su transporte por tuberías, según el procedimiento ASTM D 445-96.



Figura 2.5. Viscosímetro rotacional HAAKE VT550.

El sensor utilizado es el MV2 y cuenta con un procedimiento interno que contempla los factores de corrección 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 el aceite de refrigeración A-100 de viscosidad conocida y se observaron resultados satisfactorios, por lo que no se hizo necesaria la variación de las constantes brindadas por el fabricante para el sensor MV2. El control de temperatura se obtuvo con la utilización de un termostato de 0,5 °C de precisión. Para la experimentación se introduce en el interior de la copa la muestra del combustible, la que debe ser representativa de lo que se quiere analizar, así como garantizar un volumen suficiente para cubrir totalmente el sensor, el cual no excede los 80 ml.

Número de corridas experimentales.

Para los niveles de temperaturas programadas, el número de corridas experimentales se determina en correspondencia con lo planteado en la literatura (Suárez, 1998; Turro, 2002; Laurencio y Delgado, 2008b) y los valores prefijados por el viscosímetro; tomándose nueve niveles del gradiente de velocidad y cinco niveles de temperatura, para tres réplicas de cada experimento.

2- Obtención de las principales propiedades termofísicas y químicas.

Los resultados de las principales propiedades termofísicas y químicas del combustible cubano CM-650 se obtuvieron en el laboratorio analítico de la central termoeléctrica de Felton “Lidio Ramón Pérez”. Para la determinación de estas características mediante la experimentación se aplicaron los siguientes procedimientos:

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

3- Obtención del gradiente de presión y de temperatura en tuberías.

Selección de las variables.

En relación con el modelo desarrollado y los planteamientos de Suárez (1998); Turro (2002); Laurencio (2007b); Gardea (2008); Trapeznikov (2011), se determinó que las

pérdidas en las tuberías durante el transporte del combustible crudo cubano dependen fundamentalmente de los siguientes factores:

- Diámetro de la tubería.
- Flujo volumétrico del combustible en la tubería.
- Temperatura media de transporte del combustible.
- Disposición geométrica de la línea de transporte.

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó en la instalación de la sección del primer impulso del combustible en la central termoeléctrica de Felton (ver anexo V). La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos Intouch 9.0 (figura 2.6).

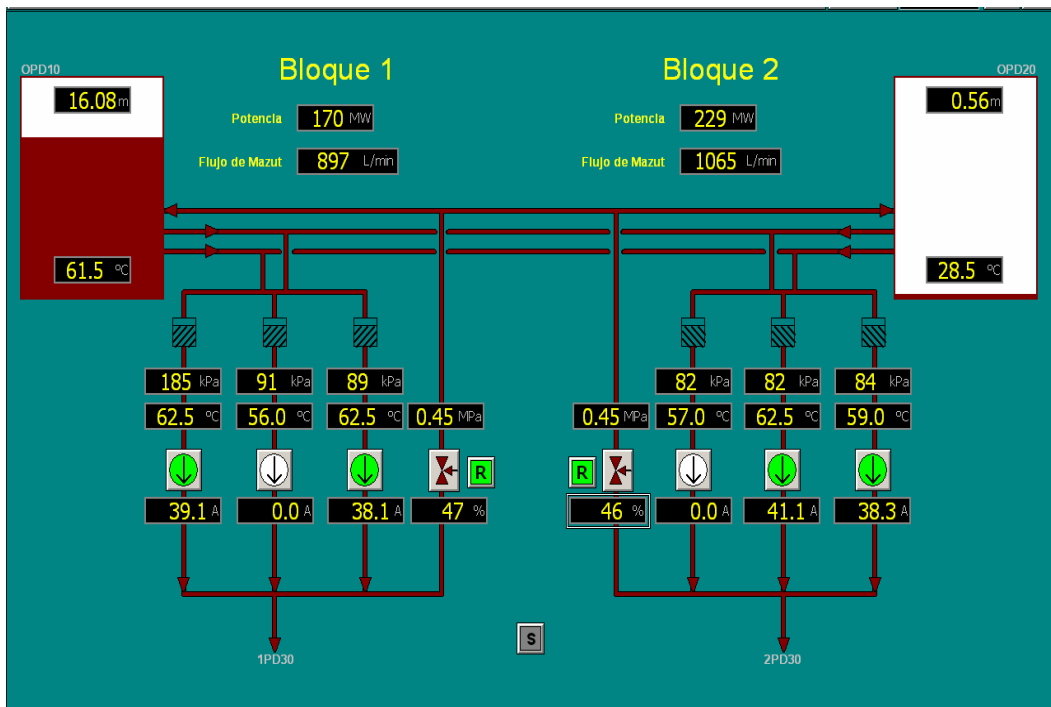


Figura 2.6. Esquema del sistema de suministro de combustible primer impulso de la CTE “Lidio Ramón Pérez” visualizado por el Intouch 9.0.

La investigación de los parámetros de transportación se realizó en el intervalo de temperaturas de 55 a 69 °C, tomadas de forma aleatoria. Los datos para la validación del modelo del gradiente de temperaturas fueron obtenidos para los diámetros 0,2; 0,3 y 0,4 m. La correlación del incremento de la temperatura del combustible, en los intercambiadores de calor de tubo y coraza, se obtuvo a partir de los datos almacenados en el programa de adquisición de datos Intouch 9.0.

Instrumentación utilizada.

La instalación experimental (primer impulso, central termoeléctrica de Felton) cuenta con los siguientes instrumentos (ver certificaciones de calibración en el anexo V):

- Flujómetro ultrasónico.
- Manómetros y vacuómetros.
- Termopares.

Metodología para la toma de datos experimentales.

Mediante la obtención de los gradientes de presión se elaboró el gráfico de la pendiente hidráulica ($i = f(v)$) para el flujo del combustible durante el transporte por tuberías; la misma se determinó por la expresión.

$$\frac{\Delta p}{L} = i \tag{2.47}$$

El factor de fricción quedará determinado por la relación:

$$\lambda = i \cdot \frac{2 \cdot D}{\rho \cdot v^2} \tag{2.48}$$

Con la obtención del gráfico $\lambda = f(Re)$ se estableció la correlación entre el factor de fricción con el aumento del número de Reynolds. El número de Reynolds se determinó en dependencia del modelo reológico del fluido estudiado. La velocidad de transición se

comprueba por la expresión 2.49, obtenida a partir del número de generalizado de Reynolds y el número de Reynolds crítico para fluidos pseudoplásticos.

$$v_{tran} = \left[[2100 + 875 \cdot (1 - n)] \cdot \frac{K}{\rho \cdot D^n \cdot 8^{1-n}} \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right)^n \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (2.49)$$

La ecuación 2.49, se plantea por primera vez en este trabajo, esta se emplea para determinar la velocidad de transición al experimentar las pérdidas de presión en las tuberías con combustible cubano CM-650 con comportamiento pseudoplástico.

Número de corridas experimentales.

El número de corridas experimentales se determinó a partir de la aplicación de un diseño multifactorial. En correspondencia con los niveles determinados de cada variable se establecen como mínimo ocho niveles del flujo volumétrico en dos diámetros de tuberías, para dos réplicas de los experimentos. La variable temperatura se toma según su comportamiento aleatorio en el sistema de transporte.

2.6.1. Procesamiento estadístico de los datos

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

Media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{np} X_i \quad (2.50)$$

Donde: X_i - elementos de la serie. np - número de pruebas.

Desviación media:

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (2.51)$$

Varianza muestral:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (2.52)$$

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:

$$E_p = \left| \frac{X_{exp} - X_{teo}}{X_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (2.53)$$

En la literatura (Torres, 2003) se hace un examen de los errores y sus posibles fuentes, se especifican los valores satisfactorios de desviación en cálculos de ingeniería, pues en cada error influyen los siguientes factores:

- Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser de menor precisión.
- Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- Los valores experimentales son promedios de las réplicas.

2.6.2. Proceso de identificación del modelo del gradiente de presión

Para realizar el ajuste del modelo que estima la caída de presión durante el transporte por tuberías (ecuación 2.21), se seleccionan los parámetros reológicos del combustible cubano CM-650 y sus principales propiedades termofísicas, para la lograr la identificación de los coeficientes del modelo al simular el proceso de transporte por las tuberías.

Según Torres (2003), se hace necesario comparar los valores de las características del

proceso tecnológico real $\left[\left(\frac{dp}{dx} \right)_{exp} \right]$ con las magnitudes calculadas $\left[\left(\frac{dp}{dx} \right)_{teórico} \right]$ por el

modelo propuesto (ecuación 2.21). El mejor ajuste de los factores lo proporciona el juego de coeficientes donde se garantiza el error mínimo. El procedimiento general para la solución de identificación del modelo del gradiente de presión, queda representado por el diagrama que se describe en la figura 2.7.

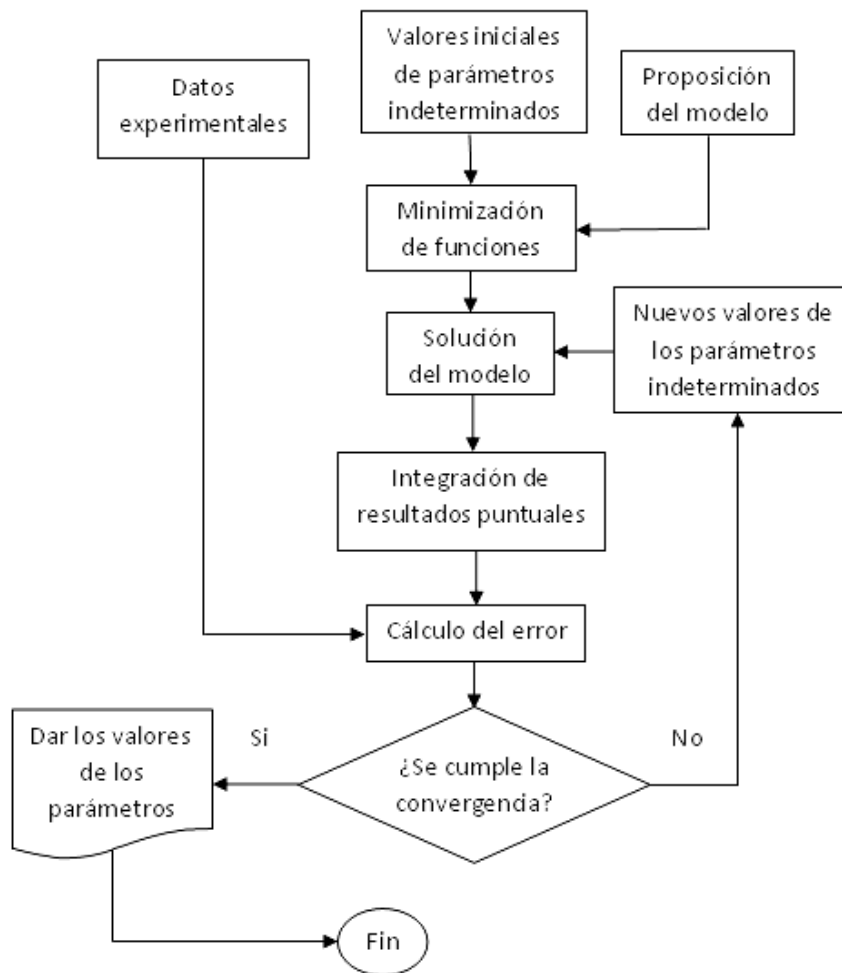


Figura 2.7. Diagrama para la identificación de los parámetros del modelo de gradiente de presión.

En el proceso de identificación del modelo, se varían los parámetros del modelo en dependencia de la medida de diferencia de los componentes, donde se utiliza el procedimiento iterativo a partir del estado de referencia de los datos. El proceso se utiliza para encontrar los valores de los coeficientes característicos del modelo, para el cual se realizó una aplicación de cálculo iterativo a partir de MatLab (Laurencio, 2010).

2.7. Conclusiones del capítulo

- Los modelos matemáticos del gradiente de presión y la potencia hidráulica de transporte por tuberías, obtenidos para la simulación operacional con fluidos pseudoplásticos; se han elaborado tomando en consideración el efecto de mezclado, el cambio de densidad del fluido, el efecto viscoso y el efecto de la energía potencial.
- El sistema de ecuaciones propuesto para la simulación del transporte del combustible pesado cubano y la obtención de parámetros racionales, tiene en consideración los siguientes aspectos:
 - 1- Parámetros de rendimiento de la bomba y el motor.
 - 2- Variación de la velocidad de transportación.
 - 3- Variación del diámetro de la tubería.
 - 4- Cambios de las propiedades del fluido en función de la temperatura.
- Quedan expuestas las técnicas experimentales y los métodos que se emplean en la investigación de las propiedades de transporte del combustible y la obtención de parámetros racionales de flujo por tuberías.

CAPÍTULO 3

**RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENCIÓN DE LOS
PARÁMETROS RACIONALES EN EL TRANSPORTE DEL
COMBUSTIBLE CUBANO CM-650**

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS RACIONALES EN EL TRANSPORTE DEL COMBUSTIBLE CUBANO CM-650

3.1. Introducción

Los estudios experimentales de las propiedades de transporte del combustible cubano CM-650, posibilitan una mejor selección de modelos para la adecuación de los métodos de cálculo. El método de correlación, aplicado en parte de los resultados del trabajo, tiene una aplicabilidad universal para conjuntos de datos de toda clase en procesos físicos. Las correlaciones empíricas tienen implícito el comportamiento real del fenómeno en estudio, este es un método válido independientemente de la complejidad del problema. Sin embargo, su precisión es adecuada si se utilizan dentro del intervalo de aplicación en el cual fueron desarrolladas. Relacionado con este planteamiento, se proponen como objetivos del capítulo:

- Analizar la dependencia entre los factores influyentes en el comportamiento de las propiedades de transporte del combustible cubano CM-650 y su incidencia en el grado de validación de los modelos presentados en el capítulo 2.
- Determinar los parámetros de transporte del combustible CM-650, a partir de la propuesta de un método para la obtención de la temperatura racional de flujo.

3.2. Características fisicoquímicas del combustible cubano CM-650

En la tabla 3.1 se muestran los principales parámetros característicos del combustible con sus valores promedios, obtenidos a partir de los procedimientos planteados en el capítulo 2. Para las muestras analizadas se comprueba en todos los casos que los valores promedios

obtenidos en el laboratorio por periodos de 10 días son representativos de los valores normalizados (anexo IV, tabla 1 y tabla 1B), lo que concuerda con las especificaciones del combustible crudo cubano mejorado 650 según Ochoa (2011). Los resultados mostrados, justifican la utilización de las mediciones de presión y temperaturas registradas en la base de datos para diferentes flujos volumétricos.

Tabla 3.1. Características fisicoquímicas del combustible cubano CM-650.

| No | Parámetros | U/M | Valor medio | Método de ensayo | Valor normalizado |
|----|----------------------------|---------|-------------|------------------|-------------------|
| 1 | Azufre total | % m/m | 7,16 | ASTM D 1 552 | 7,5 máx. |
| 2 | Temperatura de inflamación | °C | 33,11 | ASTM D 93 | ambiente |
| 3 | Temperatura de fluidez | °C | 14,6 | ASTM D 97 | 15 máx. |
| 4 | Carbón conradson | % m/m | 13,05 | ASTM D 189 | 14,0 máx. |
| 5 | Gravedad a 15 °C | °API | 12,75 | ASTM D 1298 | 11 mín. |
| 6 | Valor calórico neto | kcal/kg | 9123 | ASTM D 4868 | 9 100 mín. |
| 7 | Agua por destilación | % v/v | 1,1 | ASTM D 95 | 2,0 máx. |
| 8 | Sedimentos por extracción | % m/m | 0,14 | ASTM D 173 | 0,15 máx. |
| 9 | Cenizas | % m/m | 0,11 | ASTM D 482 | 0,10 máx. |
| 10 | Asfaltenos | % m/m | 15,76 | IP 143 | 18,0 máx. |
| 11 | Vanadio | p.p.m. | 150 | ASTM D 5 863 | 150,0 máx. |
| 12 | Sodio | p.p.m. | 150 | ASTM D 5 863 | 150,0 máx. |
| 13 | Aluminio + silicio | p.p.m. | 80 | ISO 10 478 | 80,0 máx. |

3.2.1. Resultados experimentales de la reología del combustible cubano CM-650

La comprensión de la reología del combustible crudo tiene gran uso práctico en relación con sus parámetros de flujo al transportarlos a través de las tuberías. El interés por el tema va acentuado debido a la creciente utilización de petróleos crudos de alta viscosidad en centrales termoeléctricas y plantas metalúrgicas. El modelado de las propiedades reológicas de estos combustibles ha sido hasta ahora una tarea difícil, principalmente por la variabilidad y la presencia de diversas fases en su composición. La obtención de los

resultados implicó modelos experimentales, además de la obtención de un modelo específico en la interpretación del efecto de la temperatura y el gradiente de velocidad sobre la viscosidad del combustible pesado.

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

Tabla 3.2. Resultados obtenidos del estudio reológico al CM-650.

| N° | Gradiente de velocidad, $\dot{\gamma}$ (1/s) | Esfuerzo de corte, τ (Pa) | | | | |
|----|---|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 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 |

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

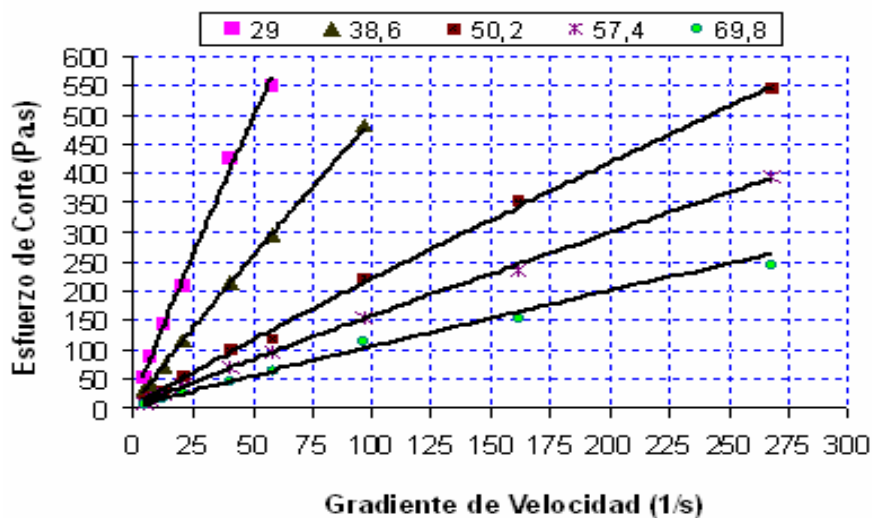


Figura 3.1. Curvas de flujo del combustible cubano CM-650 en función de la temperatura.

En la figura 3.1 se observa que para el rango de temperaturas desde 29 hasta 70 °C, el combustible cubano CM-650 mostró el mejor ajuste para el modelo de fluido pseudoplástico, corroborándose lo planteado por Laurencio (2009a). El comportamiento manifestado, está caracterizado por los parámetros reológicos, índice de consistencia másica (K) e índice de flujo (n). En cuanto a los parámetros reológicos, fue posible identificar la tendencia respecto a la dependencia de cada factor con la temperatura. Los modelos ajustados para cada temperatura se exponen en la tabla 3.3.

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

| Temperatura | Modelo ajustado |
|-------------|---|
| 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 | $\tau_{x,y} = 1,46 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,929}$ |

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

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

| No | Parámetros | Temperatura | | | | |
|----|-------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 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 | 1,46 |
| 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 coeficiente de correlación múltiple (R^2) en todos los casos fue superior a 0,996; por lo que se considera satisfactorio el ajuste de los modelos a los datos experimentales, indicativo de que se experimenta un fluido estable. Con el empleo de los resultados mostrados en la tabla 3.4 y sustituyéndolos en la ecuación 1.3, se graficó el comportamiento de la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad (figura 3.2) a partir de los resultados mostrados en el anexo IV, tabla 2. Los resultados obtenidos posibilitan visualizar el grado de variabilidad de la viscosidad aparente ante variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad, observándose en todo caso un comportamiento no newtoniano.

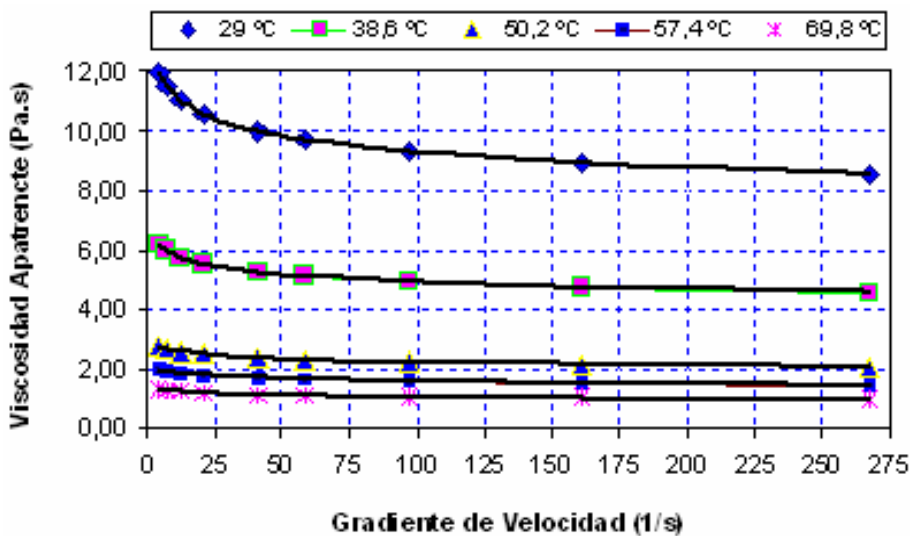


Figura 3.2. Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

En la figura 3.2 se resalta que la viscosidad aparente del combustible cubano CM-650 disminuye de forma potencial con el aumento de la temperatura. En la misma se puede apreciar que para los menores valores del gradiente de velocidad se manifiesta un mayor cambio de la viscosidad, lo que coincide con lo planteado por la literatura (Carpenter, 1986; Tang, 1988; Cárdenas y Fonseca, 2009; Laurencio, 2009a; Trapeznikov, 2011) asociado a cambios de estructuración en el comportamiento de las partículas dispersas en el combustible. Los resultados obtenidos justifican la necesidad de conocer los parámetros reológicos del combustible crudo cubano CM-650 para diseñar y evaluar su sistema de transporte, aspecto muy importante al trabajar con este tipo de fluido.

3.3. Análisis de la influencia de la temperatura en las propiedades del combustible cubano CM-650

Al aumentar la temperatura, se observó que los valores del índice de consistencia másica disminuyeron (figura 3.3), comportamiento similar a los resultados obtenidos por Laurencio y Delgado (2008b) en el estudio de las emulsiones del combustible CM-650 (anexo IV, figura1). El índice de flujo mostró variaciones poco significativas, con el valor promedio de 0,925; corroborándose lo planteado por Branco y Gasparetto (2003); Da Silva *et al.* (2005); Dak *et al.* (2007); Sánchez *et al.* (2008); Laurencio y Delgado (2008b); Andrade *et al.* (2009); Vandresen *et al.* (2009).

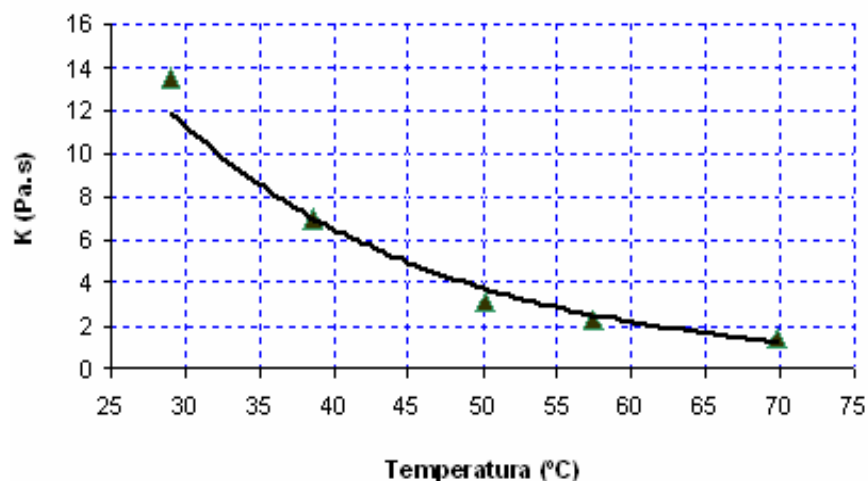


Figura 3.3. Comportamiento de K en función de la temperatura.

Realizando el ajuste del comportamiento del índice de consistencia másica (K) a la ley exponencial, se obtuvo la correlación en función de la temperatura (ecuación 3.1) con un coeficiente de correlación múltiple de 0,97. El grado de adecuación del modelo con los datos experimentales se confirma en el análisis de Fisher donde el valor crítico fue menor que el valor calculado ($F_{crit} < F$) (anexo IV, tabla 3), por lo que la dispersión entre los resultados obtenidos no es significativa. El resultado obtenido (ecuación 3.1) permitió establecer el comportamiento de la viscosidad aparente, a partir de las variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad.

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

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

Al sustituir la ecuación 1.4 y 3.1 en la ecuación 1.3, e incorporando los parámetros reológicos ajustados, se obtuvo el modelo que describe el comportamiento de la viscosidad aparente del combustible CM-650, para variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad; siendo estas las variables con mayor incidencia en los cambios de la viscosidad aparente para un fluido pseudoplástico (Cárdenas y Fonseca, 2009; Laurencio, 2009b).

$$\mu_a = \frac{59,86}{e^{0,056 \cdot t}} \cdot \left(\frac{8,16 \cdot v}{D} \right)^{-0,075} \quad (3.2)$$

Mediante el modelo anterior (ecuación 3.2), es posible definir la viscosidad aparente del combustible cubano CM-650 durante su transporte por tuberías; relacionado con la correcta predicción de la viscosidad al ser un fluido no newtoniano. Su aplicación puede incidir en la correcta descripción del consumo energético de las instalaciones, al conocerse el comportamiento del fluido ante variaciones de la temperatura, la velocidad y el diámetro de la tubería (Laurencio y Delgado, 2008b).

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

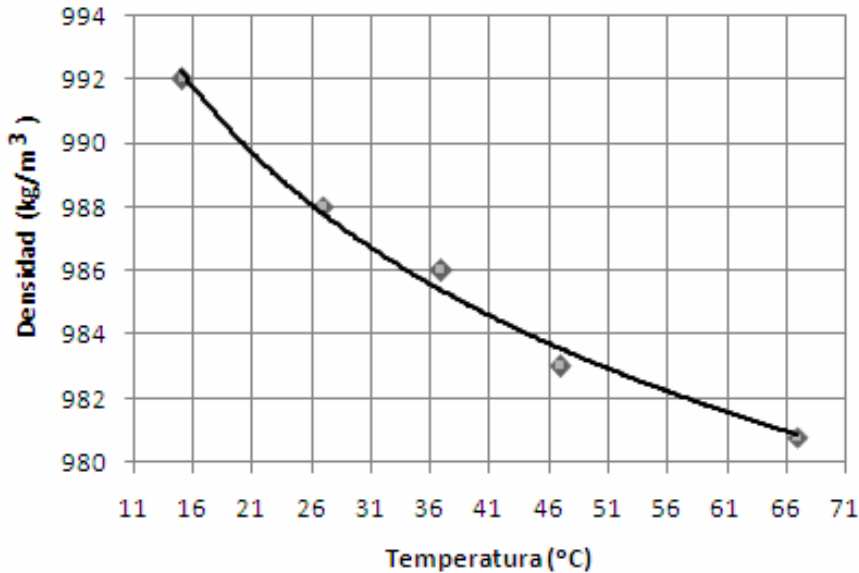


Figura 3.4. Correlación entre la densidad del combustible y la temperatura.

A partir de los resultados mostrados en la figura 3.4, se correlacionó el comportamiento de la densidad del combustible CM-650 en función de la temperatura, determinándose según la ecuación 3.3, obtenida con un coeficiente de correlación múltiple de 0,989; lo que satisface los resultados esperados mediante el análisis de la adecuación del modelo (anexo IV, tabla 4).

$$\rho = -7,62 \cdot \ln(t) + 1012. \quad (3.3)$$

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

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

la tabla 3.6, tomados en la instalación del primer impulso de la central termoeléctrica de Felton “Lidio Ramón Pérez”.

Tabla 3.5. Relación de radios de las tuberías de conducción del combustible CM-650.

| | Diámetro de la tubería (m) | | |
|----------------|-----------------------------------|------------|------------|
| r | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| r ₀ | 0,100 | 0,150 | 0,200 |
| r ₁ | 0,103 | 0,153 | 0,203 |
| r ₂ | 0,128 | 0,178 | 0,228 |
| r ₃ | 0,130 | 0,180 | 0,230 |

Para obtener las variaciones de temperatura, se realizó un muestreo en la instalación, donde se obtuvieron los resultados del gradiente de temperatura para tres flujos volumétricos, en busca de una mayor variabilidad de los datos, los cuales se utilizaron para la determinación del error de predicción del modelo, según se indica en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Comparación de las variaciones de la temperatura en la tubería.

| Q | Diámetros | Longitud | Δt (°C) | | | | Error |
|--------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|
| (m³/s) | (m) | (m) | Teórico | (Exp.)1 | (Exp.)2 | Promedio | (%) |
| 0,015 | 0,4 | 104,73 | 0,44 | 3,80 | 3,50 | 3,65 | 1,17 |
| | 0,3 | 7,45 | 0,04 | 2,50 | 1,90 | 2,20 | 0,79 |
| | 0,2 | 660 | 3,80 | 8,25 | 7,94 | 8,10 | 1,55 |
| | Error promedio | | | | | | 1,17 |
| 0,029 | 0,4 | 104,73 | 0,36 | 3,30 | 2,80 | 3,05 | 0,98 |
| | 0,3 | 7,45 | 0,029 | 1,28 | 1,17 | 1,23 | 0,44 |
| | 0,2 | 660 | 2,68 | 7,22 | 7,30 | 7,26 | 1,66 |
| | Error promedio | | | | | | 1,03 |
| 0,044 | 0,4 | 104,73 | 0,3 | 5,30 | 5,60 | 5,45 | 1,88 |
| | 0,3 | 7,45 | 0,023 | 1,26 | 1,23 | 1,25 | 0,45 |
| | 0,2 | 660 | 2,03 | 7,22 | 6,90 | 7,06 | 1,83 |
| | Error promedio | | | | | | 1,39 |

La tabla 3.6 muestra las diferencias de temperatura para tres diámetros de tuberías y tres flujos volumétricos, con los errores calculados en grados Kelvin (Moring, 2006) y obtenidos los puntos experimentales para dos réplicas. Al comprobar el modelo del gradiente de temperatura en la tubería de transporte del combustible (ecuación 2.46), en ninguno de los casos el error sobrepasó el 1,39 %, lo que explica la proximidad de la simulación con los valores observados según la literatura (Torres, 2003). Los errores están estrechamente relacionados con las condiciones de deterioro de los aislamientos y la influencia de perturbaciones. Los resultados son reafirmados mediante la prueba de Fisher donde $F_{crit} < F$, indicando para todos los casos que los errores no son significativos (anexo IV, tabla 6). Se puede afirmar que la adecuación del modelo propuesto es aceptable para la comprobación y obtención del comportamiento de la temperatura en las tuberías de transporte del combustible cubano crudo mejorado 650.

3.5. Análisis del modelo del gradiente de presión

La determinación de los parámetros indeterminados (a y b) del modelo del gradiente de presión (ecuación 2.21), se realiza a partir de conocer las propiedades reológicas del combustible cubano CM-650, donde se garantiza la adecuación del modelo que describe el proceso de transporte según las características del sistema (anexo V). De ahí que se hace necesario comparar los valores de las simulaciones y del proceso de transporte. Los parámetros de ajuste seleccionados, serán los que garantizan la condición, $error \rightarrow min$.

Los resultados de las pérdidas de carga para la identificación del modelo se experimentaron en una instalación a escala industrial (ver análisis de datos en anexo IV, tabla 7). En la tabla 3.7 aparecen los valores de los datos experimentales, los cuales fueron obtenidos a partir de la relación de pendiente hidráulica y el flujo volumétrico [$i = f(Q)$] para las tuberías de 0,2 y 0,3 m de diámetro; para cada resultado se determinó el factor de fricción y el número generalizado de Reynolds.

Tabla 3.7. Resultados experimentales para la identificación del modelo.

| Nº | <i>D</i> (m) | <i>Q</i> (m ³ /s) | <i>v</i> (m/s) | <i>i</i> (Pa/m) | | <i>i</i> (Pa/m) | | Error | Δi (Pa/m) | Re* |
|----|-----------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|---------|-----------------|----------|-------|----------------------|--------|
| | | | | Exp.1 | Exp.2 | Promedio | Teórico. | | | |
| 1 | 0,2 | 0,005 | 0,16 | 160,43 | 163,83 | 162,13 | 149,02 | 0,09 | 13,11 | 26,73 |
| 2 | | 0,010 | 0,32 | 327,03 | 301,03 | 314,03 | 281,96 | 0,11 | 32,07 | 56,51 |
| 3 | | 0,015 | 0,48 | 462,67 | 450,77 | 456,72 | 409,45 | 0,12 | 47,27 | 87,56 |
| 4 | | 0,020 | 0,64 | 606,13 | 618,09 | 612,11 | 533,51 | 0,15 | 78,60 | 119,46 |
| 5 | | 0,025 | 0,80 | 755,52 | 777,61 | 766,57 | 655,09 | 0,17 | 111,48 | 152,02 |
| 6 | | 0,030 | 0,96 | 883,16 | 913,64 | 898,40 | 774,72 | 0,16 | 123,68 | 185,10 |
| 7 | | 0,040 | 1,27 | 1186,12 | 1192,00 | 1189,06 | 1009,46 | 0,18 | 179,60 | 252,55 |
| 8 | | 0,044 | 1,39 | 1302,30 | 1292,00 | 1297,15 | 1090,45 | 0,19 | 206,70 | 276,50 |
| 1 | 0,3 | 0,005 | 0,07 | 33,86 | 34,79 | 34,33 | 32,44 | 0,06 | 1,88 | 16,17 |
| 2 | | 0,010 | 0,14 | 66,22 | 67,55 | 66,89 | 61,39 | 0,09 | 5,50 | 34,18 |
| 3 | | 0,015 | 0,21 | 99,13 | 103,64 | 101,39 | 89,14 | 0,14 | 12,24 | 52,96 |
| 4 | | 0,020 | 0,28 | 129,94 | 133,75 | 131,85 | 116,16 | 0,14 | 15,69 | 72,26 |
| 5 | | 0,025 | 0,35 | 171,01 | 163,98 | 167,50 | 142,63 | 0,17 | 24,87 | 91,95 |
| 6 | | 0,030 | 0,42 | 191,93 | 198,44 | 195,19 | 168,67 | 0,16 | 26,51 | 111,96 |
| 7 | | 0,040 | 0,57 | 251,15 | 266,22 | 258,69 | 219,78 | 0,18 | 38,91 | 152,76 |
| 8 | | 0,044 | 0,62 | 271,98 | 278,16 | 275,07 | 237,41 | 0,16 | 37,66 | 167,24 |

Para el análisis de los valores de la pendiente hidráulica, se compararon los valores experimentales con los resultados teóricos obtenidos mediante el empleo de la ecuación 2.21, despreciando los efectos de mezclado en el gradiente de presión para el régimen laminar. Los parámetros reológicos, índice de flujo (*n*) e índice de consistencia másica (*K*) fueron escogidos en relación con la temperatura media de cada experimentación. En la figura 3.7 y 3.8, se muestran los resultados de pendiente hidráulica (teórica y experimental) para cada diámetro de tubería examinado, observándose la tendencia a desviaciones entre los modelos presentes en las literaturas (Placencia y Martínez, 2000;

Martínez y Eguez, 2001; Darby, 2001; Hunter, 2007; Gardea, 2008) y los resultados experimentales.

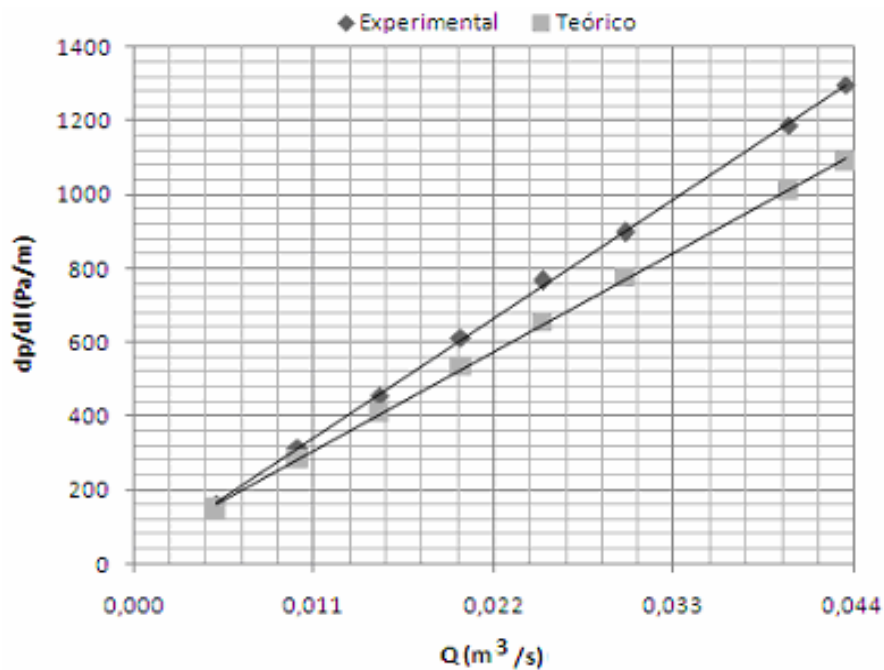


Figura 3.7. Pérdidas específicas de presión en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,2 m de diámetro.

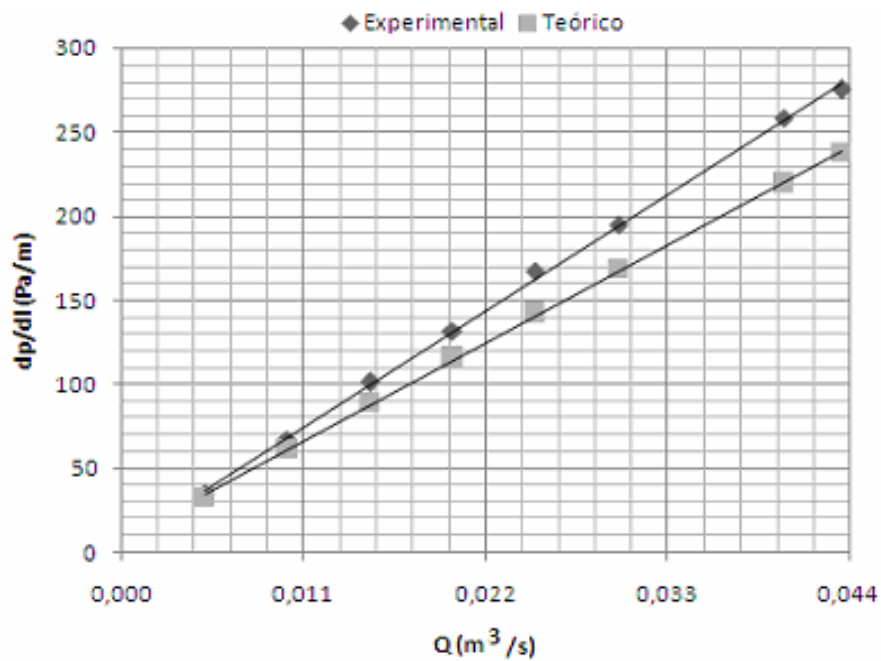


Figura 3.8. Pérdidas específicas de presión en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,3 m de diámetro.

En las figuras 3.7 y 3.8 se observa que durante el transporte del combustible por la tubería, a partir del análisis del error puntual de cada experimento, relacionado con la simulación del modelo para el régimen laminar establecido (sin considerar los efectos de mezclado del fluido), se resalta que a medida que aumenta la velocidad del fluido en la tubería el error tiende a ser mayor; por lo que el modelo utilizado por Placencia y Martínez (2000); Martínez y Eguez (2001); Darby (2001); Hunter (2007); Gardea (2008) no incluye este efecto. El error se le atribuye al mezclado entre capas que manifiesta el combustible al fluir por la tubería; este resultado permite corroborar los planteamientos de las literaturas (Nekrasov, 1968; Vennard y Streeter, 1986; Nekrasov, 1990; Streeter *et al.*, 2000; García, 2003; Mansoori, 2005; Japper *et al.*, 2009) descritas en el capítulo 2.

Resultados similares a los de pérdidas de presión en las tuberías, pueden observarse en las figuras 3.9 y 3.10 para el análisis de la potencia que se necesita para transportar el combustible por las tuberías (ver anexo IV, tabla 8), lo que constituye el indicador económico principal en un sistema de transporte. Los valores teóricos de la potencia hidráulica se determinaron a partir de los resultados de simulación obtenidos por la ecuación 2.32, conociéndose las propiedades reológicas y las condiciones de las tuberías.

Debido a que los errores de las simulaciones (desviaciones entre los valores teóricos y los experimentales) son significativos (anexo IV, tabla 8), se deben minimizar estos para poder tomar decisiones adecuadas en materia de la selección de criterios para la racionalización del consumo de energía en el transporte del combustible pesado.

Como valores promedios de las componentes del modelo (ecuación 2.21), se determinó que para tuberías horizontales en el sistema general de experimentación: el 74,7 % de las pérdidas de presión es debido al efecto viscoso, el 16,9 % al efecto de mezclado y el 8,4 % al cambio de densidad por intercambio térmico, por lo que se hace necesario considerar todos los efectos en el cálculo del gradiente de presión total en las tuberías.

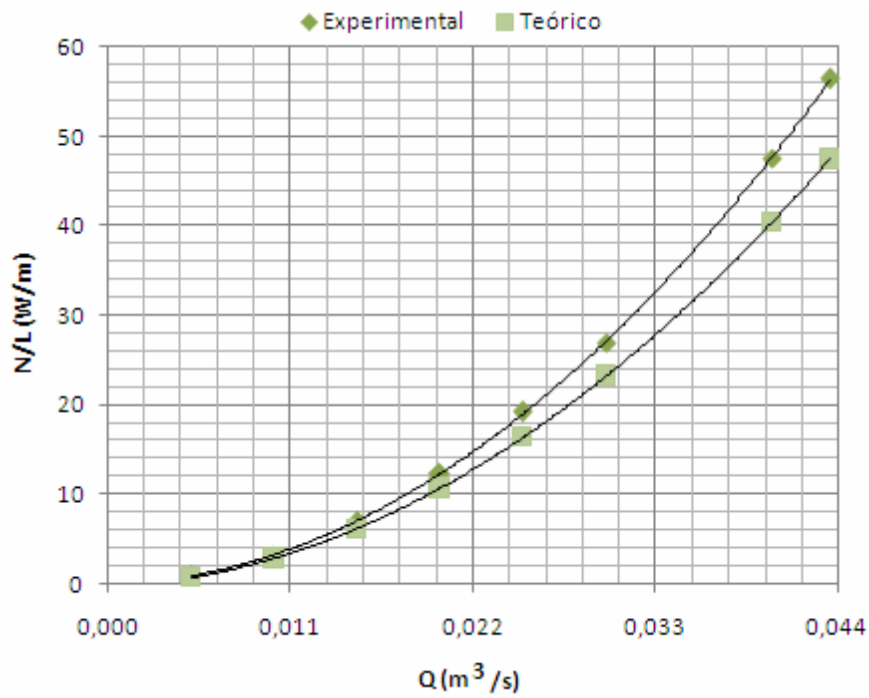


Figura 3.9. Potencia de fluido en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,2 m de diámetro.

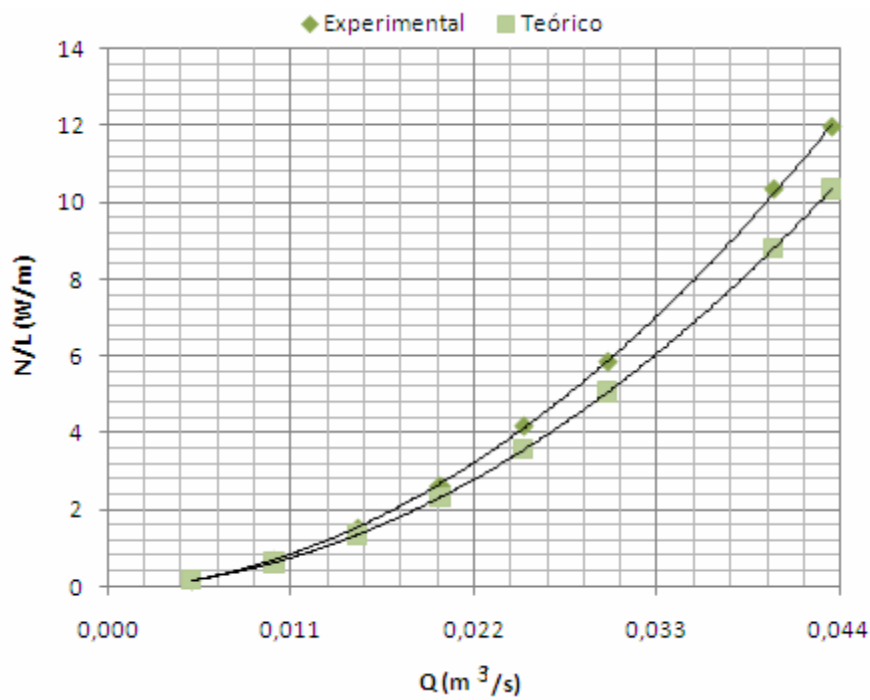


Figura 3.10. Potencia de fluido en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,3 m de diámetro.

3.5.1. Obtención de los parámetros del modelo del gradiente de presión

La representación y ajuste del modelo del gradiente de presión aplicable al proceso de transporte del combustible, parte de la descripción del factor de fricción adicional en la tubería [$\lambda^* = f(Re^*)$] causado por los efectos de mezclado entre las capas adyacentes del fluido al transportarse por las tuberías. A partir de los resultados mostrados en la tabla 3.7, se obtiene la relación de ajuste del modelo, basado en las diferencias encontradas entre los datos experimentales y el error de la simulación con el modelo analizado. Las diferencias antes mencionadas pueden observarse en la figura 3.11.

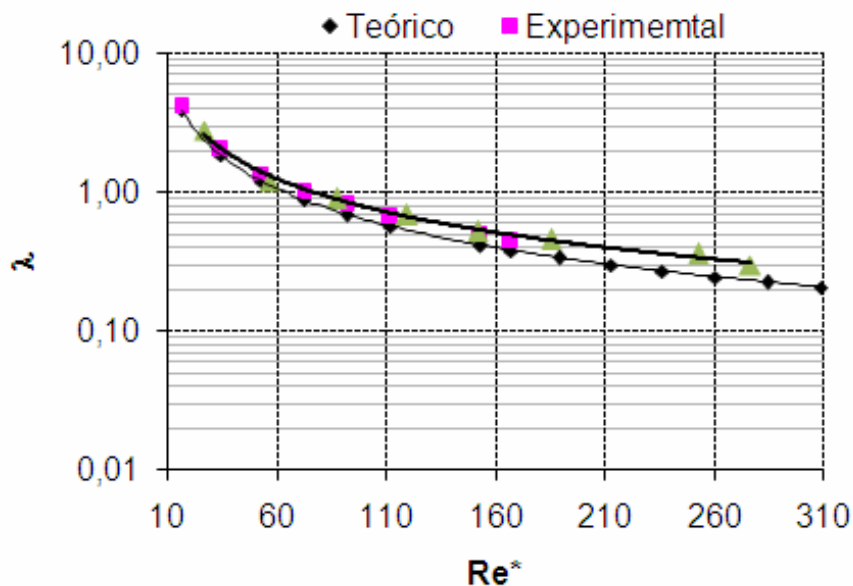


Figura 3.11. Comparación del factor de fricción experimental con los valores teóricos en función del número de Reynolds.

En la figura 3.11, se observó la tendencia del coeficiente de fricción a ser mayor en el caso de flujo con mezcla que en el laminar estable, debido en este caso a que la agitación de las partículas no solo es de naturaleza molecular, por lo que estas no están restringidas a trayectorias paralelas (Vennard y Streeter, 1986; Nekrasov, 1990; Streeter *et al.*, 2000). Se puede afirmar que este fenómeno sigue esta tendencia hasta dar origen al régimen turbulento, efecto similar a los resultados experimentales de Turro (2002) para desechos

lixiviados con comportamiento pseudoplástico (anexo IV, figura 2). Este análisis se realiza para valores de Re^* hasta 300, por ser el rango de operaciones más utilizado. Para la identificación del modelo (ecuación 2.21), el factor de fricción adicional (λ^*) ajustado a partir del error del modelo, se infirió según se indica en la figura 3.12.

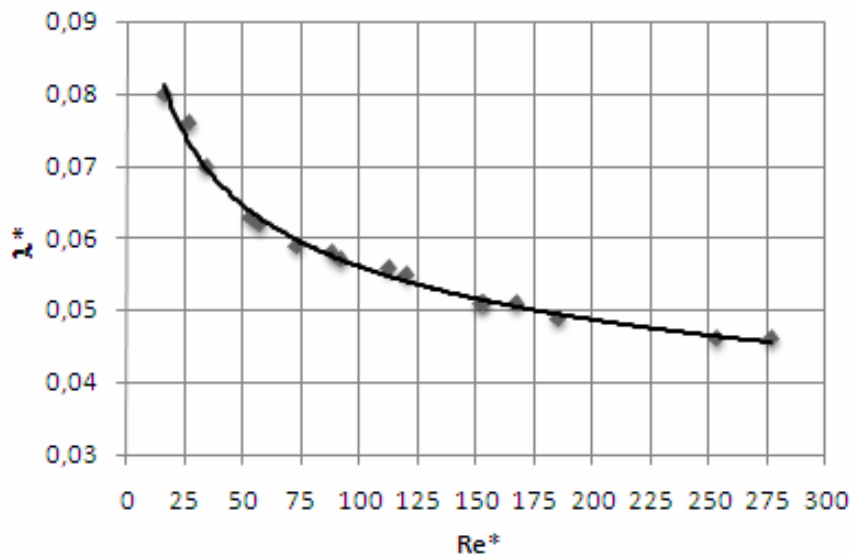


Figura 3.12. Factor de fricción adicional en función del número de Reynolds.

Los valores de los coeficientes obtenidos para el factor de fricción adicional, a partir del análisis de la figura 3.12 se expresa como:

$$\lambda^* = \frac{0,14}{Re^{*0,2}} \quad (3.7)$$

La expresión anterior satisface el ajuste de la ecuación 2.21 para el rango de datos experimentados; los resultados de adecuación del modelo general son reafirmados por razón de la prueba F, donde $F_{crit} < F$ (ver anexo IV, tabla 9a y 9b). Mediante el ajuste de la ecuación 2.21 por la ecuación 3.7 se simula el gradiente de presión con un error promedio de 4,5 %. Los resultados obtenidos son satisfactorios para el cálculo de la variación de presión en las instalaciones industriales donde se transporta por tubería el combustible cubano CM-650, estos constituyen un punto de partida para la validación del

modelo propuesto para otros diámetros de tuberías donde se manifieste intercambio térmico y para el transporte de distintos fluidos con comportamiento pseudoplástico.

3.5.2. Descripción de la influencia de la temperatura sobre las pérdidas de presión

Con la finalidad de describir el efecto de la temperatura sobre el gradiente de presión, en la figura 3.13 se presentan las curvas de simulación de $dp/dL = f(Q)$, para los diámetros de tuberías de 0,2 y 0,3 m y a las temperaturas de 30 y 70 °C.

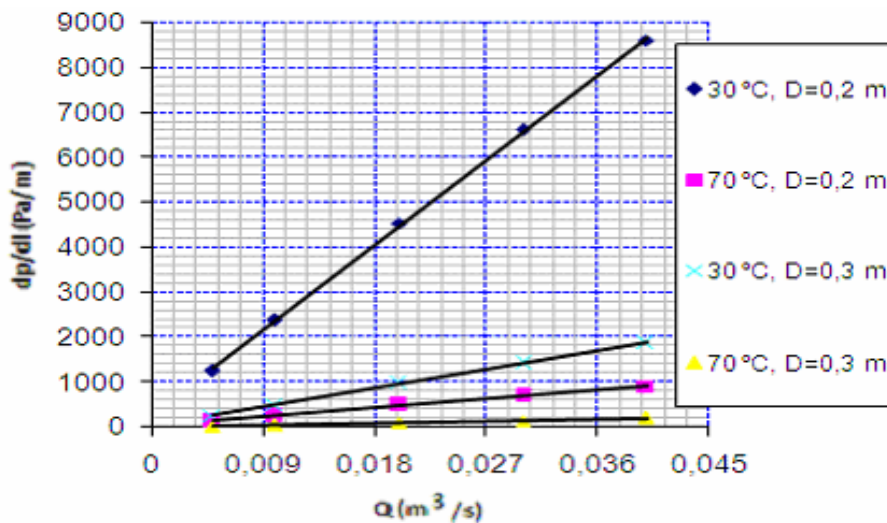


Figura 3.13. Influencia de la temperatura en las pérdidas específicas de presión.

Puede verse en la figura que con el aumento de la temperatura la fluidez del combustible aumenta progresivamente, debido a que la viscosidad aparente del combustible decrece, lo que provoca una disminución apreciable en las pérdidas de presión. En las simulaciones de la figura 3.13 se observa un solo régimen de flujo; la posibilidad de obtener datos en otros regímenes de flujo depende fundamentalmente del aumento de la temperatura y el diámetro de la tubería de transporte.

Es necesario indicar que una de las peculiaridades del flujo de combustible en el régimen laminar, se relaciona con las dimensiones de las tuberías y los elevados valores de viscosidad aparente de este fluido; lo que favorece el mezclado entre capas de flujo y la formación de remolinos. La aparición de estos comportamientos en el flujo de fluidos por

tuberías, considerados por Streeter *et al.* (2000) como el flujo de fluidos reales, se manifiesta con el aumento de las pérdidas de presión en las tuberías, lo que hace evidente considerar estos efectos en los cálculos para la obtención de parámetros racionales en los sistemas de transporte de combustibles de viscosidad elevada (Laurencio *et al.*, 2011).

3.6. Proceso para la obtención de la temperatura racional de transporte del combustible cubano CM-650

Para la racionalización de los parámetros de un sistema de bombeo se seleccionan aquellos valores que garantizan su mayor efectividad con el menor costo posible. Con el aumento de la temperatura del fluido se reduce el costo de bombeo del combustible, pero al mismo tiempo crece el costo para el calentamiento del mismo (Laurencio, 2010).

En la literatura especializada (Skelland, 1970; Díaz y Echavarría, 1999; Laurencio, 2007b; Hechavarría, 2009) se aprecia que existen herramientas que permiten llevar a cabo el estudios de sistemas de transporte de fluidos por tuberías, permitiendo analizar situaciones como operaciones fuera de régimen, predicciones de operaciones en el futuro, determinación de las condiciones óptimas y el análisis de las variables de mayor influencia en el proceso (Hechavarría, 2009).

El análisis de la relación de los costos del proceso de transporte del combustible pesado CM-650, garantiza el establecimiento de las condiciones donde los costos del proceso sean mínimos, es decir, no se establecerían parámetros erróneos que aumentarían el gasto de energía y disminuirían el rendimiento de la instalación. Por consiguiente, resulta evidente la necesidad de implementar un método que garantice aquellos valores de temperatura racional de transporte para gastos de explotación mínimos. Para la determinación del costo total del sistema se parte de la relación de costo simultáneo de bombeo, calentamiento y de las tuberías, siendo esta la función objetivo para la racionalización del sistema de transporte (ecuación 3.8).

3.6.1. Obtención de la temperatura racional de transporte del combustible cubano CM-650, estudio de casos

Para la obtención de la interrelación entre los factores que intervienen en el flujo del combustible pesado CM-650 por tuberías y la selección de los parámetros racionales de transporte, se hace preciso simular las características de los costos de transporte para diferentes temperaturas, para ello se utilizan los modelos propuestos en el capítulo 2. El comportamiento de los costos de operación de los sistemas estudiados, se examinó mediante la interrelación de los parámetros de cada uno de los elementos característicos del transporte. Se parte del conocimiento de los parámetros específicos del costo de la instalación del primer impulso de la central termoeléctrica de Felton y la instalación del puerto de Moa a la empresa Cmdte. Che Guevara, los cuales se exponen en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Relación de parámetros de las instalaciones.

| Instalación de Felton | | |
|------------------------------|-------------------------|--------------|
| Parámetro | Símbolo / unidad | Valor |
| Rendimiento de la bomba | η_{bomba} | 0,74 |
| Rendimiento del motor | η_{motor} | 0,95 |
| Tarifa eléctrica | t_{el} (CUC/kW·h) | 0,09 |
| Costo del vapor | C_v (CUC/kg) | 0,006 |
| Flujo de petróleo | Q (m ³ /s) | 0,03 |
| Tiempo de trabajo | t_t (horas /año) | 8 784 |
| Diámetro de la tubería | D (m) | 0,2 |
| Longitud de la tubería | L (m) | 779 |
| Altura geodésica | ΔZ (m) | 9 |

Tabla 3.8. Relación de parámetros de las instalaciones. (Cont.)

| Instalación del puerto de Moa | | |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------|
| Parámetro | Símbolo / unidad | Valor |
| Rendimiento de la bomba | η_{bomba} | 0,71 |
| Rendimiento del motor | η_{motor} | 0,94 |
| Tarifa eléctrica | t_{el} (CUC/kW.h) | 0,09 |
| Costo del vapor | C_v (CUC/kg) | 0,017 |
| Flujo de petróleo | Q (m ³ /s) | 0,05 |
| Diámetro de la tubería | D (m) | 0,25 |
| Longitud de la tubería | L (m) | 5 100 |
| Tiempo de trabajo | t_t (horas /año) | 4 392 |
| Altura geodésica | ΔZ (m) | 21 |

El costo específico de la tubería con aislamiento (figura 3.15), se determina a partir de la función aproximatoria (ecuación 3.9). Esta función se obtuvo a partir de los precios designados según proveedores de tuberías para transporte de petróleos y sus derivados.

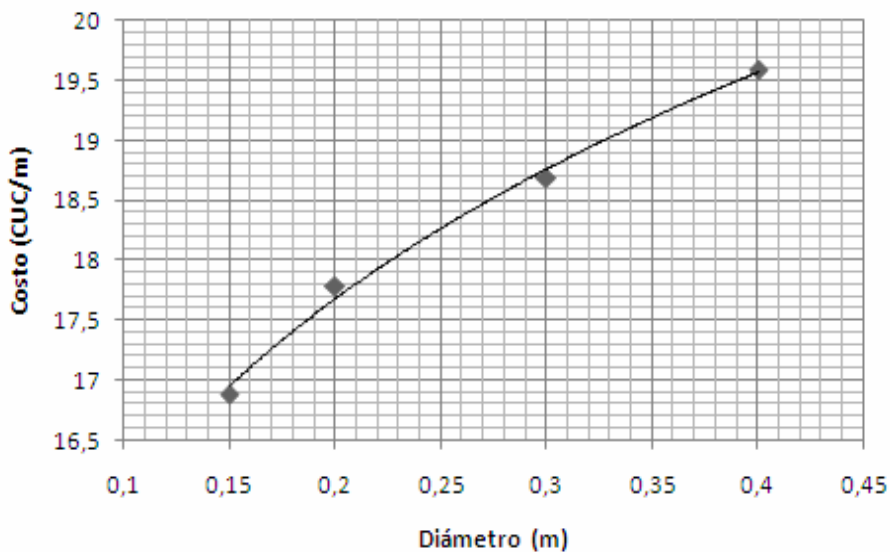


Figura 3.15. Correlación del costo para cada diámetro de tubería.

| Entrada de datos Felton | Entrada de datos Puerto Moa |
|---|---|
| Rango de temperatura de bombeo (°C) 29:1:70 | Rango de temperatura de bombeo (°C) 29:1:70 |
| Temperatura de entrada en el intercambiador de calor (°C) 35 | Temperatura de entrada en el intercambiador de calor (°C) 29 |
| Radios de la tubería(m) [ro r1 r2 r3] [0.1 0.103 0.128 0.130] | Radios de la tubería(m) [ro r1 r2 r3] [0.125 0.128 0.153 0.155] |
| Costo del vapor (CUC/kg) 0.006 | Costo del vapor (CUC/kg) 0.017 |
| Tiempo de trabajo (horas/año) 8784 | Tiempo de trabajo (horas/año) 4392 |
| Índice de flujo 0.925 | Índice de flujo 0.925 |
| Diámetro de tubería (m) 0.2 | Diámetro de tubería (m) 0.25 |
| Flujo volumétrico del petróleo (m ³ /s) 0.03 | Flujo volumétrico del petróleo (m ³ /s) 0.05 |
| Longitud de la tubería (m) 779 | Longitud de la tubería (m) 5100 |
| Altura geodésica (m) 9 | Altura geodésica (m) 21 |
| Tarifa eléctrica (CUC/MW.h) 0.09 | Tarifa eléctrica (CUC/MW.h) 0.09 |
| Rendimiento de la bomba y el motor [Rb Rm] [0.74 0.91] | Rendimiento de la bomba y el motor [Rb Rm] [0.71 0.93] |
| Número de codos 12 | Número de codos 14 |
| Conductividad térmica de la tubería, aislante, protector (W/m.°C) [ka kb kc] [60.5 0.035 237] | Conductividad térmica de la tubería, aislante, protector (W/m.°C) [ka kb kc] [60.5 0.035 237] |
| Velocidad del aire (m/s) 7 | Velocidad del aire (m/s) 7.5 |
| temperatura del aire (°C) 26.2 | temperatura del aire (°C) 27.1 |
| OK Cancel | OK Cancel |

Figura 3.17. Ventanas para la entrada de datos.

La simulación de los costos para la sección del primer impulso en la central termoeléctrica de Felton y para la empresa puerto de Moa conllevó a la obtención de los siguientes resultados, según se muestra en las figuras 3.18 y 3.19 respectivamente.

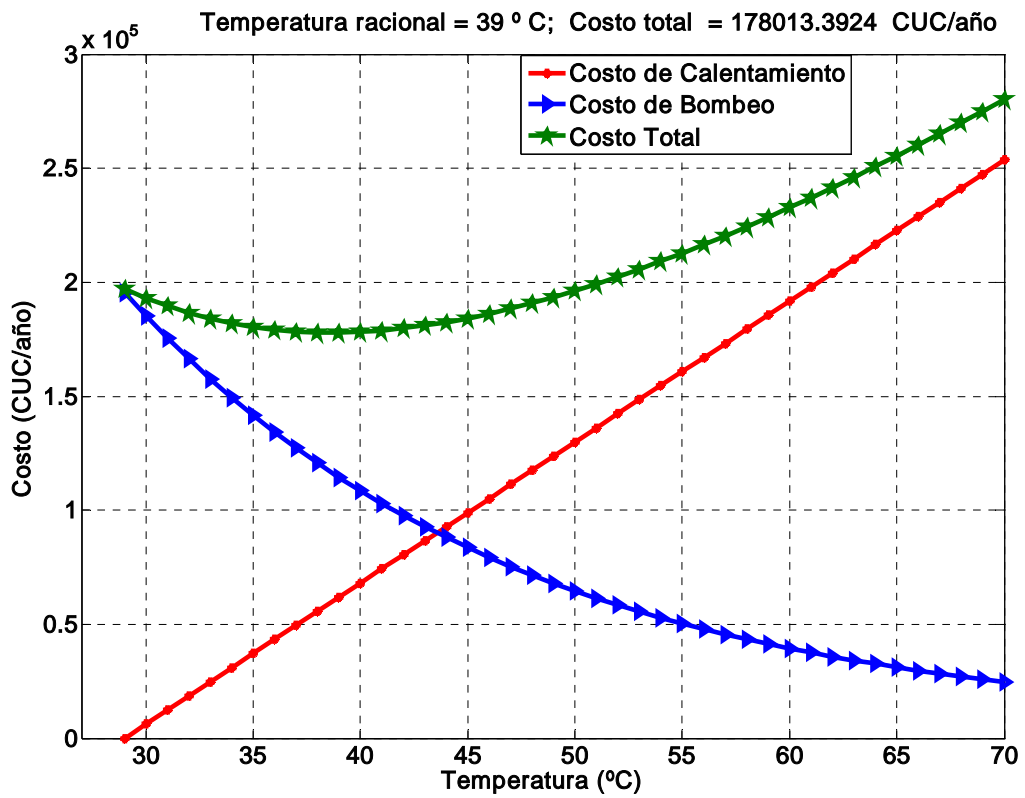


Figura 3.18. Valores racionales para la instalación de primer impulso, Felton.

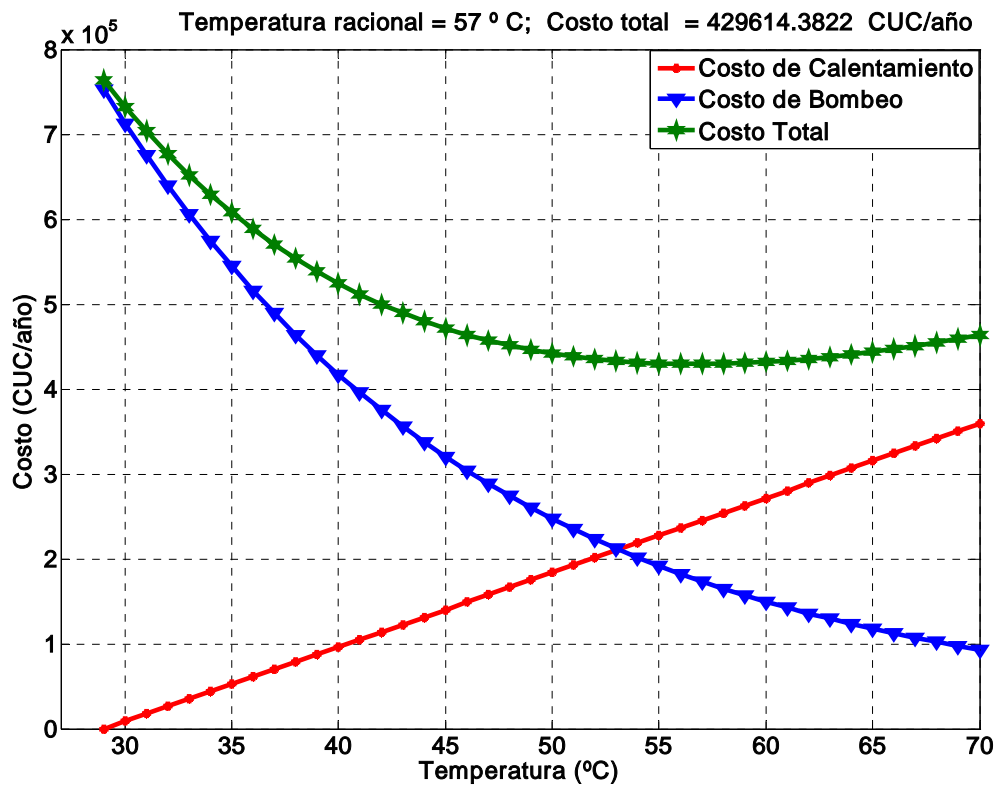


Figura 3.19. Valores racionales para la instalación del puerto de Moa.

En relación con los resultados de simulación de los costos de operación, en las figuras 3.18 y 3.19 se muestra la tendencia decreciente del costo de bombeo al aumentar la temperatura del combustible, comportamiento relacionado con la disminución de la viscosidad aparente del combustible; no siendo así el comportamiento del costo de calentamiento, influenciado por el incremento del consumo de vapor en los intercambiadores de calor.

La combinación del costo de calentamiento con el costo de bombeo, asociados con el costo fijo, permitió la búsqueda de los valores mínimos de costo de operación. Para las instalaciones analizadas se encuentra que la temperatura actual de bombeo del combustible supera a la temperatura racional con 26 °C, superior en la instalación de la sección del primer impulso, en la central termoeléctrica de Felton y 13 °C en la instalación de la empresa puerto de Moa, según se indica en las figuras 3.18 y 3.19.

3.7. Valoración de los impactos de la investigación

En la investigación se demuestra que los métodos existentes, aplicados a la selección de parámetros racionales de transporte de petróleos pesados, no representan la realidad para el diseño de los sistemas de bombeo del combustible cubano CM-650. El análisis del aporte de la investigación se realiza desde varios puntos de vista:

- Económico.
- Social.
- Ambiental.

3.7.1. Análisis económico

La escalada en los precios del petróleo en los últimos tres años se ha incrementado hasta más de \$ 70 y ha alcanzado niveles por encima de los \$ 84 el barril, lo cual ha motivado que muchos países se preocupen nuevamente por hacer un uso racional de la energía.

El uso del combustible cubano CM-650 en la generación de electricidad, ha sido uno de los pasos más importantes del país durante los últimos años en el terreno energético. El

combustible cubano comenzó a utilizarse antes de ejecutarse la modernización de las instalaciones, que entre otras cosas agudizó los problemas de operación para poder quemar el combustible crudo. Al ser un recurso mucho más viscoso que el fuel oil y con una carga importante de azufre, provocó daños severos en los sistemas de combustión e ineficiencias en el transporte; ocasionando pérdidas económicas significativas.

Tras la modernización de las instalaciones de bombeo y centrales termoeléctricas, más de 150 millones de dólares ha dejado de gastar el país durante los últimos años debido al empleo del combustible crudo nacional, lo cual muestra por sí solo la trascendencia del cambio, pese a los inconvenientes que ocasiona operar con un combustible denso y con elevada cantidad de azufre, entre ellos la reducción del ciclo de mantenimiento de las plantas y el consiguiente aumento de las paradas técnicas previstas, lo que aumenta el costo de mantenimiento en un 7,3 %.

La utilización del combustible crudo mejorado 650 en el sector industrial cubano, constituye un impacto positivo desde el punto de vista tecnológico y económico. El establecimiento de parámetros racionales de transporte del crudo nacional, contribuye significativamente al ahorro del consumo energético y al aumento del rendimiento de las instalaciones de transporte por sistemas de tuberías.

Mediante la implementación de los resultados de simulación, se comprobó la posibilidad de ahorro de energía en las instalaciones estudiadas. En el análisis económico se realiza la comparación de los costos de operaciones de transporte del combustible CM-650 para la temperatura actual y la temperatura racional, determinada a partir de los resultados de la investigación; valores mostrados en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Comportamiento de los costos para la temperatura de bombeo actual y racional en las instalaciones en estudio.

| Primer impulso, central termoelectrica de Felton | | | |
|---|-----------------|---------------|---------------|
| Costo (CUC/año) | Racional | Actual | ahorro |
| | t (39 °C) | t (65 °C) | (CUC/año) |
| Costo de bombeo | 114 597,60 | 31 134,21 | -83 463,39 |
| Costo de calentamiento | 61 850,00 | 222 700,00 | 160 850,00 |
| Costo fijo | 1 565,79 | 1565,79 | 0,00 |
| Costo total | 178 013,39 | 25 5400,00 | 77 386,61 |
| Puerto de Moa a empresa Cmdte. Che Guevara | | | |
| Costo (CUC/año) | Racional | Actual | ahorro |
| | t (57 °C) | t (70 °C) | (CUC/año) |
| Costo de bombeo | 173 657,38 | 93343,00 | -80 314,38 |
| Costo de calentamiento | 245 400,00 | 359300,00 | 113 900,00 |
| Costo fijo | 10 557,00 | 10557,00 | 0,00 |
| Costo total | 429 614,38 | 463 200,00 | 33 585,62 |

Por concepto de calentamiento del combustible, el costo de las dos instalaciones alcanza los 582 000,00 CUC/año para mantener una temperatura de 65 y 70 °C. Al establecer la temperatura racional de transporte, el costo total desciende de 718 600,00 a 607 627,77 CUC/año. Por concepto de ahorro, se deja de consumir 110 972,23 CUC/año, lo que evidencia resultados económicos significativos. La implementación de los resultados contribuirá significativamente al ahorro del consumo energético en las instalaciones de transporte del combustible crudo mejorado 650.

3.7.2. Aporte social

Aunque el aporte económico de la introducción del combustible cubano CM-650 es evidente, muchas son las restricciones que impone la sociedad, a causa de sus primeros choques en su empleo. El aporte social está complementado en la producción de un nuevo

conocimiento que genera métodos para la operación eficiente de las instalaciones de bombeo de combustibles crudos pesados, a partir de la obtención de parámetros racionales como la temperatura.

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

Los resultados de la caracterización de las propiedades de transporte del combustible cubano permiten ampliar el conocimiento de sus características químicas, físicas y mecánicas. El método propuesto con principal aplicación en la selección y evaluación de la eficiencia de los sistemas de transporte de combustibles es un aporte novedoso, ya que en la literatura consultada no se estima la potencia de transporte de fluidos según las propiedades reológicas, los efectos de mezclado y de intercambio térmico durante el transporte de fluidos por tuberías.

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

3.7.3. Impacto ambiental

El comportamiento ecológico del transporte eficiente del combustible cubano CM-650, está dado por una serie de actividades e impactos entre los que se pueden resaltar, la identificación de las acciones con repercusión ambiental (vertimiento de combustibles al medio y escape de vapores a elevadas temperaturas) y la identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones (tabla 3.10).

Tabla 3.10. Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.

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

El proceso de caracterización de los impactos ambientales (tabla 3.11) es de suma importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta en el análisis desarrollado (Somoza y García 2002), determinando como repercute sobre el medio cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el proceso de transporte de combustibles pesados por tuberías (Laurencio, 2007b).

Tabla 3.11. Identificación de los impactos ambientales asociados al transporte de combustible pesados por tuberías.

| Acciones o actividades | Factores ambientales | Impactos ambientales |
|-------------------------------|-----------------------------|--|
| Escape de vapores | Aire | Disminución de la calidad del aire |
| Escape de vapores | Hombre | Aumento de enfermedades respiratorias y quemaduras |
| Escape de vapores | Económico | Pérdidas económicas |
| Derrame de combustible | Económico | Pérdidas económicas |
| Derrame de combustible | Suelo | Degradación del suelo |

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

3.8. Conclusiones del capítulo

- Para variaciones de la temperatura en el rango experimentado, el combustible cubano CM-650 presentó un comportamiento del tipo pseudoplástico, notándose poca variabilidad en los resultados del índice de flujo, con el valor promedio de 0,925.
- Con la identificación del modelo matemático para la estimación de las pérdidas de presión en tuberías, se demostró la incidencia en el gradiente de presión total de los efectos simultáneos de esfuerzo viscoso, de mezcla entre capas del fluido y por variación en la densidad del combustible debido al intercambio térmico; haciéndose viable la implementación computacional del método propuesto para el diagnóstico operacional de los sistemas de bombeo del combustible cubano CM-650.
- Se demostró que en las instalaciones analizadas la temperatura actual de bombeo del combustible supera a la temperatura racional con 26 °C, superior en la instalación de la sección del primer impulso de la central termoeléctrica de Felton y 13 °C en la instalación de la empresa puerto de Moa.

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES GENERALES

- Según los reogramas experimentales analizados, el combustible cubano CM-650 presentó un comportamiento del tipo pseudoplástico, notándose poca influencia de las variaciones de temperatura en los valores obtenidos del índice de flujo, con el valor de 0,925 como promedio.
- De acuerdo con los resultados del análisis de las pérdidas de cargas teóricas y experimentales, se mostró que las caídas de presión en las tuberías durante el transporte del combustible cubano CM-650, son influenciadas por la variación de la temperatura del fluido, el rozamiento viscoso y los efectos de mezclado entre capas de flujo. El modelo se complementa con las correlaciones obtenidas de las propiedades del combustible en función de la temperatura y los costos asociados al proceso de transporte.
- Mediante la simulación de los sistemas de transporte de combustible, considerando los efectos reales de flujo por tuberías y la obtención de la temperatura racional, se confirma la posibilidad significativa de reducir el consumo de energía, incidiéndose de forma directa en la disminución de los costos de operación. En los dos casos analizados se evidenció un ahorro monetario de 110 972,23 CUC/año.
- Con la implementación del método propuesto para la obtención de la temperatura racional de transporte del combustible cubano CM-650, se hizo factible la aplicación computacional para la simulación de diferentes condiciones de operación de los sistemas de bombeo, lo que viabiliza el periodo de obtención de los valores de temperatura para costo mínimo de transporte.

RECOMENDACIONES

- Emplear el método propuesto a partir de la aplicación informática en MatLab para estimar las pérdidas de carga en las tuberías, cuando se transporta el combustible crudo cubano en régimen laminar y para obtener los valores de temperatura racional de bombeo en función de las condiciones reales de los sistemas de transporte.
- Considerar en futuras investigaciones, la obtención de las propiedades reológicas de otros petróleos crudos en función de los factores que influyen en su comportamiento físico, lo que permitirá establecer el procedimiento de flujo según sus propiedades de transporte.
- Continuar el estudio y la aplicación de los métodos para la obtención de parámetros racionales de transporte, permitiendo obtener soluciones viables para la optimización del diseño de sistemas de transporte de petróleos bajo criterios técnico-económicos múltiples.
- Validar el modelo de cálculo propuesto de estimación de la potencia necesaria de transporte para otros fluidos con comportamiento pseudoplástico.

REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abebe, A. y Solomatine, D., “Application of global optimization to the design of pipe networks”, Proc. Hydroinformatics 98, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 989-996, 1998.
2. Adhikari, B. y Jindal, V., “Artificial neural; a new tool for prediction of pressure drops of non-newtonian fluid foods through tubes”. Journal of Food Engineering. 21(6) 43-51, 2000.
3. Aguirre, A. Pérez, R. y Martínez, D., Mecánica de Fluidos, Editorial Universo Sur, Cuba 1996.
4. Andrade, R., Torres, R. y Montes, E., “Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpas orgánicas”. Revista de la Facultad de Agronomía. 26(3) 599-612, 2009.
5. ASTM D 287-92, Método estándar para determinar la densidad y gravedad en °API de petróleo crudo y sus productos, 1992.
6. ASTM D 95-83, Método estándar para determinar agua por destilación en productos del petróleo y materiales bituminosos, 1990.
7. ASTM D 129-95, Método estándar para determinar azufre en productos del petróleo (método general de la bomba), 1995.
8. ASTM D 1548-92, Método estándar para la determinación de vanadio en petróleos pesados, 1992.
9. ASTM D 189-95, Método estándar para determinar contenido de carbón conradson en productos del petróleo, 1995.

10. ASTM D 240-92, Método estándar para determinar valor calórico superior, valor calórico inferior y capacidad calorífica, 1992.
11. ASTM D 93-96, Método estándar para determinar punto de inflamación empleando el equipo de Persky-Martens (cápsula cerrada), 1996.
12. Ávila, N., Becerra Lotero, C., Iza Mustafá, Y., Sanz Uribe, J., “Pérdidas de presión en el transporte hidráulico de café por tubería PVC”. *Ciencia y técnica*. 12(4) 23-31, 2007.
13. Ávila, R., *Química aplicada I*, Edición UPC, Primera edición, Barcelona, 247-248, 1995.
14. Balagui, S., Mohammadifar, M. y Zargaraan, A., “Physicochemical and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of iranian astragalus”. *Journal of Food Biophys*. 15(4) 59-71, 2010.
15. Balan, C., Broboana, D., Gheorghiu, E. y Vékás, L. “Rheological characterization of crude oils and complex fluids in electro-magnetic fields”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 42(2) 92-103, 2008. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2009]
16. Bandala, M., *Pérdidas por fricción en fluidos no newtonianos*. Tesis de Especialidad, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001. 71p
17. Banerjee, T., Ma, D. y Das, K., “Non-newtonian liquid flow through globe and gate valves”. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 72(8) 207-211, 1994.
18. Bayvel, L. y Orzechowsky, Z., *Liquid atomization*, Taylor & Francis Editions, 1993.
19. Benítez, I., Álvarez R., escudero, I., Reyes, F. y Rodríguez, A., “Efecto de aditivos nacionales en las propiedades físicas del petróleo crudo cubano”. *Tecnología Química*. 24(1) 43-61, 2004.
20. Bienvenido, J., “Modelo de un sistema de bomba, tanque y red”. *Voluntad Hidráulica*. 3(28) 11-32, 1973.

21. Bourbon, A., Pinheiro, A., Ribeiro, C., Miranda, C., Maia, J., Teixeira, J. y Vicente, A., “Characterization of galactomannans extracted from seeds of *gleditsia triacanthos* and *sophorajaponica* through shear and extensional rheology”. *Journal of Food Hydrocolloid*. 12(4) 184-192, 2010.
22. Branco, I. y Gasparetto, C., “Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices”. *Science and Alimentary Technologic*. 23(1) 166-171, 2003.
23. 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.
24. Cárdenas, J. y Fonseca E., “Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiado desde la relación viscosidad y temperatura”. *EIA*. 12(2) 125-137, 2009.
25. Carpenter, R., “Magnetic treatment for scale, paraffin, carbon in fluids”, Pacific coast oil Show & Conference, EUA, 1986.
26. Cerpa, A. y Garcell, L., “Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions”. *Clays and Clay Minerals*. 47(4) 515-521, 1999.
27. Cerpa, A. y Garcell, L., “Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas”, Evento Metalurgia 98, La Habana, 1998.
28. Cerpa, A., Propiedades de flujo de suspensiones minerales lateríticas. Influencia de la mineralogía y de las propiedades coloide-químicas. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Madrid, España, 1997. 99p
29. Charm, S., “Fundamentals of food engineering”. AVI Publications. 16(2) 54-93, 1971.

30. Chen, T., Mohammed, R., Bailey, A., Luckham, P., y Taylor, S., “Dewatering of crude oil emulsions. Emulsion resolution by the application of an electric field, colloids and surfaces”. *Physicochemical and Engineering Aspects*. 31(8) 273-284, 1994.
31. Chenlo, F., Moreira, R. y Silva, C., “Rheological behavior of aqueous systems of tragacanth and guar gums with storage time”. *Journal of Food Engineering*. 32(6) 107-113, 2010.
32. Chiong, C., Optimización de redes hidráulicas cerradas, Tesis de Doctorado, CIH, ISJAE. La Habana, Cuba, 1985. 100p
33. Colby, R., “Structure and linear viscoelasticity of flexible polymer solutions: comparison of polyelectrolyte and neutral polymer solutions”. *Journal of Rheological*. 24(9) 425-442, 2010.
34. Concha, A., Quiroga, H., Benjumea, P., “Modelamiento de la propagación de los frentes de contaminación generados por el transporte de combustibles por poliducto”. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. 7(1) 73-98, 2006.
35. Costa, N., Fenómenos de transporte, Editorial Alambra S.A., Madrid, España, 1984.
36. Da Silva, F., Guimaraes, D. y Gasparetto, C., “Rheology of acerola juice, effects of concentration and temperature”. *Science and Alimentary Technologic*. 25(1) 121-126, 2005.
37. Dak, M., Verma, R. y Jaaffrey, S., “Effect of temperatures and concentration on rheological properties of kesar”. *Journal of Food Engineering*. 28(4) 1011-1015, 2007.
38. Darby, R., “Take the mystery out of non-newtonian fluids”. *Chemical Engineering*. 9(3) 66-73, 2001.
39. Davidson, R., Nguyen, D. y Chang, C., “A model for the pressure drop in the pipeline for the non-newtonian crude oil”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 43(3) 102-121, 2004. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2009]

40. De la Paz, N., "Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida". Revista Cubana de Farmacia. 36(1) 21-27, 2002.
41. Díaz, A. y Falcón, J., "Estudio reológico de emulsiones de petróleo crudo en agua". Tecnología Química. 24(1) 32-55, 2004. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 9 de marzo de 2007]
42. Díaz, A. y Falcón, J., "Estudio reológico de emulsiones del petróleo crudo cubano en agua". Tecnología Química. 24(2) 45-53, 2004. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 12 de marzo de 2007]
43. Díaz, A., Hechavarría, T., "Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos. Método generalizado. Régimen turbulento". Tecnología Química. 19(3) 22-36, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 9 de marzo de 2007]
44. Díaz, A., Manual de hidráulica aplicada, Ediciones ISPJAM, Santiago de Cuba, 1990.
45. Doron, P. y Barnea, D., "Pressure drop and limit deposit velocity for solid-liquid flow in pipes". Journal of Multiphase Flow. 15(3) 231-243, 1995.
46. Doron, P., Simkhis, M. y Barnea, D., "Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes". Journal of Multiphase Flow. 23(2) 313-323 1997.
47. Falcón, J., Brossard, L., Carbonell, J., Barreda, A. y Pacheco, P., Emulgente para la preparación de emulsiones agua-combustible, Oficina Cubana de la Propiedad Industrial, Patente de Invención, 45, 1995.
48. Falcón, J., Opinión de experto. José Falcón Hernández. Especialidad: Ingeniería Química. Profesor Titular, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Miércoles, 9:00 a.m., 14 de mayo de 2011.
49. Falcón, J., Serret, N. y Carbonell, J., "Effect of pyrolysis products on diesel-fuel oil blends". Tecnología Química. 26(3) 54-63, 2006.

50. Ferro, A., Estudio de la sustitución de las pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente P. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000. 78p
51. Ferro, A., Falcón, J. y Toledo, A., “Estudio de la posibilidad de sustitución de pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente p (Segunda Parte)”. Tecnología Química. 24(1) 33-45, 2004.
52. Foust, S., Wenzel, A., Clump, W. y Andersen, L., Principles of unit operations, John Wiley & Sons, Nueva York, EUA, 541-558, 1980.
53. Frigaard, I, Vinay, G. y Wachs, A., “Model of displacement flow of a crude oil from a pipeline”. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 46(6) 102-121, 2007.
www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2009]
54. Garcell L., Díaz, A. y Surís, G., Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1988.
55. Garcell, L., Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica. Informe investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
56. Garcell, L., Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001.
57. García, E. y Steffe, J., “Comparison of friction factor equations for non-newtonian fluids in pipe flow”. Journal of Food Process Engineering. 2(9) 93-120, 1987.
58. García, F. y Haoulo, M., “Estudio experimental de patrones de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas”, 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Perú, 2007. www.revele.com.ve/programas/ [Consultada: 3 de enero de 2008]

59. García, F., Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, 2003. 121p
60. Gardea, H., “Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos”. Ingeniería, Investigación y Tecnología. 9(2) 17-26, 2008.
61. Gillies, G., Shook, A., y Wilson, K., “An improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow”. Canadian Journal Chemical Engineer. 8(69) 173-178, 1991.
62. Goulter, I. y Bouchart, F., “Reliability-constrained pipe network model”. Journal Hydraulically Engineer. 116(2) 211-229, 1990.
63. Guzmán, D., Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2001. 124p
64. Haoulo, M. y García F., “Efecto de la viscosidad y de la densidad de mezcla en el gradiente de Presión de flujo de gas-líquido en tuberías horizontales”, Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Mérida, Venezuela, 301-306, 2004.
65. Haoulo, M., García, F. y Soto, J., “Gradiente de presión de flujo de gas y líquido en tuberías horizontales considerando el efecto de las propiedades de mezcla”. Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 20(4) 102-113, 2005.
66. Harms, H., Oil tool and method for controlling paraffin deposits in flow lines and downhole Strings. Patent 20 32 005, 1991.
67. Hechavarría, J., Optimización del diseño de redes de distribución de agua bajo criterios técnico-económicos. Tesis de Doctorado, Universidad de Holguín, Cuba, 2009. 105p
68. Hunter, R., Fundamental of colloid science, segunda edición, Oxford University, New York, 2007.

69. Iakovlev, S. y Dalkov, M., "Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales", Gosstroishdat, Moscú, 1961.
70. Ibarz, J., Vélez y Barbosa, G., Transporte de alimentos fluidos a través de tuberías. Tesis de Especialidad, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001. 60p
71. Incropera, F. y De Witt, D., Fundamentals of heat and mass transfer, La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003.
72. IP 143-90, Método estándar para determinar asfaltenos (Insolubles en n-heptano), 1990.
73. Ivenski, B., "Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías", Gosstroishdat, Moscú, 1957.
74. Izquierdo, R., "Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Empresa Cmdte Pedro Soto Alba". Minería y Geología. 2(3) 16-22, 1989.
75. Izquierdo, R., Turro, A. y Nikolaev, A., "Hidrotransporte del mineral laterítico en régimen estructural". Minería y Geología. 18(2) 53-59, 2001.
76. Japper, A., Escudier, P. and Poole, J., "Laminar and turbulent pipe flow of a polymer solution". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 48(5) 43-55, 2009.
www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de octubre de 2009]
77. Khatib, M., "The development of poiseuille flow of a pseudoplastic fluid". The Arabian Journal for Science and Engineering. 31(1) 102-117, 2006.
www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de mayo de 2007]
78. Kunii, O., Fluidization engineering, Second Edition. Butterworth-Heinemann Reed Publishing, Boston, Mass., USA, 1991.
79. Laurencio, H. y Delgado, Y., "Comportamiento reológico de emulsiones de petróleo pesado en agua". Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. 16(2) 244-250, 2008.
<http://redalyc.uaemex.mx>. [Consultada: 15 de diciembre de 2009]

80. Laurencio, H. y Delgado, Y., “Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado”. *Minería y Geología*. 24(2) 56-77, 2008. www.ismm.edu.cu/revistamg. [Consultada: 15 de diciembre de 2009]
81. Laurencio, H. y Turro, A., “Método de cálculo para el transporte de petróleo crudo cubano por tuberías”, IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales, CINAREM, ISMM, Moa, Cuba, 2009.
82. Laurencio, H., “Estudio reológico de petróleo pesado de 11° API”, IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales, CINAREM, ISMM, Moa, Cuba, 2009.
83. Laurencio, H., “Método para la obtención de la temperatura racional de bombeo de petróleos pesados”, ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba, 2010.
84. Laurencio, H., “Modelo de viscosidad del petróleo no newtoniano”, 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Perú, 2008.
85. Laurencio, H., “Propiedades reológicas de emulsiones de petróleo pesado en agua”, ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba, 2007.
86. Laurencio, H., “Propiedades reológicas de petróleo pesado” Convención Internacional de Ingeniería en Petróleo & Gas”, Mérida, Venezuela, 2009.
87. Laurencio, H., Delgado, Y., Falcón, J., “Modelo para la estimación de pérdidas de presión en el transporte de petróleos pesados por tuberías”, V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales, CINAREM, ISMM, Moa, Cuba, 2011.
88. Laurencio, H., Método de cálculo para el transporte de emulsiones de petróleo pesado por tuberías. Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2007.

89. León, A. y Percy, F., “Ahorro de energía por control de velocidad en el sistema de bombeo de Guarapo”. *Centroazucar*. 1(32) 27-38, 2000. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 5 de febrero de 2006]
90. Levenspiel, O., *Engineering flow and heat exchange*. New York, London, Plenum Press, 1986.
91. Liang, C., “Experimental study of the effect of magnetic treatment on crude oil in a pipeline”. *Oil & Gas Storage Transport*. 9(1) 152-178, 1999.
92. Liu, S. y Masliyah, H., “On non-newtonian fluid flow in ducts and porous media”. *Chemical Engineering Science*. 53(6), 175-201, 1998.
93. Loganathan, G., Greene, J. y Ahn, T., “Design heuristic for global minimum cost water distribution systems”. *Journal Water Resource, ASCE*, 121(2) 182-192, 1995.
94. Macedo, C., *Manual de prácticas de operaciones unitarias I*. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2000.
95. Macedo, C., Martínez, J. y Vélez, J., “Diseño, construcción y validación de una unidad piloto para el manejo de fluidos no newtonianos”. *Información Tecnológica*. 12(6) 169-176, 2001.
96. Manals, M. y Falcón, J., “Estudio de la estabilidad de la mezcla diesel-fuel-oil con productos de pirólisis”. *Tecnología química*. 25(2) 53-61, 2005.
97. Mansoori G., *Modeling and prevention of asphaltene and other heavy organic deposition in oil-spe*, Patented 27 070, 2005.
98. Manssur, R. y Rajje, T., “Generalized explicit equation for de friction factor for de newtonian and non newtonian fluids in tooth circular and non circular ducts”. *Chemical Engineer Technique*. 53(4) 89-103, 1988.

99. Martínez, D., Eguez F., Estudio reológico y de flujo para emulsiones de petróleo pesado en agua, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Petroecuador, Informe de investigación, Facultad de Ingeniería Química, 2001.
100. Martínez, J., "Quantifying the economy of water supply looped networks". Journal American Society of Civil Engineers. 22(3) 105-119, 2007.
101. Martínez, P. y Linares, A., "Resistance coefficients for the power-law fluids in laminar flow". Journal of Food Process Engineering. 24(5) 135-144, 2001.
102. Martínez, V., Monteagudo, J. y Jáuregui, S., Mecánica de los fluidos y máquinas de flujo, Editorial Universo Sur, Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2007.
103. Maruska, P. y Rao, B., "Estudio reológico y dieléctricos a los petróleos parafínicos y asfálticos". Fuel Science and Technology. 2(5) 119-168, 1987.
104. 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.
105. 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.
106. Mechetti, M., Fornés, A., Maturano, S. y Zapana, L., "Efecto electrorreológico en crudos argentinos", Congreso Producción 2000 Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú, Argentina, 2000.
107. Mechetti, M., Rodríguez L., Castañeda, M. y Pelaez, C., Efecto electrorreológico en crudos pesados, Informe ICP, Ecopetrol, Argentina, julio, 2001.

108. Méndez, f. y Ojeda, j., “Aplicación de la teoría constructal a la dinámica de fluidos en un sistema capilar”, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, octubre, 2007. www.revele.com.ve/programas/indice/ [Consultada: 3 de enero de 2008]
109. Momemer, B., “El mito de la orimulsión: la valorización del petróleo extrapesado de la faja del Orinoco”. Oil & Gas Journal Latinoamérica. 10(5) 44-56, 2004.
110. Montero, I. Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis de Doctorado, Badajoz, 2005. 262p.
111. Morera M., Accionamiento Eléctrico Automatizado. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1993.
112. Moring, V., Termodinámica, Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba, 2006.
113. Nakayama, T., Niwa, E. y Hamada I., “Pipe transportation of minced fish paste”. Journal of Food Science. 45(4) 844-847, 1980.
114. Nehal, S., Amal, M., Nael, N. y Hussein, K., “Stability and rheology of heavy crude oil in water emulsion stabilized by an anionic-nonionic surfactant mixture”. Petroleum Science and Technology. 17(5) 553-576, 1999.
115. Nekrasov B., Hidráulica. Editorial MIR, Moscú, URSS, 1968.
116. Nekrasov, B., Hidráulica. Editorial MIR, Moscú, Rusia, 1990.
117. Newitt, M., Richardson, F., Abbott, M. y Turtle, B., “Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes”. Transport Institute Chemical Engineer. 33(7) 93-113, 1955.
118. Nikolaev, A., Opinión de experto. Alejandro Nikolaev. Especialidad: Ingeniería en Minas. Profesor Titular, Instituto de Minas de San Petersburgo. Rusia. Lunes, 2:10 p.m., 12 de septiembre de 2011.
119. Oberbremer, A., Muller, R. y Wagner, F., “Aplay microbiol biotechnol”. Journal of Natural Science. 32(4) 485-489, 1990.

120. Ocampo, R., Martínez, M., Tamayo, A. y Alarcón, E., “Emulsiones agua en combustóleo para reducir las emisiones de partículas inquemadas en calderas”, Boletín Instituto de Ingeniería Eléctrica, México, septiembre, 225-231, 1997.
121. Ochoa, O., Procedimiento para el bombeo eficiente de petróleos pesados, Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2011. 85p
122. Om, N., Loginapaulo, V. y Cavado, A., “Composición de los petróleos pesados cubanos”. Oil & Gas Journal Latinoamérica. 10(1) 23-37, 2004.
123. Otero, L., Fenómenos de transporte en metalurgia extractiva, Editorial Alambra, Madrid, España, 1989.
124. Pakrovskaya, I., El transporte hidráulico en la industria minera. Niedra, Moscú, 1985.
125. Pal, R. y Masliyah, J., “Rheology of oil in water emulsions with added solids”. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 68(3) 24-28, 1990.
www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de mayo de 2005]
126. Paul, C., “Effect of chemical structure on the conduction and breakdown of paraffin oil”. Indian Journal Technological. 8(1) 64-78, 1978.
127. Pedroso, I., Turiño, I., Jáuregui, S. y González, G., “Gradiente de velocidad para la transportación de mieles y meladuras en conductos circulares”. Centroazucar, 2(3) 53-68, 2000. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 5 de febrero de 2006]
128. Pelaez, C. y Stachenco, E., “Estudio del efecto del campo magnético en crudos parafínicos por cromatografía de gases de alta resolución”, Ecopetrol-ICP, 1999.
129. Pérez, R., Investigación de los parámetros del transporte hidráulico de las menas y concentrados en flujos de alta concentración. Tesis de Doctorado, URSS, 1979. 95p
130. Perona, P., “An experimental investigation of laminar-turbulent transition in complex fluids”. Journal of Food Engineering. 23(9) 137-145, 2003.
131. Perry, H., Chemical engineers handbook, McGraw Hill Book, New York, 1988.

132. Placencia, A. y Martínez, D., “Formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto y estudio de las pérdidas friccionales en tubería”, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico Petroecuador, Informe de investigación, Quito, Ecuador, 2000.
133. Prieto, L., Análisis del comportamiento de la caída de presión en el eje convectivo del generador de vapor en la unidad # 6 de la CTE “10 de octubre” con la quema del crudo cubano. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Cuba, 2008. 86p
134. Rabinovich, Z., Hidráulica, Editorial MIR, Moscú, URSS, 115-191, 1987.
135. Reid, C. y Sherwood, K., The properties of gases and liquids. Mc. Graw-Hillbook Company, New York, 1966.
136. Risica, D., Barbeta, A., Vischetti, L., Cametti, C. y Dentini, M. “Rheological properties of guar and its methyl, hydroxypropyl and hydroxypropyl-methyl derivatives in semidilute and concentrated aqueous solutions”. Journal of Polymer. 15(1) 1972-1982, 2010.
137. Romo, L., Emulsiones, Editorial Universitaria, Ecuador, 1993.
138. Romo, L., Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua, Petroecuador-ESPE, convenio 96-058, 1998.
139. Roque, D., “Método de recalcu de la característica de funcionamiento de las bombas centrifugas que manipulan soluciones azucaradas”, VI encuentro Nacional de Jefes de Maquinarias, MINAZ, Santa Clara, 1989.
140. 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.
141. Salazar, M., García, G. y Espinosa, P., “Gradiente de presión de un flujo bifásico sólido-líquido de dos regiones en pozos horizontales”. Geotermia. 8(2) 123-136, 2005.
www.revele.com.ve/programas/indice/ [Consultada: 4 de febrero de 2008]
142. Sánchez, C., Oria, R. y Sánchez, A., “Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés”, Simposio Poscosecha, Orihuela, Valencia, España, 2008.

143. Sánchez, G., “Estudio de fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos”. Revista de la Facultad de Ingeniería de Chile. 10(5) 23-34, 2002.
144. Santos, F. y Martín, M., “Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrífuga”. Centro azúcar. 1(3) 58-67, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 4 de junio de 2008]
145. Schramm, L., “Emulsions, fundamentals and applications in the petroleum industry in advances in chemistry”, American Chemical Society, Washington, Series 231, capítulo 4DC, 1992. 139p
146. Skelland, H., Non-newtonian flow and heat transfer, Instituto Cubano del Libro, La Habana, 1970.
147. Somoza, J. y García, A., “Escenarios macroeconómicos a largo plazo del desarrollo energético y su impacto ambiental”, INIE, Octubre, 2002.
148. Steffe, M. y Morgan, G., “Pipeline design and pump selection for non-newtonian fluid Foods”. Food Technology. 11(7) 78-85, 1986.
149. Streeter, V., Benjamin, E. y Bedford, K., Mecánica de fluidos. Novena Edición. McGraw-Hill. Best Seller International, S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 2000.
150. Suárez, M., Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentínico. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1998. 98p
151. Szymula M., Januz, W. y Jablonski, J., “Electrochemical Properties of Asphaltene Particles in Aqueous Solutions”. Dispersion Science and Technology. 21(6) 785-802, 2000.
152. Tang, J. y Li, L., “Magnetic field paraffin control technique”. Oil Drilling Product Technologic. 8(5) 206-215, 1986.
153. Tang, J., “A Preliminary investigation of the use of magnetic treatment technique in oil fields development”. Oil Drilling Product Technologic. 10(2) 153-169, 1988.

154. Tanyimboh, T. y Templeman, A., "A quantified assessment of the relationship between the reliability and entropy of water distribution systems". *Engineer and Optimization*, 33(5) 179-199, 2000.
155. Tejeda, D., Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales, Tesis de ingeniería, Instituto Superior Julio Antonio Mella, 1985.
156. Televantos, Y., Shook, C., Carleton A., y Streat, M., "Flow of slurries of coarse particles at high solids concentrations". *Canadian Journal Chemical Engineer.* 57(6) 255-262, 1979.
157. Tiwari, G., Solar energy. Fundamentals, design, modelling and applications. Alpha Science International, India, 2002.
158. Torres, E., Modelación y simulación del transporte neumático del mineral laterítico. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2003. 98p
159. Trapeznikov, S., Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente. Tesis de Doctorado, Instituto de Minas de San Petersburgos, Rusia, 2011. 95p.
160. Turian, M. y Yuan, F., "Flow of slurries in pipelines". *AIChE Journal.* 23(9) 232-243, 1977.
161. Turiño, I., "Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga". *Centro azúcar.* 3(1) 58-73, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 10 de febrero de 2008]
162. Turro, A., Estudio del hidrot transporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2002. 114p
163. Urakami, K., Magnetization treatment apparatus of fluid. Patent. 4 904 381, 1990.
164. Vandresen, S., Quadri, M., De Souza, J. y Hotza, D., "Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices". *Journal of Food Engineering.* 29(3) 269-274, 2009.
165. Vélez, J., Apuntes de ingeniería de alimentos I. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2003.

166. Vennard, J. y Streeter, V., Elementos de mecánica de los fluidos. Edición Revolucionaria, La habana, Cuba, 1986.
167. Vilaragut M., Máquinas y accionamientos electromecánicos. CIPEL, ISJAE, Conferencias para el doctorado en electromecánica, ISMM, Moa, 2008.
168. Vita, M., Alejandro, M., Arriola, M., Sánchez, M., Manzanares, E., Romo, C. y Yeri, R., “Nueva tecnología para la emulsificación de residuales del petróleo en agua”, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Boletín IIE, 131- 135, México, 2001.
169. Walski, T., “The wrong paradigm. Why water distribution optimization doesn’t work”. Journal Water Resour. 127(4) 203-205, 2001.
170. Wang, M., Permanent-magnet wax-proff device, PATENT 5 024 271, 1991.
171. Wang, B. y Dong, L., Paraffin characteristics of waxy crude oils in China and the methods of paraffin removal and inhibition, SPE 29 954, 1995.
172. Welty, R., Wilson, E. y Wicks, E., Fundamentals of momentum, heat and mass transfer, Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA, 202-219, 1976.
173. Wilson, C., “Evaluation of interfacial friction for pipeline transport models”, Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, U.K., 107-116, 1988.
174. Wojs, K., “Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes”. Journal of non Newtonian fluid mechanise. 48(2) 337-355, 1993.
175. Xu, C. y Goulter, I. “Reliability based optimal design of water distribution networks”, Journal Water Resour. ASCE, 125(6) 352-362, 1999.

ANEXOS

ANEXO I. Modelos de viscosidad y densidad de fluidos

Tabla 1. Ecuaciones de viscosidad de mezcla. (Fuente: Haoulo *et al.*, 2005)

| | |
|--------------------------------|--|
| Bingham (1906) | $\mu_M = \left[\frac{\lambda_L}{\mu_L} + \frac{(1-\lambda_L)}{\mu_G} \right]^{-1}$ |
| Einstein (1909-1911) | $\mu_M = \mu_L (1 + K\lambda_L)$ |
| Hatshek (1928) | $\mu_M = \frac{\mu_L}{1 - \lambda \sqrt{\lambda_L}}$ |
| Taylor (1932) | $\mu_M = \mu_L \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \left(\frac{\mu_G + 0,4 \cdot \mu_L}{\mu_G + \mu_L} \right) \cdot \lambda_L \right)$ |
| Richardson (1933) | $\mu_M = \mu_L \exp(K \cdot \lambda_L)$ |
| McAdams <i>et al.</i> (1942) | $\frac{1}{\mu_M} = \frac{\dot{m}_G}{\mu_G \cdot \dot{m}_M} + \frac{1}{\mu_L} \cdot \left(1 - \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_M} \right)$ |
| Vermeulen (1955) | $\mu_M = \frac{\mu_L}{1 - \lambda_L} \cdot \left[1 + \left(\frac{1,5 \cdot \mu_G \cdot \mu_L}{\mu_L + \mu_G} \right) \right]$ |
| Hoogendoorn (1959) | $\mu_M = \mu_L^{\mu_L} \mu_G^{(1-\mu_L)}$ |
| Cicchitti <i>et al.</i> (1960) | $\mu_M = \mu_G \cdot \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_M} + \mu_L \cdot \left[1 - \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_M} \right]$ |
| Dukler <i>et al.</i> (1964) | $\mu_M = \mu_L \cdot \lambda_L + \mu_G \cdot (1 - \lambda_L)$ |
| Cengel (1967) | $\mu_M = \mu_L (1 + 2,5 \cdot \lambda_L - 11,01 \cdot \lambda_L^2 + 52,62 \cdot \lambda_L^3)$ |
| Soot (1971) | $\mu_M = \mu_L \cdot \left[1 + \lambda \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} - 1 \right) \right]^{\left(\frac{1-\lambda}{\mu} \right)}$ |

ANEXO I, cont. Modelos de viscosidad y densidad de fluidos

Tabla 1, cont. Ecuaciones de viscosidad de mezcla. (**Fuente:** Haoulo *et al.*, 2005),

| | |
|--------------------------|---|
| Oliemans (1976) | $\mu_M = \frac{\mu_L \cdot \lambda_L + \mu_G \cdot (1 - H_L)}{1 - \beta}; \beta = H_L - \lambda_L$ |
| Oglesby (1979) | $\mu_M = \mu_L \exp \left[\left(\frac{\mu_G + 0,4 \cdot \mu_L}{\mu_G + \mu_L} \right) (\lambda_L + \lambda_L^{1,667} + \lambda_L^{1,66}) \right]$ |
| Beattie y Whalley (1982) | $\mu_M = \mu_L \cdot (1 - \beta) \cdot (1 + 2,5 \cdot \beta) + \mu_G \cdot \beta; \beta = \frac{\rho_L x}{\rho_L x + \rho_G (1 - x)}$ |
| Forrar y Bories (1994) | $\mu_M = \lambda_L \cdot \mu_L + (1 - \lambda_L) \cdot \mu_G + 2\sqrt{\lambda_L (1 - \lambda_L)} \cdot \mu_L \cdot \mu_G$ |

Tabla 2. Ecuaciones de densidad de mezcla (**Fuente:** Haoulo *et al.*, 2005).

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

ANEXO I-A: Desarrollo de modelo del gradiente de presión por cambio de densidad

Como; $\rho = \frac{\dot{m}}{v \cdot A}$ y $v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A}$

Partiendo de la componente de ecuación 2.5, se tiene:

$$\rho \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} = \frac{\dot{m}}{v \cdot A} \cdot v \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \right) \quad (4)$$

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_a = \frac{\dot{m}}{A} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \right) \quad (5)$$

Tomando variable a la densidad queda:

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_a = \left(\frac{\dot{m}}{A} \right)^2 \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (6)$$

Sustituyendo el flujo másico ($\dot{m} = A \cdot \rho \cdot v$) se obtiene:

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_a = \left(\frac{A \cdot \rho \cdot v}{A} \right)^2 \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (7)$$

Simplificando la ecuación 7, queda:

$$dp = v^2 \cdot d\rho \quad (8)$$

Integrando la ecuación 8:

$$\int_{p_i}^{p_f} dp = v^2 \cdot \int_{\rho_i}^{\rho_f} d\rho \quad (9)$$

Donde se obtiene que:

$$\Delta p = v^2 \cdot (\rho_f - \rho_i) \quad (10)$$

ANEXO II: Modelos reológicos de fluidos

Tabla 1. Clasificación y modelos reológicos de fluidos (Fuente: Laurencio., 2007b).

| | Materiales ideales | | Semioplasticos | | Plásticos | | | Dilatantes | |
|---|------------------------------------|--|--|--|---|--|--|--------------|--|
| | Newton | Ostwald | Stokes - Dry | Bingham | Casson | Otros | Ostwald | | |
| Comportamiento al flujo $\tau = f(\dot{\gamma})$ | | | | | | | | | |
| Características $\tau = f(\dot{\gamma})$ | $\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta}$ | $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ $n > 1$ | $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$ | $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$ | $\dot{\gamma} = \frac{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2}{\eta_c}$ | $\dot{\gamma} = K(\tau - \tau_0)^n$ $n > 1$ | $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ $n > 1$ | | |
| Viscosidad $\eta = f(\tau)$ | $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ | | | $\mu = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}}$ | $\eta_c = \frac{\dot{\gamma}}{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2}$ | | | | |
| Límite de fluencia τ_y | 0 | 0 | 0 | $\tau_y = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$ | $\tau_c = (\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2$ | | | 0 | |
| Viscosidad Límite $\eta(\dot{\gamma} = 0)$ | $\eta = \eta$ | $\eta_0 = \infty$ | $\eta_0 = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$ | $\mu_0 = \infty$ | $\eta_0 = \infty$ | $\eta_0 = \infty$ | | $\eta_0 = 0$ | |
| Representación logarítmica $\log \eta = f(\log \dot{\gamma})$ | | | | | | | | | |

ANEXO III: Propiedades termofísicas

Tabla 1. Propiedades termofísicas de aislamientos (**Fuente:** Incropera y De Witt, 2003).

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

Tabla 2. Propiedades termofísicas de metales (**Fuente:** Incropera y De Witt, 2003).

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

Tabla 3. Propiedades termofísicas del aire (**Fuente:** Incropera y De Witt, 2003).

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

ANEXO III-A: Propiedades termofísicas del aire

Estas propiedades son necesarias para el cálculo del intercambio de calor durante el transporte del combustible por tuberías, las mismas pueden ser determinadas a través de las ecuaciones empíricas reportadas por Tiwari (2002) y Montero (2005)

$$k = 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot t_p \quad (1.1)$$

$$\rho = \frac{353,44}{t_p + 273,15} \quad (1.2)$$

$$C_p = 999,2 + 0,1434 \cdot t_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot t_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot t_p^3 \quad (1.3)$$

$$\mu = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot t_p \quad (1.4)$$

Siendo: t_p – temperatura pelicular; (°C).

$$t_p = \frac{t_s + t_a}{2} \quad (1.5)$$

Donde: k - coeficiente de conductividad térmica del aire; (W/m·°C).

ρ - densidad del aire; (kg/m³).

c_p - capacidad calorífica del aire a presión constante; (J/kg·°C).

μ - coeficiente dinámico de viscosidad del aire; (Pa·s).

t_a - temperatura del aire; (°C).

t_s - temperatura de la superficie; (°C).

ANEXO IV: Análisis de datos

Tabla 1. Muestras del combustible cubano CM-650 por tiempo decenal, Felton.

| No | Parámetros | U/M | Enero | | | Febrero | | | Marzo | | |
|----|----------------------------|----------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | |
| 1 | Azufre total | % m/m | 6,9 | 7,2 | 7,5 | 7,1 | 7,3 | 6,9 | 7,6 | 7,137 | 6,9 |
| 2 | Temperatura de inflamación | °C | 33 | 33 | 32 | 33 | 34 | 32 | 33 | 32 | 33 |
| 3 | Temperatura de fluidez | °C | 16,50 | 14,90 | 15,50 | 14,63 | 14,13 | 13,63 | 13,13 | 12,63 | 12,13 |
| 4 | Carbón conradson | % m/m | 11,55 | 11,64 | 11,48 | 11,76 | 12,08 | 12,22 | 12,46 | 12,58 | 13,04 |
| 5 | Gravedad a 15 °C | °API | 13,3 | 13,4 | 12,8 | 12,5 | 12,8 | 12,6 | 12,5 | 12,9 | 12,9 |
| 7 | Agua por destilación | % v/v | 0,9 | 0,9 | 1,6 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1 | 0,6 | 0,8 |
| 10 | Asfaltenos | % m/m | 15,27 | 15,34 | 15,23 | 16,84 | 17,09 | 15,21 | 17,21 | 16,7 | 16,54 |

| No | Abril | | | Mayo | | | Junio | | | Promedio | Varianza |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|----------|
| | | | | | | | | | | | |
| 1 | 7,3 | 6,8 | 7,0 | 7,2 | 6,8 | 7,4 | 7,1 | 7,6 | 7,2 | 7,163968 | 0,064584 |
| 2 | 34 | 33 | 35 | 32 | 34 | 32 | 36 | 32 | 33 | 33,111111 | 1,281046 |
| 3 | 14,63 | 15,13 | 15,63 | 14,13 | 15,63 | 13,13 | 16,63 | 15,13 | 15,63 | 14,60556 | 1,649575 |
| 4 | 15,96 | 14,96 | 13,45 | 13,9 | 12,8 | 12,42 | 15,7 | 12,77 | 14,15 | 13,05167 | 1,901768 |
| 5 | 12,1 | 12,8 | 12,6 | 12,5 | 12,9 | 12,7 | 12,7 | 12,9 | 12,6 | 12,75 | 0,088529 |
| 7 | 1,2 | 1 | 1,3 | 0,9 | 0,5 | 1 | 1,8 | 1,4 | 1,3 | 1,066667 | 0,105882 |
| 10 | 15,19 | 16,4 | 15,43 | 16,65 | 14,5 | 13,78 | 15,69 | 14,56 | 16,23 | 15,76833 | 0,965544 |

Tabla 1.B. Resumen estadístico del análisis de muestras de combustible.

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 10532,8667 | 6 | 1755,47778 | 2028,80791 | 2,655E-117 | 2,17566054 |
| Dentro de los grupos | 102,967784 | 119 | 0,8652755 | | | |
| Total | 10635,8345 | 125 | | | | |

ANEXO IV, cont. Análisis de datos

Tabla 2. Comportamiento de la viscosidad aparente del combustible pesado CM-650.

| N° | 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 |

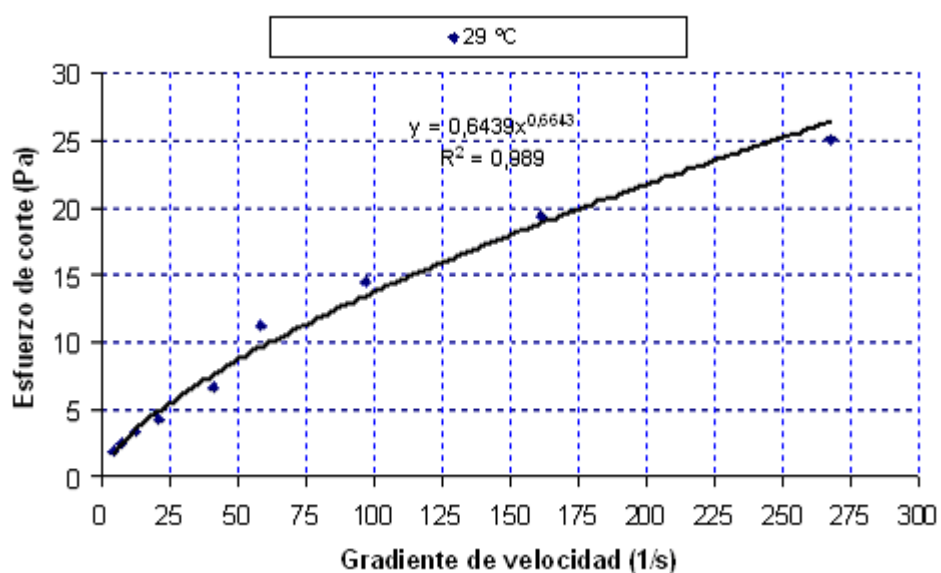


Figura 1: Comportamiento reológico de la emulsión de combustible crudo CM-650.

Fuente: Laurencio (2007b).

ANEXO IV, cont. Análisis de datos

Tabla 3. Análisis del índice de consistencia másica experimental y del modelo para el combustible cubano CM-650.

| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | | |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| Fila 1 | 2 | 25,48538799 | 12,742694 | 1,29703552 | | |
| Fila 2 | 2 | 13,89443622 | 6,947218108 | 0,00557951 | | |
| Fila 3 | 2 | 6,770003705 | 3,385001853 | 0,16565981 | | |
| Fila 4 | 2 | 4,68276625 | 2,341383125 | 0,02869599 | | |
| Fila 5 | 2 | 2,693653585 | 1,346826793 | 0,02494181 | | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
| Entre grupos | 172,2827694 | 4 | 43,07069235 | 141,501855 | 2,495E-05 | 5,19216 |
| Dentro de los grupos | 1,521912645 | 5 | 0,304382529 | | | |
| Total | 173,804682 | 9 | | | | |

Tabla 4: Resumen estadístico del análisis del modelo de la densidad en función de la temperatura.

| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | | |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| Fila 1 | 2 | 1983,35816 | 991,679079 | 0,20598048 | | |
| Fila 2 | 2 | 1974,87781 | 987,438907 | 0,62965175 | | |
| Fila 3 | 2 | 1970,47614 | 985,23807 | 1,16107571 | | |
| Fila 4 | 2 | 1965,65263 | 982,826317 | 0,06033125 | | |
| Fila 5 | 2 | 1960,75015 | 980,375075 | 0,36112168 | | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
| Entre grupos | 150,843508 | 4 | 37,7108769 | 77,974293 | 0,000108 | 5,192167 |
| Dentro de los grupos | 2,41816087 | 5 | 0,48363217 | | | |
| Total | 153,261668 | 9 | | | | |

ANEXO IV, cont. Análisis de datos

Tabla 5: Resumen estadístico del análisis del modelo de la capacidad calorífica en función de la temperatura.

| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | | |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| Fila 1 | 2 | 3498 | 1749 | 162 | | |
| Fila 2 | 2 | 3634,6 | 1817,3 | 137,78 | | |
| Fila 3 | 2 | 3792,2 | 1896,1 | 456,02 | | |
| Fila 4 | 2 | 4031,8 | 2015,9 | 729,62 | | |
| Fila 5 | 2 | 4155,4 | 2077,7 | 44,18 | | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
| Entre grupos | 148076,8 | 4 | 37019,2 | 121,0094142 | 3,67243E-05 | 5,1921677 |
| Dentro de los grupos | 1529,6 | 5 | 305,92 | | | |
| Total | 149606,4 | 9 | | | | |

Tabla 6: Resumen estadístico del análisis de la variación de a temperatura.

| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | | |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| Fila 1 | 3 | 826,74 | 275,58 | 3,4572 | | |
| Fila 2 | 3 | 823,435 | 274,478333 | 1,65240833 | | |
| Fila 3 | 3 | 838,99 | 279,663333 | 6,17303333 | | |
| Fila 4 | 3 | 825,46 | 275,153333 | 2,47453333 | | |
| Fila 5 | 3 | 821,479 | 273,826333 | 0,47983033 | | |
| Fila 6 | 3 | 836,2 | 278,733333 | 6,99373333 | | |
| Fila 7 | 3 | 830,2 | 276,733333 | 8,86333333 | | |
| Fila 8 | 3 | 821,513 | 273,837667 | 0,49798633 | | |
| Fila 9 | 3 | 835,15 | 278,383333 | 8,45923333 | | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
| Entre grupos | 117,252771 | 8 | 14,6565964 | 3,37784903 | 0,0152106 | 2,510157 |
| Dentro de los grupos | 78,1025833 | 18 | 4,33903241 | | | |
| Total | 195,355355 | 26 | | | | |

ANEXO IV, cont. Análisis de datos

Tabla 7. Resumen estadístico del análisis de pérdida de carga.

| | <i>Variable 1</i> | <i>Variable 2</i> |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Media | 431,16125 | 434,71875 |
| Varianza | 161917,6582 | 163830,8582 |
| Observaciones | 16 | 16 |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 30 | |
| Estadístico t | -0,02493238 | |
| P(T<=t) una cola | 0,490137005 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1,697260851 | |
| P(T<=t) dos colas | 0,980274011 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2,042272449 | |

Tabla 8. Variación de potencia del fluido, teórica y experimental.

| <i>D</i> (m) | <i>Q</i> (m ³ /s) | <i>i</i> (Pa/m) | | <i>N</i> (W/m) | | Error |
|-----------------|------------------------------|-----------------|---------|----------------|-------|-------|
| | | Exp.pro | Teó. | Exp. | Teór. | |
| 0,2 | 0,005 | 162,13 | 149,02 | 0,81 | 0,75 | 0,08 |
| | 0,010 | 314,03 | 281,96 | 3,14 | 2,82 | 0,10 |
| | 0,015 | 456,72 | 409,45 | 6,85 | 6,14 | 0,10 |
| | 0,020 | 612,11 | 533,51 | 12,24 | 10,67 | 0,13 |
| | 0,025 | 766,57 | 655,09 | 19,16 | 16,38 | 0,15 |
| | 0,030 | 898,4 | 774,72 | 26,95 | 23,24 | 0,14 |
| | 0,040 | 1189,06 | 1009,46 | 47,56 | 40,38 | 0,15 |
| | 0,044 | 1297,15 | 1090,45 | 56,43 | 47,43 | 0,16 |
| 0,3 | 0,005 | 34,33 | 32,44 | 0,17 | 0,16 | 0,06 |
| | 0,010 | 66,89 | 61,39 | 0,67 | 0,61 | 0,08 |
| | 0,015 | 101,39 | 89,14 | 1,52 | 1,34 | 0,12 |
| | 0,020 | 131,85 | 116,16 | 2,64 | 2,32 | 0,12 |
| | 0,025 | 167,5 | 142,63 | 4,19 | 3,57 | 0,15 |
| | 0,030 | 195,19 | 168,67 | 5,86 | 5,06 | 0,14 |
| | 0,040 | 258,69 | 219,78 | 10,35 | 8,79 | 0,15 |
| | 0,044 | 275,07 | 237,41 | 11,97 | 10,33 | 0,14 |

ANEXO IV, cont. Análisis de datos

Tabla 9A. Resumen estadístico del análisis de adecuación del modelo de presión.

| <i>D</i> (m) | <i>Q</i> (m ³ /s) | <i>i</i> exp.1 | <i>i</i> exp.2 | <i>i</i> exp.pro | <i>i</i> sim. | error |
|--------------|------------------------------|----------------|----------------|------------------|---------------|-------|
| 0,2 | 0,005 | 160,43 | 163,83 | 162,13 | 153,83 | 0,054 |
| | 0,010 | 327,03 | 301,03 | 314,03 | 297,03 | 0,057 |
| | 0,015 | 462,67 | 450,77 | 456,72 | 440,77 | 0,036 |
| | 0,020 | 606,13 | 618,09 | 612,11 | 586,09 | 0,044 |
| | 0,025 | 755,52 | 777,61 | 766,57 | 733,61 | 0,045 |
| | 0,030 | 883,16 | 913,64 | 898,40 | 883,64 | 0,017 |
| | 0,040 | 1186,12 | 1192,00 | 1189,06 | 1192 | 0,002 |
| | 0,044 | 1302,30 | 1292,00 | 1297,15 | 1302 | 0,004 |
| 0,3 | 0,005 | 33,86 | 34,79 | 34,33 | 33,05 | 0,039 |
| | 0,010 | 66,22 | 67,55 | 66,89 | 63,54 | 0,053 |
| | 0,015 | 99,13 | 103,64 | 101,39 | 93,65 | 0,083 |
| | 0,020 | 129,94 | 133,75 | 131,85 | 123,74 | 0,066 |
| | 0,025 | 171,01 | 163,98 | 167,50 | 153,97 | 0,088 |
| | 0,030 | 191,93 | 198,44 | 195,19 | 184,43 | 0,058 |
| | 0,040 | 251,15 | 266,22 | 258,69 | 246,21 | 0,051 |
| | 0,044 | 271,98 | 278,16 | 275,07 | 268,13 | 0,026 |
| | | | | error | promedio | 0,045 |

Tabla 9B. Resumen estadístico del análisis de adecuación del modelo de presión.

| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Fila 1 | 2 | 315,96 | 157,98 | 34,445 | |
| Fila 2 | 2 | 611,06 | 305,53 | 144,5 | |
| Fila 3 | 2 | 897,49 | 448,745 | 127,20125 | |
| Fila 4 | 2 | 1198,2 | 599,1 | 338,5202 | |
| Fila 5 | 2 | 1500,175 | 750,0875 | 543,0160125 | |
| Fila 6 | 2 | 1782,04 | 891,02 | 108,9288 | |
| Fila 7 | 2 | 2381,06 | 1190,53 | 4,3218 | |
| Fila 8 | 2 | 2599,15 | 1299,575 | 11,76125 | |
| Fila 9 | 2 | 67,375 | 33,6875 | 0,8128125 | |
| Fila 10 | 2 | 130,425 | 65,2125 | 5,5945125 | |
| Fila 11 | 2 | 195,035 | 97,5175 | 29,9151125 | |
| Fila 12 | 2 | 255,585 | 127,7925 | 32,8455125 | |
| Fila 13 | 2 | 321,465 | 160,7325 | 91,4628125 | |
| Fila 14 | 2 | 379,615 | 189,8075 | 57,8350125 | |
| Fila 15 | 2 | 504,895 | 252,4475 | 77,8128125 | |
| Fila 16 | 2 | 543,2 | 271,6 | 24,0818 | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | |
| <i>Origen de variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>crítico para F</i> |
| Entre grupos | 4893445,884 | 326229,7256 | 3196,265018 | 6,79631E-25 | 2,35222 |
| Entre grupos | 1633,0547 | 102,0659188 | | | |
| Total | 4895078,939 | | | | |

ANEXO IV, cont. Análisis de datos.

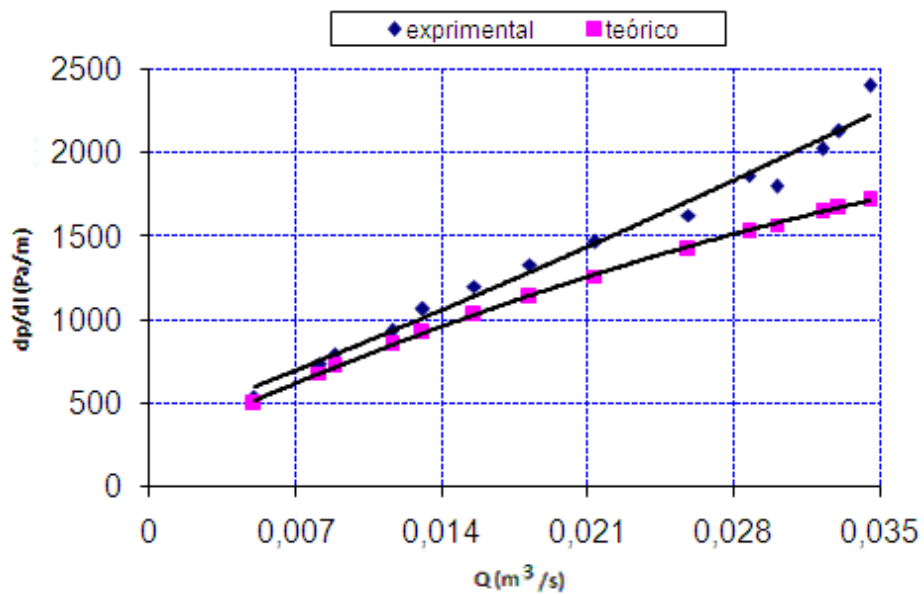


Figura 2: Comparación del comportamiento de la caída de presión teórica y con la experimental en régimen laminar para desechos lixiviados al 25 % de sólidos.

Fuente: Turro, (2002).

ANEXO V. Especificidades de la estación del primer impulso

En la estación de primer impulso es donde se le da el tratamiento primario al combustible utilizado en la CTE. Los tanques cuentan en el interior con calentadores de serpentín y por medio de dos líneas por cada tanque sale el combustible, pasando por calentadores de tubo y coraza que de conjunto con los serpentines garantizan que el combustible llegue a la succión de las bombas con una temperatura entre 65 a 70 °C.

Dentro de la casa de bombas del primer impulso se encuentran situadas seis bombas de combustible, tres para cada una de las dos unidades generadoras de la CTE. Las bombas están ubicadas en paralelo, dos se encuentran en operación continua y la tercera en reserva, cada una garantiza un flujo máximo de 0,032 m³/s. En la figura 1 se muestra el esquema que representa la instalación.

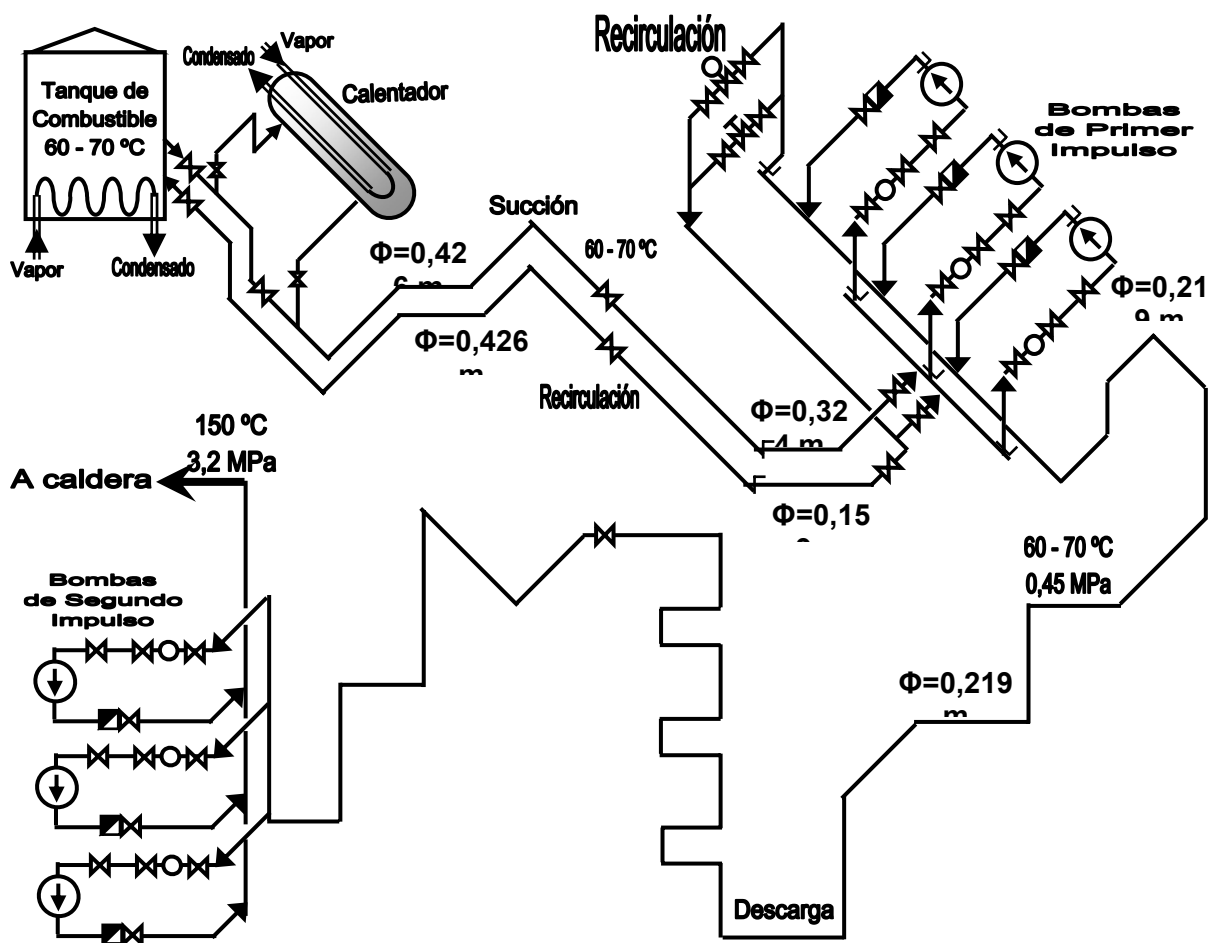


Figura 1. Esquema de la instalación de combustible primer impulso de la CTE de Felton.

ANEXO V, cont. Especificidades del primer impulso

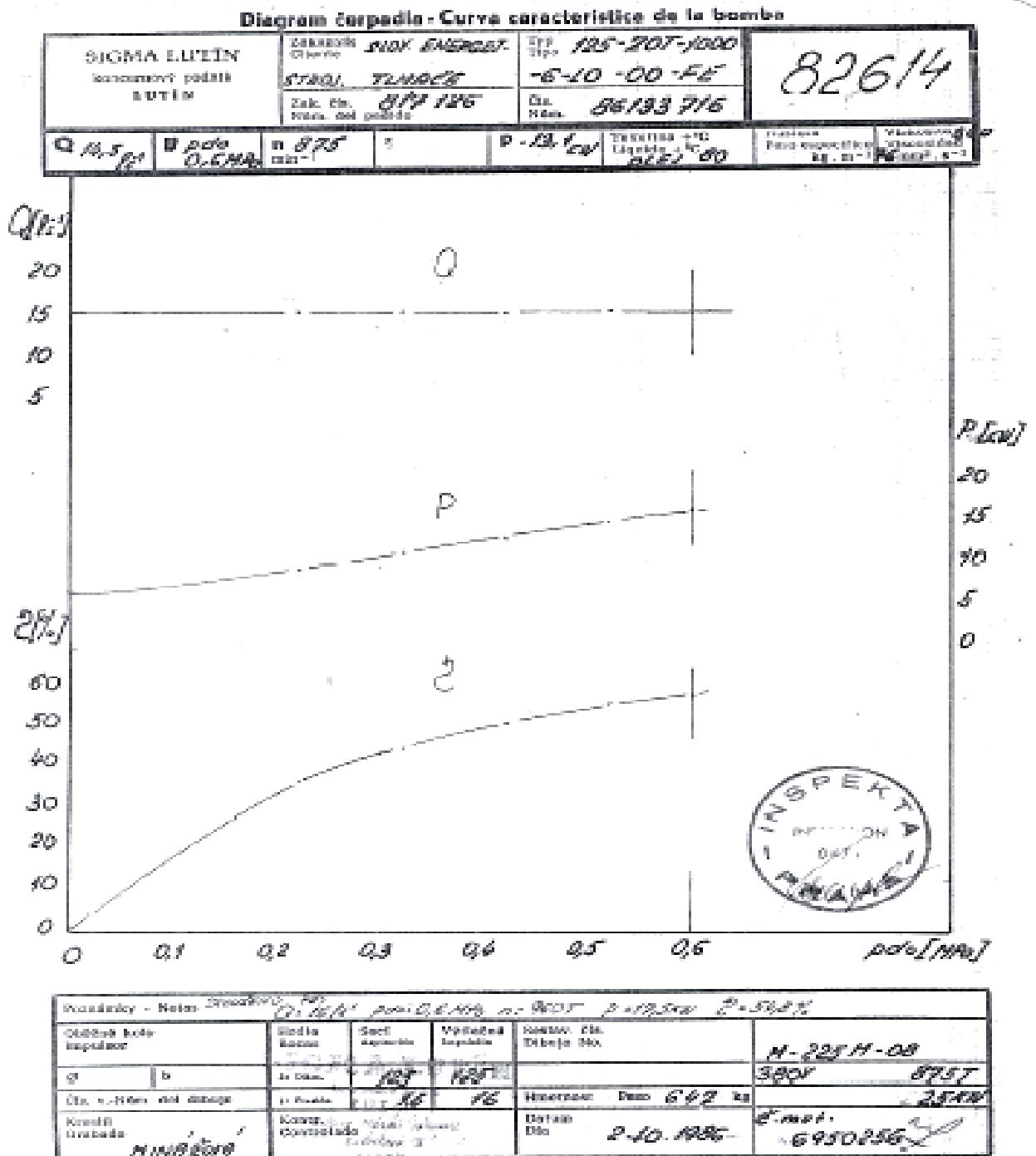


Figura 2. Pasaporte de las bombas de combustible de primer impulso de la CTE de Felton.

ANEXO V, cont. Certificaciones de los instrumentos de medición



LABORATORIO DE METROLOGÍA



Certificado de calibración simplificado (1)

RG02/LM-PE-014
 Certificado No 04-2056
 Denominación del Instrumento: Manómetro de deformación elástica
 No de serie: 083255 Modelo PREMA Exactitud 2.5
 Rango de medición de 0 a 2.5 MPa Fecha de calibración: 2010-06-17
 Método de calibración: Comparación directa
 Perteneciente a: CTE-Felton carretera Felton km 9 1/2
 Patrones utilizados: Manómetro de pistón y pesas No 2262 exactitud 0.05
Los patrones utilizados son trazables a las unidades de medidas del Sistema Internacional de Unidades (SI).
 Resultado de la Calibración:
Dentro de especificaciones según: Apartado: 6.2.3 del documento: LM-IT-012
 Incertidumbre expandida máxima para k=2: ± 0.0060 MPa

| | |
|---|---|
| <p>Calibró: <u>[Firma]</u> Firma <u>Yacomo Torres N.</u> Nombre Metrologo Cargo</p> | <p>Aprobó: <u>[Firma]</u> Firma <u>Rosabel Borges C.</u> Nombre J. Metrología Cargo</p> |
|---|---|

Carretera Moa - Sagua km 1 1/2 Teléfono 6-6011 Ext 210, 223, 238. Dependencia No 1
 Carretera Moa - Baracoa km 5 1/2 Teléfono 6-8012 Ext 452, 456, 559 Dependencia No 2 X

Este certificado expresa fielmente el criterio sobre el resultado de las mediciones realizadas. Solo podrá ser reproducido en su totalidad. El criterio contenido en el presente certificado se refiere al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de la información aquí contenida y del instrumento calibrado.

Rev. 2.0



LABORATORIO DE METROLOGÍA

RG02/LM-PE-014

Certificado de calibración simplificado (1)

Certificado No 04-2080
 Denominación del Instrumento: Manómetro de deformación elástica
 No. de Serie: 01209 Modelo PREMA Exactitud 1.0
 Rango de medición de 0 a 2.5 MPa Fecha de calibración 2000617
 Método de calibración: Comparación directa
 Perteneciente a: CTE Felton Carretera Felton km 9 1/2
 Patrones utilizados: Manómetro de pistón y pesas No 2262 exactitud 0.05
Los patrones utilizados son trazables a las unidades de medidas del Sistema Internacional de Unidades (SI).
 Resultado de la Calibración:
Dentro de especificaciones según: Apartado: 6.2.3 del documento: LM-IT-012
 Incertidumbre expandida máxima con k=2: ± 0.0060 MPa

| | |
|---|---|
| <p>Calibró: <u>[Firma]</u> Firma <u>Yacomo Torres N.</u> Nombre Metrologo Cargo</p> | <p>Aprobó: <u>[Firma]</u> Firma <u>Rosabel Borges C.</u> Nombre J. Metrología Cargo</p> |
|---|---|

Carretera Moa - Sagua km 1 1/2. Teléfono 6-6011 ext. 210, 223, 238. Dependencia No. 1
 Carretera Moa - Baracoa km 5 1/2. Teléfono 6-8012 ext. 452, 456, 559. Dependencia No. 2 X

Este certificado expresa fielmente el criterio sobre el resultado de las mediciones realizadas. Solo podrá ser reproducido en su totalidad. El criterio contenido en el presente certificado se refiere al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de la información aquí contenida y del instrumento calibrado.

Rev. 2.0

ANEXO VI: Estructura de la aplicación informática para la obtención de la temperatura racional de transporte del combustible

```

prompt={'Rango de temperatura de bombeo (°C)', 'Temperatura de entrada en
el intercambiador de calor (°C)', ...
'Radios de la tubería (m) [ro r1 r2 r3]', 'Costo del vapor
(CUC/kg)', 'Tiempo de trabajo (horas/año)', ...
'Índice de flujo', 'Diámetro de tubería (m)', 'Flujo volumétrico del
combustible (m^3/s)', 'Longitud de la tubería (m)', ...
'Altura geodésica (m)', 'Costo de energía eléctrica
(CUC/kW.h)', 'Rendimiento de la bomba y el motor [Rb Rm]', 'Número de
codos', ...
'Conductividad térmica de la tubería, aislante, protector (W/m.°C)
[ka kb kc]', ...
'Velocidad del aire (m/s)', 'temperatura del aire (°C)', };
name='Entrada de datos';
numlines=1;
def={'29:0.01:70', '29', '[0.15 0.153 0.178
0.1795]', '0.017', '7042.3', '0.92', '0.3', '0.05', '1000', '6', '0.09', '[0.74
0.95]', '1', ...
'[ 60.5 0.035 237]', '5', '27'};
Datos=inputdlg(prompt,name,numlines,def);
Tbo = str2num(Datos{1}); Te = str2double(Datos{2}); RT1 =
str2num(Datos{3}); r0 = RT1(1); r1 = RT1(2); r2 = RT1(3); r3 =
RT1(4);
Cv = str2double(Datos{4}); Tt = str2double(Datos{5}); n =
str2double(Datos{6}); D = str2double(Datos{7}); Q =
str2double(Datos{8});
Lt = str2double(Datos{9}); Dz = str2num(Datos{10}); Ce =
str2double(Datos{11}); ren = str2num(Datos{12}); Rb = ren(1); Rm =
ren(2);
Ncod = str2double(Datos{13}); cond = str2num(Datos{14}); ka =
cond(1); kb = cond(2); kc = cond(3);
v = str2double(Datos{15}); Ta = str2double(Datos{16});
% =====
a=59.86;
b=0.056; % coeficientes del índice de consistencia másica.
A1=0.14;
B1=0.2; % coeficientes de fricción de mezcla.
Ai= 0.0326; % coeficiente de proporcionalidad del intercambiador de
calor.
g = 9.81; % gravedad (m/s^2)
Kbo = a*exp(-b*Tbo);
Densbo = - 7.62*log(Tbo)+ 1012; % Densidad bombeo del petróleo (kg/m^3)
Rebo = (8^(1-n)*D^n*Densbo*(4*Q/(pi*D^2))^(2-n))*(4*n/(3*n+1))^n./Kbo; %
Reynolds de bombeo(adim.)
% =====
% Propiedades del combustible CM-650.
kp = (-0.13*Tbo+149.1)*0.001;
cp = 8.56*Tbo+1483;
vp = 4*Q/(pi*D^2);
vip = (3*n+1/n)*(8*vp/D)^-0.075;
Prp = cp*vip/kp;
% =====
%Propiedades del aire
kaire = 0.0244+Ta*0.6763*10^-4;
densaire = 353.44/(Ta+273.15);

```

```

visaire = 1.718*10^-5+4.62*10^-8*Ta;
Cpaire = 999.2+0.1434*Ta+1.101*10^-4*Ta^2-6.7581*10^-8*Ta^3;
Praire = visaire*Cpaire/kaire;
Reaire = v*r3^2*densaire/visaire; % Reynolds para el aire exterior
%=====
hp = 0.023*Rebo.^0.8*Prp^0.3.*kp./D; % Coeficiente de convección del
combustible
haire = 0.023*Reaire^0.8*Praire^0.3*kaire/(r3^2); % Convección del aire
Pcal = (1./(1/r0*hp))+ log(r1/r0)/ka + log(r2/r1)/kb + log(r3/r2)/kc +
(1/r3*haire);
Tf = Tbo - 2*pi*Lt*(Tbo - Ta)./(Q*Densbo.*cp.*Pcal);
Final=====
Kf = a*exp(-b*Tf);
Densf = - 7.62*log(Tf)+ 1012; % Densidad promedio de transporte del
petróleo (kg/m^3)
Ref = (8^(1-n)*D^n*Densf*(4*Q/(pi*D^2))^(2-n))*(4*n/(3*n+1))^n./Kf;
Reynolds de promedio (adim.)
Promedio=====
Tmed = (Tbo + Tf)/2;
Kmed = a*exp(-b*Tmed);
Densmed = - 7.62*log(Tmed)+ 1012; % Densidad promedio de transporte del
petróleo (kg/m3)
Remed = (8^(1-n)*D^n*Densmed*(4*Q/(pi*D^2))^(2-n))*(4*n/(3*n+1))^n./Kmed;
% Reynolds de promedio
Ccal = Cv*Ai*Tt*3600*(Tbo - Te); % Costo de calentamiento del petróleo
(CUC/año)
Le=n/(3*n+1))^n*(D/2)^(n+1)*((850./Remed)+(0.199/D^0.22)).*Densmed./(4*Km
ed)*(4*Q/(pi*D^2))^(2-n); % Longitud eq. del codo (m)
L = Le*Ncod+Lt;
Nn=2*Kmed.*L*((3*n+1)/n^4/(pi*D^2))^n*(2*Q/D)^(n+1)+(8*A1*L.*Densmed*Q^3)
./(Remed.^B1*D^5*pi^2)+Densmed*g*Dz*Q +...
(Densf-Densbo)*16*Q^3/(pi^2*D^4);
Cca2 = Ce*Tt*Nn/(Rb*Rm)*1e-3;
Cca3 = 22.44*D^0.147;
Cca4 = (Cca3+0.36*Cca3)/12;
Ccatotal=Cca1+Cca2+L*Cca4;
plot(Tbo,Cca1,Tbo,Cca2,Tbo,Ccatotal),grid
error = 0.01;
for I = 1:length(Cca1)
    if Cca1(I) - Cca2(I) <= error
        Ccalculo1 = Cca1(I);
        Ccalculo2 = Cca2(I);
        Tbl = Tbo(I);
    end
end
%=====
[Ccamin No]= min(Ccatotal);
xlabel('Temperatura (°C)')
ylabel('Costo (CUC/año)')
Tbmin = Tbo(No);
title([' Temperatura racional = ',num2str(Tbmin),' ° C; Costo total =
num2str(Ccamin),' CUC/año'])
%=====

```

ANEXO VII: Producción científica del autor sobre el tema de la tesis**Participación en eventos científicos:**

1. Laurencio, H., “Propiedades reológicas de emulsiones de petróleo pesado en agua”, ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba, 2007.
2. Laurencio, H., “Modelo de viscosidad del petróleo no newtoniano”, 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Perú, 2008.
3. Laurencio, H. y Turro, A., “Método de cálculo para el transporte de petróleo crudo cubano por tuberías”, CINAREM, Moa, Cuba, 2009.
4. Laurencio, H., “Estudio reológico de petróleo pesado de 11° API”, CINAREM, ISMM, Moa, Cuba, 2009.
5. Laurencio, H., “Propiedades reológicas de petróleo pesado” Convención Internacional de Ingeniería en Petróleo & Gas”, Mérida, Venezuela, 2009.
6. Laurencio, H., “Método para la obtención de la temperatura racional de bombeo de petróleos pesados”, ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba, 2010.
7. Laurencio, H., Delgado, Y., Falcón, J., “Modelo para la estimación de pérdidas de presión en el transporte de petróleos pesados por tuberías”, CINAREM, ISMM, Moa, Cuba, 2011.

Publicaciones en revistas científicas:

1. Laurencio, H. y Delgado, Y., “Comportamiento reológico de emulsiones de petróleo pesado en agua”. *Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería*. 16(2) 244-250, 2008. ISSN 0718-2281.
2. Laurencio, H. y Delgado, Y., “Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado”. *Minería y Geología*. 24(2) 56-77, 2008. ISSN 1993-8012

Tutorías a tesis de ingeniería:

1. Columbie, M., Evaluación del sistema de transporte de combustible a los secaderos de la planta niquelífera Ernesto Che Guevara, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2005. 58p
2. Cutiño, A., Evaluación de operación del oleoducto del campo de boyas del puerto Moa, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2006. 49p
3. Torres, R., Diseño y fabricación de un reómetro de tubo capilar, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2006. 58p

4. Negret, E., Modelación y simulación de sistemas de flujo de petróleo para el transporte por tuberías, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2007. 61p
5. Nogra, P., Formulación de emulsiones de petróleo crudo cubano pesado CM-650, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2008. 53p
6. Saldas, L., Determinación de las propiedades de transporte del petróleo crudo CM-650, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2008. 49p
7. Romero, D., Evaluación del sistema de transporte de combustible CM-650 en la central termoeléctrica Lidio Ramos. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2009. 57p
8. Ávila, L., Obtención de la temperatura racional de transporte del combustible CM-650 en la central termoeléctrica Lidio Ramos. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2010. 54p
9. Rodríguez, G., Método para la obtención del diámetro racional en el transporte del combustible CM-650. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2011. 43p

Tutoría a tesis de maestría:

1. Ochoa, O., Procedimiento para el bombeo eficiente de petróleos pesados, Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2011. 85p

Otras investigaciones realizadas:

Laurencio, H., Análisis del régimen de explotación del sistema de bombeo de colas en el proceso carbonato amoniacal. Diplomado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2006. 45p

Laurencio, H., Método de cálculo para el transporte de emulsiones de petróleo pesado por tuberías, Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2007. 87p

SIMBOLOGÍA

| | | |
|------------------|---|------------------------|
| g | - aceleración de la gravedad | (m/s ²) |
| H | - altura de presión | (m) |
| θ | - ángulo de inclinación de la tubería | (grados sexag.) |
| A | - área de la sección transversal | (m ²) |
| c_{pp} | - capacidad calorífica del combustible | (J/kg·°C) |
| h_e | - coeficiente de convección del aire | (W/m ² ·°C) |
| h_p | - coeficiente de convección del combustible | (W/m ² ·°C) |
| ξ | - coeficiente de fricción de pérdidas locales | (adimensional) |
| λ^* | - coeficiente de fricción por rozamiento adicional del fluido | (adimensional) |
| λ | - coeficiente de fricción por rozamiento del fluido | (adimensional) |
| α | - coeficiente de modelo, Ec. 1.12 | - |
| k_t | - coeficiente de proporcionalidad del intercambiador de calor | - |
| μ | - coeficiente dinámico de viscosidad | (Pa·s) |
| k_1 ; | | |
| k_2 ; | | |
| k_3 ; | - coeficientes de ajuste del modelo, Ec.1.8 | - |
| k_4 | | |
| a ; | - coeficientes que dependen del régimen del fluido, | |
| b | - Ec. 2.21 | - |
| ψ ; β | - coeficientes, Ec. 1.11 | - |
| k_A | - conductividad térmica de la tubería | (W/m·°C) |
| k_B | - conductividad térmica del aislamiento | (W/m·°C) |
| k_C | - conductividad térmica del protector del aislamiento | (W/m·°C) |
| k_p | - conductividad térmica del combustible | (W/m·°C) |

| | | |
|-------------------|---|----------------------|
| $C; B$ | - constantes, Ec.1.5 | - |
| I | - corriente eléctrica | (A) |
| C_{bom} | - costo de bombeo de la instalación | (CUC/año) |
| C_{mant} | - costo de mantenimiento de la tubería | (CUC/m) |
| C_{tub}^* | - costo específico de la tubería | (CUC/m) |
| C_v | - costo específico del vapor | (CUC/kg) |
| C_F | - costo fijo de la tubería | (CUC/año·m) |
| C_{cal} | - costo por calentamiento del combustible | (CUC/año) |
| ρ | - densidad | (kg/m ³) |
| $\rho_f ;$ | densidades final e inicial del combustible durante el | (kg/m ³) |
| ρ_i | transporte por las tuberías | |
| D | - diámetro de la tubería | (m) |
| Δp | - diferencia de presión | (Pa) |
| Δt | - diferencia de temperatura | (°C) |
| $x_i ;$ | elementos de serie y número de pruebas, Ec.2.58. | - |
| np | | |
| E_p | - error relativo puntual | (%) |
| τ_p | - esfuerzo de corte en la pared de la tubería | (Pa) |
| f_{Tr} | - factor de fricción de transición | (adimensional) |
| f_L | - factor de fricción laminar | (adimensional) |
| f_T | - factor de fricción turbulento | (adimensional) |
| $\cos \bar{\phi}$ | - factor de potencia | (adimensional) |
| \dot{m}_M | - flujo másico | (kg/s) |
| \dot{m}_v | - flujo másico de vapor | (kg/s) |
| Q | - flujo volumétrico | (m ³ /s) |
| Q_p | - flujo volumétrico del combustible | (m ³ /s) |
| $\frac{dp}{dx}$ | - gradiente de presión en la dirección del flujo | (Pa/m) |

| | | |
|-------------------|---|----------------|
| $\frac{dv_x}{dy}$ | - gradiente de velocidad | (1/s) |
| K | - índice de consistencia másica | (Pa·s) |
| n | - índice de flujo | (adimensional) |
| L | - longitud de la tubería | (m) |
| $L_{eq.}$ | - longitud equivalente | (m) |
| Pr | - número de Prandt | (adimensional) |
| $Re_{crit.}$ | - número de Reynolds crítico | (adimensional) |
| Re^* | - número generalizado de Reynolds | (adimensional) |
| P | - perímetro de la tubería | (m) |
| i | - pendiente hidráulica | (adimensional) |
| N_h | - potencia hidráulica | (W) |
| r_1 | - radio exterior de la tubería; (m). | (m) |
| r_2 | - radio exterior del aislamiento | (m) |
| r_3 | - radio exterior del protector del aislamiento | (m) |
| r_0 | - radio interior de la tubería | (m) |
| η_b | - rendimiento de la bomba | (%) |
| η_m | - rendimiento del motor eléctrico | (%) |
| t_{el} | - tarifa eléctrica | (CUC/ kW.h) |
| t | - temperatura | (°C) |
| t_e | - temperatura del aire | (°C) |
| t_i | - temperatura del fluido en el interior de la tubería | (°C) |
| t_f | - temperatura final del combustible | (°C) |
| t_i | - temperatura inicial del combustible | (°C) |
| U | - tensión eléctrica | (V) |
| t_t | - tiempo de trabajo del equipo | (h/año) |
| v | - velocidad media del fluido | (m/s) |
| V_u | - vida útil de la tubería | (año) |