

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
"Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ"
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO INGENIERIA MECANICA**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Master
en Electromecánica**

**Propuesta de extracción de los sedimentos
en los tanques de almacenamiento
de petróleo**

Autor: Ing. Andrés Durán Reyes

Tutor: Dr. C. Enrique Torre Tamayo

Moa -2010

DECLARACION DE AUTORIDAD

Yo: Andrés Duran Reyes.

Autor de este trabajo de maestría certifico su propiedad intelectual a favor del ISMM "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

.....

Firma del Autor

Ing. Andrés Durán reyes

.....

Firma del tutor

Dr.C. Ing. Enrique Torre tamayo

PENSAMIENTO

"El placer no está en llegar, sino en recorrer el camino alegremente, apoyándonos en el ejemplo de otras personas. Los logros pueden no ser de gran trascendencia para el fin que persiguen, pero son útiles para quien los obtiene; refuerzan la autoestima, ayudan a afinar el rumbo y robustecen la propia formación; son una llave que abre las puertas internas de la motivación más allá de lo que consigue un triunfo, porque éste puede alentar la vanidad y aquel, el logro, tiende a fortalecer el espíritu, es un paso hacia un horizonte dinámico, mientras el triunfo huele, con frecuencia, a fin. El verdadero fin es un objetivo permanente que avizoramos en el horizonte y que se va alejando cuanto más tratamos de acercarnos."

Marcelino Gómez Velasco, 2000.
Ingeniero químico mexicano.

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a DIOS porque, nunca una obra científica se alcanza sin el apoyo material o espiritual de muchas personas; son éstas imprescindibles en el quehacer de un investigador.

A los profesores de la Maestría en Electromecánica por los conocimientos brindados.

A mi esposa **Yamileidis Sánchez**, mujer que además de amor, me brindó la comprensión nunca antes recibida para realizar la investigación.

A mis hijos **Liannet, Emanuel y Saray**, que con su amor, cariño y apoyo, me dieron fuerza hasta el final.

Al extenso número de personas que en la casa, el trabajo, en una calle, en una parada, encima de un camión, me dijeron: "sigue adelante, estamos contigo". A todos los recuerdo con especial gratitud y aunque no están en este papel, si en lo más interno de mi alma.

A todos, MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIAS

A la **Revolución cubana**, porque siempre abre las ventanas del porvenir a los cubanos y sin ella no hubiera ni soñado con esta maravillosa posibilidad.

A las **memorias de mis padres Manuel y Mirtha**, porque fueron los ejemplos más importante de mi vida.

A mi **esposa e hijos Yamileidis, Liannet, Emanuel, Saray** por su apoyo en los momentos difíciles.

A mi **familia**, porque ha sido la cuna más importante de mi formación.

A todas las personas que todavía creen en los investigadores, para dar soluciones a problemas existentes fuera y dentro de nuestro entorno.

RESUMEN

En el trabajo se desarrolla un estudio experimental del residual petrolizado de la Empresa Raúl Díaz Argüelles. Mediante el mismo se comprobó que el modelo reológico teórico que caracteriza al residual petrolizado se corresponde con un fluido pseudoplástico. El referido estudio permitió ajustar el mencionado modelo para el intervalo de temperatura comprendido entre 50 a 70 °C, siendo los coeficientes de correlación de 0,98, 0,95 y 0,92 respectivamente.

Se determinó que, el calor (10349 kJ/s) transferido por el intercambiador de calor con un 66% de efectividad a los (70 °C), es el mejor parámetro de extracción del residual, para un caudal de (0,048 m³/s) y (68 %) de eficiencia de la bomba, a partir del consumo de vapor (105,3 kg/s) suministrado al calentador.

Finalmente se determinó que la formación de 48,6 m³ de residual petrolizado genera la pérdida de 1834,188 barriles de petróleo, lo que implica un gasto económico que asciende a 119 222.22 CUC. Se evidenció que el residual petrolizado afecta al medio ambiente y la salud humana, siendo las enfermedades más frecuentes la irritación de los ojos, el nerviosismo y la cefalea.

ABSTRACT

The work is an experimental study of the residual petroleum of the company Raúl Díaz Argüelles is developed, by means of the same one it was proven that the pattern theoretical reologic that characterizes to the residual petroleum is the one that belongs together with a flowing pseudoplastic. The one referred study allowed to adjust the one mentioned model for the interval of temperature understood between 50 to 70 °C, having the coefficients of correlation of 0,98, 0,95 and 0,92.

Determined that, the heat (10349 kJ/s) transferred by the interchanger of heat with 66 % of effectiveness to those (70 °C), it is the best parameter in extraction of the residual one, for a flow of (0,048 m³/s) and (68 %) of efficiency of the bomb, starting from the consumption of vapor (105,3 kg/s) given to the heater.

Finally It was determined that the formation of 48,6 m³ of residual generates the loss of 1834,188 barrels of petroleum, what implies an economic expense that ascends 119 222.22 USD. It was evidenced that the residual affects to the environment and the human health, being the most frequent illnesses the irritation of the eyes, the edginess and the migraine.

INDICE

SÍNTESIS	Páginas.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1- Introducción	4
1.2- Revisión Bibliográfica	4
1.3- La Viscosidad	5
1.3.1- Tipos de Viscosidad	5
1.3.2- Factores que influyen sobre la viscosidad	6
1.4- Generalidades de los petróleos	8
1.4.1- Clasificación del petróleo	8
1.4.2- Generalidades de los residuales del petróleo	10
1.4.3- Residuales petrolizados y sus propiedades	11
1.5- Tecnologías y alternativas aplicadas para la extracción de los residuales	13
1.5.1- Propiedades del flujo para el transporte ó extracción del residual	14
1.6- Descripción de las Instalaciones de la empresa Puerto Moa	15
1.6.1- Descripción del flujo tecnológico de la base de combustible	16
1.7- Breve descripción de los intercambiadores de calor	19
1.7.1- Funcionamiento de los intercambiadores de calor	19
1.7.2- Tipos de intercambiadores de calor según su operación	21
Conclusiones del capítulo I	23
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1- Introducción	24
2.2- Características a tener en cuenta del sistema en estudio	24
2.2.1- Toma y preparación de las muestras	25
2.2.2- Determinación de la cantidad de residual depositado en el fondo del tanque	25
2.3- Determinación de las propiedades físicas del residual	26
2.4- Determinación de las propiedades químicas del residual	28
2.4.1- Análisis del contenido de los elementos químicos disueltos en el residual	29
2.5- Determinación de los modelos reológicos del residual	30
2.5.1- Curvas de flujo	30

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

2.5.2- Flujo de viscosidad independiente del tiempo	31
2.6- Diseño de experimentos	34
2.7- Determinación de las propiedades reológicas	35
2.8- Flujo de calor máximo suministrado al sistema	37
2.8.1- Características principales del sistema de calentamiento	38
2.8.2- Metodología de cálculo del intercambiador de calor instalado	38
2.8.3- Cálculo del consumo de vapor para calentar el combustible	42
2.9- Características del sistemas de bombeo	42
2.9.1- Metodología de cálculo	43
Conclusiones del capitulo II	45
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
3.1- Introducción	46
3.2- Determinación de las propiedades físicas del residual	46
3.3- Determinación de las propiedades químicas del residual	48
3.4- Resultados experimentales de las propiedades reológicas	49
3.5- Resultados del efecto de la temperatura sobre el residual	52
3.6- Resultados del flujo de calor máximo suministrado al sistema	53
3.7- Resultados del flujo de calor real suministrado al sistema	53
3.8- Resultados obtenidos para el cálculo de la bomba	55
3.9-Resultados de la cantidad de residual depositado en el fondo del tanque	57
3.10- Valoración económica	57
3.11- Impacto de los residuales petrolizados al medio ambiente	58
Conclusiones del capitulo III	60
Conclusiones Generales	
Recomendaciones	
Referencias Bibliográficas	
Anexos	

INTRODUCCIÓN

En Cuba el petróleo ha desempeñado un papel fundamental para el buen funcionamiento de las industrias del níquel, que junto al turismo están entre las primeras fuentes de exportación del país, la referida industria está enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades de producción y modernización de sus tecnologías para incrementar sus aportes al estado.

Estas industrias del níquel reciben servicios de la empresa "Puerto Moa", principalmente relacionado con el abastecimiento de combustible (petróleo). La referida empresa cuenta con un sistema de almacenamiento de productos, entre ellos el combustible (petróleo). Este sistema basado en tanques de almacenamiento presenta deficiencias, principalmente para la extracción y transporte de combustible, debido a las propiedades del mismo y a la acumulación por el tiempo de retención en los tanques, formándose mezclas de compuestos no saturados en la base de estos tanques.

Los compuestos no saturados mezclados con el petróleo en los tanques de almacenamientos, provocan la formación del residual petrolizado, con características similares a un líquido altamente viscoso, difícil de manipular a temperatura y presión atmosféricas. Limitando la operación en los sistemas de trasiego, disminuyendo la capacidad de diseño de los depósitos, producto a la formación de lodos y corrosión en líneas, calentadores y filtros (Scalliet et al., 2000).

La temperatura requerida para procesar el lodo depende de la estabilidad de la emulsión, de la viscosidad del lodo y de la intensidad del mezclado. El hidrocarburo recuperado es posible reintroducirlo en el proceso mezclándose con el crudo en determinadas cantidades. También se ha reportado la adición de solventes seguida por la adición de sales inorgánicas las cuales generan gases y calor, facilitando la remoción y flotación de la fase orgánica (Franco et al., 1996).

La base de combustible de la empresa "Puerto Moa", tiene como objetivo almacenar los petróleos que garanticen la producción de níquel de las empresas del territorio sin interrupción, para poder cumplir con los planes de producción y compromisos internacionales, con la necesidad de disponer de una infraestructura que permita

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

almacenar estos recursos para controlar mejor su almacenamiento, transporte, distribución y empleo.

A pesar de los elementos anteriormente expuestos, en la base de petróleo de la empresa Puerto Moa, la problemática de la sedimentación y compactación del petróleo, entre otros compuestos orgánicos generan la formación del residual petrolizado depositado en el fondo de los tanques de almacenamiento, provocando la reducción de la capacidad de almacenaje. También acelera los ciclos de mantenimiento y la destrucción de estos tanques.

Teniendo en cuenta las deficiencias antes expuestas, se define como **Problema de la Investigación:**

Insuficiente conocimiento del efecto de la temperatura en el residual del tanque de almacenamiento de combustible dificultándose la evacuación del mismo, lo que provoca pérdida de capacidad en los tanques y por mantenimiento de los mismos.

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea:

El residual petrolizado depositado en los tanques de almacenamientos ubicados en la base de combustible de la empresa "Puerto Moa".

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis:**

Con la caracterización del residual petrolizado depositado en los tanques de almacenamientos ubicados en la base de petróleo de la empresa "Puerto Moa" y la conjugación con el análisis teórico del sistema, es posible determinar las propiedades físicas, químicas y reológicas del material que influyen en su extracción y transporte.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo:**

Establecer los parámetros del calentamiento y transporte del residual de petróleo almacenado, a partir de su caracterización física, químicas y reológicas.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo:**

- **Revisión bibliográfica relacionada con la temática y el material objeto de estudio, que permita el establecimiento del marco teórico de la investigación.**
- **Establecimiento del procedimiento de cálculo para la determinación de los diferentes parámetros.**
- **Determinación experimental de las propiedades físicas, químicas, y reológicas del material.**
- **Determinación del efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas y reológicas del residual de petróleo.**
- **Establecer el estado actual del sistema de calentamiento y bombeo del residual de petróleo de la empresa "Puerto Moa".**
- **Valoración económica y medioambiental asociada al residual.**

Los **métodos Investigativos empleados** para dar cumplimiento a la realización del trabajo son:

- **Método de investigación bibliográfico y documental para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.**
- **Método de investigación experimental para describir y caracterizar el objeto de estudio**
- **Método de investigación estadístico y de evaluación computacional en diferentes estado del sistema.**

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

La Empresa Puerto Moa, se encuentra enmarcada en un proyecto de ampliación y modernización de la base de combustibles, como posibles soluciones a los problemas de almacenamiento, trasiego, calentamiento y tratamiento del combustible, debido a la formación del residual de petróleo en el fondo de los tanques de almacenamientos, situación que ha conllevado a la necesidad de realizar estudios que permitan caracterizar, tratar y extraer al residual de manera conveniente para el proceso productivo y estudiar su efecto sobre el medio ambiente.

El objetivo del capítulo es:

Establecer los aspectos más importantes relacionados con la formación y propiedades del residual petrolizado almacenado.

1.2 – Revisión Bibliográfica.

Los hidrocarburos acumulados en el fondo de los tanques sufren un envejecimiento gobernado por tres tipos de procesos

- Físicos: Evaporación, disolución y emulsificación
- Químicos: Química o fotoquímica
- Biológicos: Degradación aeróbica y anaeróbica

Estos procesos alteran algunas de las propiedades de los hidrocarburos presentes en los residuales tales como la densidad, viscosidad y el contenido de carbón, originando la precipitación de éstos hacia el fondo de los tanques. Además, el oxígeno atmosférico reacciona con los compuestos no saturados dando origen a gomas y ácidos que coprecipitan con otras impurezas formando emulsiones en el agua, donde la presencia de complejos metálicos, nitrógeno, hierro y otros. (Jonson, Jr. et al., 1993).

1.3 - La viscosidad

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Dicho concepto se introdujo anteriormente en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\tau = \mu \gamma \quad (1,1)$$

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

Donde:

τ . Esfuerzo cortante; (MPa).

μ . Viscosidad; (MPa·s)

γ . Velocidad de deformación; (s^{-1})

1.3.1- Tipos de viscosidad

Existen tres tipos de viscosidad: la dinámica, la cinemática y la viscosidad aparente. La viscosidad dinámica o absoluta. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define también como la pendiente en cada punto de dicha curva.

En cambio, la viscosidad aparente se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de "viscosidad" para fluidos no newtonianos según la figura 1.1.

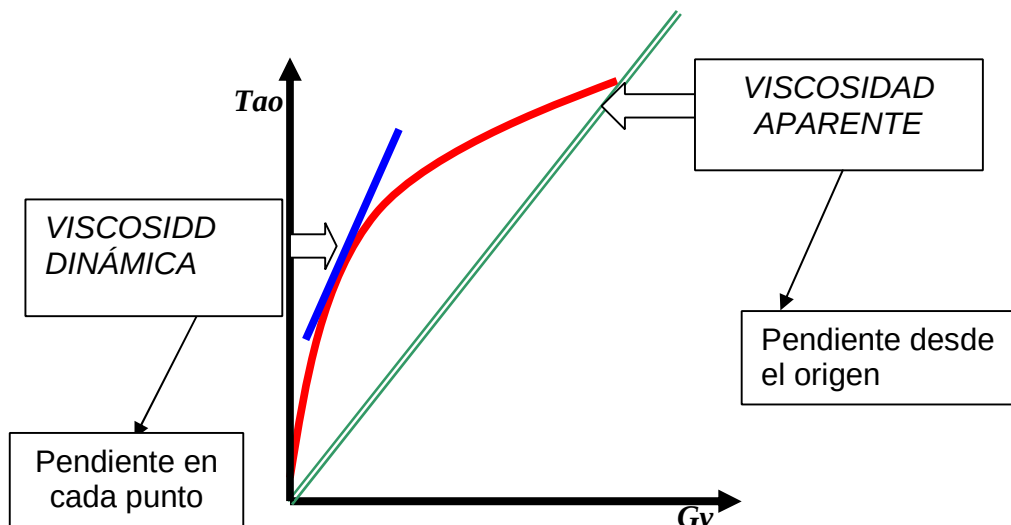


Figura 1.1. Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente.

Por último existe otro término de viscosidad "v" denominado viscosidad cinemática, que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado. Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centistokes [cst].

$$1 \text{ stoke} = 100 \text{ centistokes} = \text{cm}^2/\text{s}$$

Su ecuación es la siguiente:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1,2)$$

Donde:

ν .Viscosidad cinemática; (m^2/s)

μ .Viscosidad dinámica; (Pa.s)

ρ . Densidad del fluido; (kg/m^3)

A partir de los trabajos descritos por Caldiño et al. (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos.

La magnitud del esfuerzo cortante viscoso aumenta debido a los remolinos y vórtices que acompañan a la turbulencia, además con paredes ásperas o rugosas, la turbulencia se incrementa aún más (Martínez, 2001).

Planteando la necesidad de estudiar otras formas de disminuir la viscosidad del petróleo pesado (Placencia, 2002) caracterizan el comportamiento de flujo de las emulsiones en condiciones cercanas a las reales del oleoducto. Partiendo de estudios realizados en laboratorio concluyen que las emulsiones de petróleo pesado en agua tienen una viscosidad de 10 a 12 veces menor que la viscosidad del petróleo pesado.

1.3.2- Factores que influyen sobre la viscosidad

- **Efecto de la presión**

Existe una relación entre la viscosidad que presenta un fluido y la compresión a la que está sometido. En función de esa relación se obtienen distintos tipos de comportamientos:

- **Pseudoplástico:** es el que tienen los líquidos que al ser comprimidos se hacen más fluidos y al cesar la compresión vuelven a ser más viscosos.
- **Dilatante:** es contrario al anterior, al comprimir el líquido se vuelve más viscoso.
- **Newtoniano:** existe una relación lineal, la viscosidad es independiente, la compresión no produce alteración de la viscosidad.

- **Efecto de la temperatura**

La viscosidad de un líquido depende de la temperatura. A alta temperatura los líquidos son más fluidos, mientras que a baja temperatura son más viscosos. Esto es debido a que la energía térmica hace mas débiles las fuerzas de atracción entre las moléculas, que suelen ser fuerzas de Van der Waals.

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

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

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente del líquido se representa mediante la ecuación 1.2 reportada por (Guzmán y Andrade 1979).

$$\mu_a = A \cdot e^{-B.T} \quad (1,3)$$

Donde:

μ_a . Viscosidad aparente de los líquidos; (Pa.s)

A . Viscosidad infinita

e. Constante de euler

T. Temperatura; (°C)

B. Coeficiente que depende del tipo de fluido

De acuerdo con la ecuación 1.3, la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura.

La temperatura requerida para procesar el lodo depende de la estabilidad de la emulsión, de la viscosidad del lodo y de la intensidad del mezclado. El hidrocarburo recuperado es reintroducido en el proceso de refinación mezclándose con el crudo en determinadas cantidades. También se ha reportado la adición de solventes seguida por la adición de sales inorgánicas las cuales generan gases y calor, facilitando la remoción y la flotación de la fase orgánica (Franco et al, 1996).

- **Efecto del pH**

En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoeléctrico, el equilibrio atracción – repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van Der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes.

1.4 - Generalidades de los petróleos

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

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

1.4.1- Clasificación del petróleo

En el petróleo natural, además de hidrocarburos, existen nitrógeno, azufre, oxígeno, colessterina, productos derivados de la clorofila y de las heminas (porfirinas) y, como elementos, vanadio, níquel, cobalto y molibdeno. Como consecuencia de los compuestos orgánicos nombrados, el petróleo presenta polarización rotatoria, lo cual revela claramente que se trata de un compuesto de origen orgánico, formado a partir de restos animales y vegetales.

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

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

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

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

La clasificación del petróleo se basa en la clase de compuestos químicos que predominan en el mismo:

Petróleo de base parafínicas.

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

Petróleo de base asfáltica o nafténica.

- Predominan los hidrocarburos etilénicos y diétilínicos, cíclicos ciclánicos (llamados nafténicos), y bencénicos o aromáticos.
- Son muy viscosos, de coloración oscura y mayor peso específico de (0,95 kg/l).
- Por destilación producen un abundante residuo de asfalto. Las asfáltitas o rafealitas argentinas fueron originadas por yacimientos de este tipo, que al aflorar perdieron sus hidrocarburos volátiles y sufrieron la oxidación y polimerización de los etilénicos.

Petróleo de base mixta.

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

y bencénicos o aromáticos).

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

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

1.4.2- Generalidades de los residuales del petróleo

La palabra petróleo proveniente del latín "petroleum" (petra = piedra y oleum = aceite) y significa aceite de piedra. A los Hidrocarburos, se les define como compuestos químicos de carbón (76 a 86 %) e hidrógeno (14 a 24 %). Elementos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros son hidrocarburos que forman parte de otros compuestos de hidrocarburos como gas natural y petróleo (Diccionario LAROUSSE de ciencia y técnica).

Asfalteno: mezcla sólida y negra de hidrocarburos naturales.

Hidrocarburos: Es la combinación de carbono con el hidrógeno, los cuales son muy numerosos, variados e importantes.

Resina: sustancia sólida o de consistencia pastosa, insoluble en el agua, soluble en el alcohol y en los aceites esenciales, y capaz de arder en contacto con el aire.

Impurezas: se definen como el contenido de agentes corrosivos y otras sales contenidas en las sustancias.

Clements et al. (1978). Plantea que los residuales petrolizados depositados en el fondo de los tanques de almacenamientos de petróleo, son producto a la baja eficiencia en el calentamiento, que conlleva a la sedimentación y compactación del combustible y se pueden clasificar en dependencia de su formación en.

- Los residuales acumulados en el fondo de los tanques de almacenar petróleo.
- Los residuales acumulados en el fondo de los tanques de separación por flotación inducida.

- Los residuales en suspensión en el proceso de emulsión del petróleo.

1.4.3- Residuales petrolizados y sus propiedades

Los análisis físicos, químicos dependen de un conjunto de técnicas y procedimientos empleados para identificar y cuantificar la composición física, química y reológica de una sustancia que se necesite estudiar, con el propósito de ser usada en bienestar del desarrollo de la sociedad.

Algunas composiciones generales reportadas para estos lodos petrolizados son: 90 % de hidrocarburos, (5 % de agua y 5 % de sólidos), aunque otros presentan composiciones de (20 % hidrocarburos, 50 % de sólidos), y la composición de agua no es limitada aunque tiene un límite práctico de 75 % (Jonson et al., 1993). Los resultados sugieren un análisis integral para este líquido altamente viscoso, sirviendo como guía a otros trabajos.

Los petróleos poseen moléculas de resinas, sustancias sumamente viscosas y pocos móviles de color marrón oscuro hasta pardo y por su masa molecular ocupan un lugar intermedio entre los aceites y los asfáltenos lo que es una prueba del denominado vínculo genético entre resinas y asfáltenos. Además de que su contenido de carbono (79 a 87 %) resultan ser próximos a los asfáltenos con (1 a 2 %) en masa de hidrógeno. En las sustancias resinosas con frecuencia también se encuentran metales como el Fe, Ni, Cr, Mg y/o Co, mientras que el resto de la composición está formada por sustancias neutras. Estos conocimientos permiten una buena selección de los elementos químicos, que integran los residuales de petróleo.

Las propiedades físicas de los aceites pesados son todavía poco conocidas. La viscosidad es medida para los diferentes aceites pesados y puede variar en órdenes de magnitud. Sin embargo, la viscosidad y la densidad no parecen estar directamente relacionados con los aceites pesados como lo están para los aceites más ligeros. Como el petróleo pesado es un material viscoelástico, el módulo de corte y la viscosidad se acoplan (Garcell, L. 1993.).

Las variaciones en el contenido de asfáltenos puede ser la explicación de la gran dispersión de valores de viscosidad observado en los aceites pesados (Al-Mamaari et al., 2006). Los resultados sugieren que el módulo de la viscosidad y corte combinados

dependen del contenido de asfaltenos y resinas, más que del contenido de asfaltenos solo.

Un control químico que se ha sugerido en la literatura es el contenido de asfaltenos (Ameneiros, 2003). Demostrando que la correlación entre la viscosidad y el contenido de asfaltenos no se manifiesta como la literatura lo reporta.

Los asfáltenos son las fracciones del petróleo de más alto punto de ebullición. Pueden obtenerse por varios procedimientos como: destilación al vacío del crudo del petróleo, tratamiento del residuo del petróleo con pentano bajo condiciones controladas y por contacto del residuo del petróleo con aire a temperaturas de (100 a 280 °C). No tienen una estructura molecular definida, son sólidos friables de color oscuro, son insolubles en solventes no polares.

Franco et al. (1996) plantean que los petróleos aparentemente estables bajo la óptica de determinados tipos de análisis de evaluación de estabilidad, provocan deposiciones en calentadores de petróleo (generalmente aglutinados por las resinas). Las macromoléculas de los asfáltenos están compuestas de heteroelementos en los siguientes rangos o valores. Este estudio caracteriza cualitativa y cuantitativamente la composición químicas de los residuales de petróleo, según la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Componentes de las moléculas de Asfáltenos.

Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
Carbono	75 a 85 %	Oxigeno	0,3 a 4,9 %.
Hidrogeno	7.4 a 8.8 %	Níquel	1,0 a 100 ppm.
Azufre	0,3 a 10,3 %	Vanadio	3,0 a 300 ppm.
Nitrógeno	0,6 a 3,3 %		

Los resultados indican que el contenido de asfáltenos en un combustible influye de manera determinante en el tiempo de combustión del mismo, corroborando que los de mayor contenido de asfáltenos tardan más en quemarse, lo cual está asociado con los problemas de partículas inquemadas, este estudio demuestra que los asfaltenos pueden ser utilizados convenientemente en el proceso de combustión.

Álvarez et al., (2004) realizan la aplicación de surfante para tratar los residuales sólidos petrolizados de la Refinería Níco López, reportan que las concentraciones de

sustancias presentes en el residuo sólido petrolizado a tratar, se encuentran dentro del rango reportado por otros autores.

La composición de estos lodos, siendo una mezcla de hidrocarburos, sólidos y agua le impide ser directamente utilizado en las empresas como combustible, por lo que se requiere la remoción de las porciones significativas de sólidos y agua. Con este objetivo se han desarrollado diversas tecnologías como la separación de estos sólidos de la fase acuosa mediante serpentines (Johnson et al., 1993).

1.5- Tecnologías y alternativas aplicadas para la extracción de los residuales

El avance tecnológico en la industria del petróleo se debe en buena medida a las herramientas y metodologías provistas 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 altamente viscosos (Powel, 1998; Ron, 2002).

Se han utilizados mecanismos para evitar la formación de estos lodos en el fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo. Entre estos se pueden citar la circulación continua del contenido de hidrocarburo en el tanque, mediante un chorro de combustible que se introduce horizontalmente en el fondo de éste. Esta circulación continua de la masa de combustible sobre todo en la zona cercana al fondo de los tanques evita la formación del lodo. Otros procedimientos emplean un barrido automático en el fondo de los tanques mediante un brazo mecánico (Welty J.R; Bandala, V. 2001).

Una tecnología aplicada con frecuencia en estos procesos, es la inyección directa de vapores calientes para disminuir la viscosidad del lodo que se encuentra en el interior de los tanques, facilitando su extracción (Scalliet et al, 2000). Trabajo que mejora la limpieza de los tanques y la fluidez del petróleo almacenado.

Las diferentes alternativas que se han desarrollado con el objetivo de extraer estos residuales de los tanques de almacenamiento de petróleo, incluyen en algunos casos, la recuperación del valor energético de estos desechos (Falatko, 1992). Se requiere conocer sus propiedades químicas y físicas para su utilización.

Se ha utilizado la aplicación de agua a presión en la limpieza de estos tanques de almacenamiento, para mezclar el residual con el agua y esta fase acuosa es trasladada a otros tanques para el recobrado del petróleo contenido en ella (Hannay, 1993).

1.5.1- Propiedades del flujo para el transporte ó extracción del residual

El conocimiento de las propiedades de flujo de las suspensiones que se transportan es de gran importancia para decidir las características de los sistemas de bombeo, redes de tuberías, accesorios y equipos que deben utilizarse según las necesidades tecnológicas, así como los requerimientos medioambientales que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

Con frecuencia se requiere la transportación de flujos con propiedades no Newtonianas, con un comportamiento pseudoplásticos o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por oleoductos u otros dispositivos de transporte similares. En dependencia de las condiciones de operación, dichos flujos pueden ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológica (Darby, 2000).

Al efectuar la evaluación en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar o viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas (Welty y Bandala, 2001).

Una de las leyes fundamentales de la mecánica de los fluidos se expresa mediante la ecuación de balance de energía mecánica aplicada al sistema de flujo en cuestión (Skelland, 1987), en la mayoría de los textos de ingeniería química, el balance de energía mecánica para condiciones estacionarias de flujo se conoce como ecuación de Bernoulli y se ilustran sus aplicaciones para el caso particular del flujo newtoniano.

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano, también se han realizado trabajos relacionados con los fluidos no newtonianos (Perona, 2003).

1.6- Descripción de las Instalaciones de la empresa Puerto Moa

La empresa está compuesta por diferentes instalaciones que prestan servicios a las empresas del territorio, las instalaciones son las siguientes:

- Base de combustible
- Base de Amoniaco
- Base de productos claros
- Base de transporte
- Planta de carbón
- Campo de boyas
- Muelles para las descargas de los Busques

La base de combustible es objetivo de este trabajo y comprende de tres etapas:

- Recepción del combustible
- Almacenamiento del combustible
- Descarga del combustible

Recepción del combustible

La recepción del combustible tipo fuel oil se hace a través del oleoducto constituido por una línea submarina con diámetro nominal 600 mm con una longitud aproximada de 1000 m, y una doble en tierra formada por dos líneas paralelas con diámetro 500 mm, a la entrada de la base de combustible se une a otra de igual diámetro, dando paso a los tanques de almacenaje a través de una línea de 400 mm de diámetro.

Almacenamiento del combustible

El sistema de almacenamiento del combustible se realiza de la siguiente manera:

- Crudo Mejorado 1 400, en los tanques 385P-TK-1, 2 y 3, con la capacidad de 20000 m³ cada uno
- Fuel Oil en los tanques 4 y 6, con la capacidad de 20 000 m³ cada uno
- Crudo pesado en el tanque 5, con la capacidad de 15 000 m³

La descarga a las diferentes empresas, se realiza a través de las bombas que se encuentran ubicadas en la estación de bombeo de la base de combustible, las bombas de desplazamiento positivo son utilizadas para manejar crudos y las centrifugas para el fuel oil.

1.6.1- Descripción del flujo tecnológico de la base de combustible

La base de combustible asimila la recepción de dos tipos de combustibles simultáneamente fuel-oil y Crudo mejorado, por sus características diferentes se recomendará el uso de Campo de Boyas para la recepción de fuel-oil y el Muelle 1 para la recepción del Crudo mejorado.

El sistema de descarga del combustible, consta de los siguientes objetos fundamentales

- Obra hidrotecnia: Campo de Boyas
- Oleoducto: Línea submarina y línea principal de tierra
- Tanques de almacenajes
- Muelle No.1, de descarga de combustibles
- Línea Muelle 1 hasta la base de combustible

El campo de boyas está formado por 4 anclas, de las cuales 3 se mantendrán ubicadas y siempre fijas en el fondo marino y una no permanente depositada por el propio buque, esta operación se ejecuta para asegurar la descarga del combustible. Las anclas mediante cadenas de acero y 4 boyas metálicas con señalización marítima, posibilitan 4 puntos de amarre en la superficie del mar.

Otras dos boyas mantendrán localizable el extremo de dos mangueras de goma flexible, de 250 mm de diámetro, que el buque con sus medios de izajes levantará y conectará a su sistema de bombeo a bordo para descargar el petróleo a una presión de (10 bar y 50 °C), de tal manera se considera que los buques tanques de 60 000 t trasiegan combustible con un flujo promedio de descarga de (2 000 a 2 700 t/h).

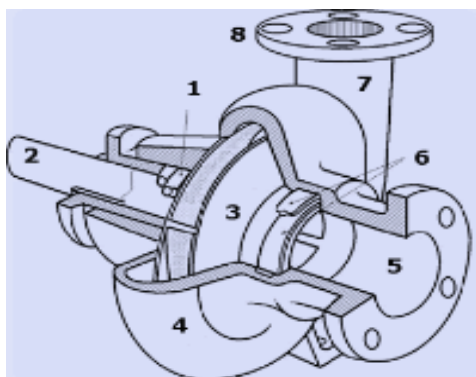
El oleoducto de tierra está formado por dos líneas paralelas de diámetro nominal de 500 mm y con una longitud aproximada de 2400 m. El material de las tuberías es de acero al carbono desnuda interiormente y con recubrimiento exterior en pintura de poliuretano.

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

El petróleo es transportado hasta el puerto de Moa en buques, teniendo dos puntos de recepción: Muelle No.1, de descarga de combustibles y el campo de boya. Por el muelle No.1 atracan los barcos cisternas, con capacidad para unas 28 000 t y por el campo de boya atracan los buques tanques con capacidad para 60 000 t. Ambos tipos de embarcaciones tienen instalado un sistema de calentamiento en sus depósitos que mantienen el petróleo a temperatura entre 60 y 70 °C.

Elementos que forman una instalación con una bomba centrífuga

Dentro de una cámara hermética dotada de entrada y salida gira una rueda (rodete). El rodete es el elemento rodante de la bomba que convierte la energía del motor en energía cinética. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete y este (alimentado por el motor) proyecta el fluido a la zona externa del cuerpo-bomba debido a la fuerza centrífuga producida por la velocidad del rodete. El líquido de esta manera almacena una energía (potencial) que se transformará en caudal y altura de elevación según la figura 1.2.



- | | |
|-------------|-----------------------|
| 1. Empaque | 2. Flecha. |
| 3. Rodete. | 4. Voluta |
| 5. Entrada | 6. Anillo de desgaste |
| 7. Difusor. | 8. Salida |

Figura 1.2. Elementos que integran las bombas centrífugas.

Principio del funcionamiento de las bombas de tornillos o de roscas

El líquido es transportado por medio de un tornillo helicoidal excéntrico que se mueve dentro de una camisa (estator). El núcleo inserto de la bomba es de fácil recambio. El accionamiento de los tornillos conducidos se realiza hidráulicamente.

En la gran variedad de las bombas de tornillo se encuentran los siguientes tipos:

- de un tornillo (cavidad progresiva)
- de doble tornillo

- de triple tornillo

Uso de las bombas de tornillos o de roscas

La bomba de tornillo es un equipo para bombear fluidos viscosos, con altos contenidos de sólidos, sin sufrir movimientos bruscos. Además se utilizan para bombear fangos de las distintas etapas de las depuradoras y son ampliamente utilizadas en la industria petrolera.

Detalles de funcionamiento de las bombas de tornillos

Un pistón regulador de la capacidad (1) con movimiento horizontal acciona a la válvula deslizante (2). Esta modifica el tamaño del orificio de escape (3), regulando así la capacidad de volumen de transporte, según la figura 1.3.

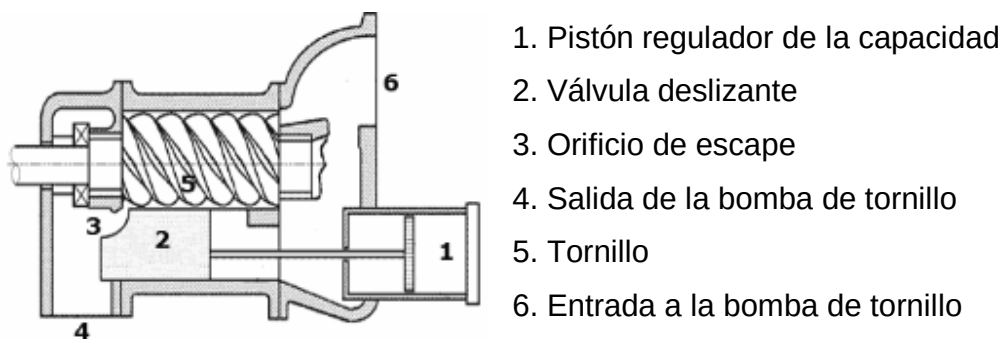


Figura 1.3. Elementos que integran las de tornillos.

Características Técnicas del tanque de almacenamiento No 5.

- Código: 385P-TK-5
- Propósito: almacenamiento de combustible
- Capacidad: 15 000 m³
- Altura: 11000 mm
- Diámetro Interior: 44 196 mm
- Techo: Cónico
- Espesor del tanque: 17.4 mm
- Diámetro del plato: 44842 mm
- Racor de entrada y salida: Diámetro 426 x 9mm

1.7- Breve descripción de los intercambiadores de calor

En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten realizar dicha tarea. Un entendimiento básico de los componentes mecánicos de los intercambiadores de calor es necesario para comprender cómo estos funcionan y operan para un adecuado desempeño.

Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura

Tipos de intercambiadores de calor según su construcción

Si bien los intercambiadores de calor se presentan en una inimaginable variedad de formas y tamaños, la construcción de los intercambiadores está incluida en alguna de las dos siguientes categorías: carcasa y tubo o plato. Como en cualquier dispositivo mecánico, cada uno de estos presenta ventajas o desventajas en su aplicación.

1.7.1- Funcionamiento de los intercambiadores de calor

La función general de un intercambiador de calor es transferir calor de un fluido a otro y pueden verse como un tubo por donde un flujo de fluido está pasando mientras que otro fluido fluye alrededor de dicho tubos, por tanto existen tres intercambios de calor que necesitan ser descritos:

1. Transferencia de calor convectiva del fluido hacia la pared interna del tubo
2. Transferencia de calor conductiva a través de la pared del tubo
3. Transferencia de calor convectiva desde la pared externa del tubo hacia el fluido exterior.

Estos equipos requieren grandes áreas para la transmisión de calor, que pueden ser obtenidas por un equipo multitubular que consiste en diversos tubos montados

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

paralelamente en el interior de una carcasa o coraza, los cuales son denominados intercambiadores de calor de tubo y coraza (Geankoplis, 1993).

Los intercambiadores son ampliamente usados y fabricados en muchos tamaños, con varios arreglos de flujo y de diversos tipos; pueden operar en grandes caídas de presión y temperatura. La facilidad de fabricación y el costo relativamente bajo constituyen la principal razón para su empleo ilimitado en las aplicaciones de ingeniería (Ozisik, 1990).

El Proyecto de un intercambiador de calor es un asunto complejo: la transferencia de calor, la pérdida de carga, el dimensionamiento, la evaluación del desempeño y los aspectos económicos juegan papeles muy importantes en el resultado final. La construcción de un intercambiador de calor puede ser dividido en tres fases principales: análisis térmico, proyecto mecánico preliminar y fabricación (Kern, 1999).

Entre los principales métodos de análisis térmicos encontrados en la literatura común, están los de Kern y Tinker. El primero es el más tradicional, pero acumula mayor número de errores, principalmente en el flujo del lado de la coraza, en las pérdidas de carga y en el flujo laminar. Por otro lado, el segundo, conocido por el análisis de las corrientes, es considerado el más completo, sirviendo de soporte para los métodos más desarrollados (Ozisik, 1990).

La figura 1.4 muestra distinta de manera la transferencia de calor y pérdida de carga para el lado de coraza (Tinker, 1999).

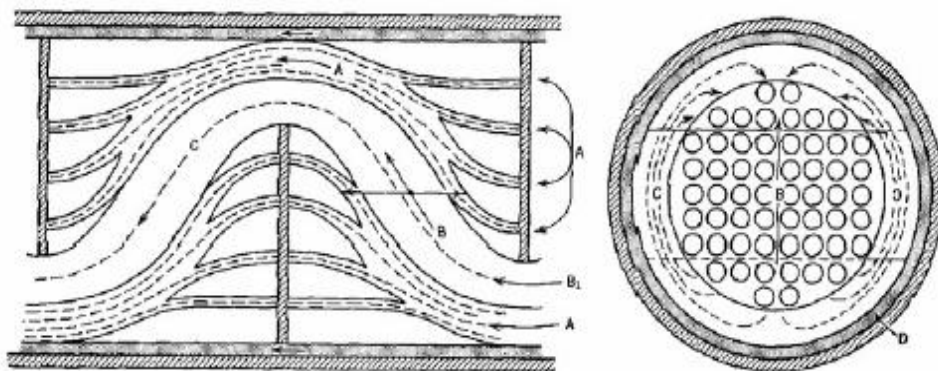


Figura.1.4 Flujo dividido en corrientes de Tinker en un intercambiador de calor de carcasa y tubos. *Fuente. Ozisik, (1990)*

Tinker (1999). Plantea que la clave para la solución del flujo a través de la coraza, consiste en dividirlo en una serie de corrientes separadas.

Aplicaciones de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se encuentran en muchos sistemas químicos o mecánicos. Estos sirven, como su nombre lo indica, para ganar calor o expeler calor en determinados procesos. Algunas de las aplicaciones más comunes se encuentran en calentamiento, ventilación, sistemas de acondicionamiento de espacios, radiadores en máquinas de combustión interna, calderas, condensadores, y precalentadores o enfriamiento de fluidos.

1.7.2- Tipos de intercambiadores de calor según su operación

Ya que los intercambiadores de calor se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes. Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido. Las tres categorías son: flujo paralelo, contraflujo y flujo cruzado.

Flujo paralelo

Como se ilustra en la figura 1.5, existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproxima la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos.

Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

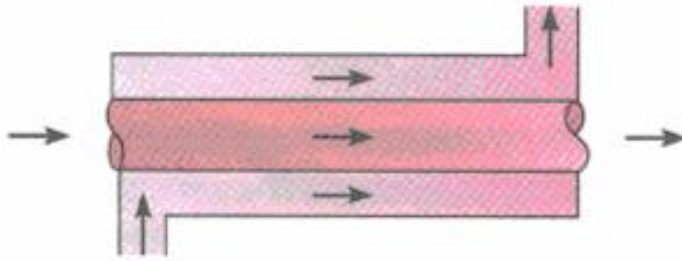


Figura 1.5. Intercambiador de calor de flujo paralelo.

Contraflujo

Como se ilustra en la figura 1.6, se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos, ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada.

Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que los otros dos tipos mencionados anteriormente. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador

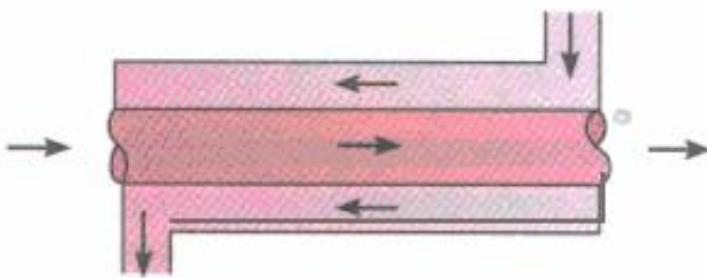


Figura 1.6. Intercambiador de calor de contraflujo.

El diseño térmico de los intercambiadores es un área en donde tienen numerosas aplicaciones los principios de transferencia de calor. Aunque las consideraciones de costos son muy importantes en instalaciones grandes, tales como plantas de fuerza y

plantas de proceso químico las consideraciones de peso y de tamaño constituyen el factor predominante en la selección del diseño.

Conclusiones del capítulo I

- Los residuales de petróleo en la empresa Puerto Moa, se encuentran poco estudiados a partir de sus propiedades físicas, químicas y reológicas.
- El análisis de los trabajos bibliográficos reportan algunas características químicas de los diferentes tipos de residuales y líquidos viscosos, pero las mismas son insuficiente para el estudio del residual analizado.
- No se reportan estudios experimentales relacionados con las propiedades físicas y reológicas más influyentes en la extracción y transporte para el material investigado en el trabajo.

CAPITULO II: MATERIALES Y METODOS

2.1- Introducción

Sobre la base de los conocimientos de las características y propiedades del residual petrolizado almacenado, contribuyen a la selección de métodos adecuados de evaluación y toma de decisiones en la solución del problema asociado a la fluidización del objeto de estudio en la Empresa Puerto Moa

Para el desarrollo de toda investigación se necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos, y es por eso que resulta indispensable una correcta toma de muestra, así como la aplicación de los métodos adecuados en aras del cumplimiento del objetivo propuesto.

En tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer los métodos y procedimientos experimentales para la obtención de las principales propiedades químicas – físicas y reológicas del residual petrolizado, así como los modelos matemáticos que describan el comportamiento del objeto de estudio a la temperatura y calor necesario de fluidización.

2.2- Características a tener en cuenta del sistema en estudio.

Partiendo de las características de la sustancia de trabajo en estudio y por los conocimientos empíricos adquiridos, no existe una ley que exprese la variación de la viscosidad ó densidad en función de la temperatura, que matemáticamente describa este proceso y sea útil para la aplicación práctica, por lo que sea tomado como referencia a un tanque circular recto de almacenamiento de petróleo, con una tubería de sección recta circular, para extraer este residual a una temperatura y presión mayor a la atmosférica, por lo que se determinarán algunas propiedades del fluido estudiando la relación entre la densidad (ρ) y la viscosidad (μ), en función de la temperatura (T), de modo que a efectos prácticos las propiedades del fluido estudiado esta dado por la curva para la ρ ó $\mu = f(T)$

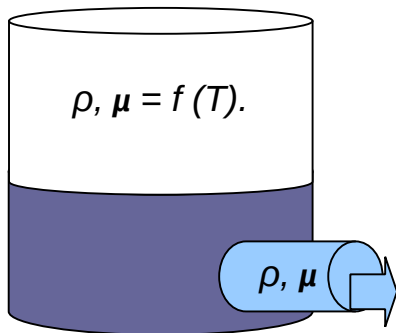


Figura 2.1. Residual petrolizado depositado en el fondo del tanque de almacenamiento.

Este recipiente contiene una altura de (35 cm) de un líquido en reposo muy viscoso llamado residual petrolizado depositado en el fondo del tanque de almacenamiento de petróleo y no puede ser extraído a presión y temperatura ambiente.

2.2.1- Toma y preparación de las muestras

La teoría del muestreo trata el problema de la selección adecuadas para lograr el objetivo de obtener la información deseada acerca de la población en estudio. En nuestro caso para la representatividad del muestreo, se emplea la selección del muestreo por conglomerados, que consiste en hacer una partición de la población en conglomerados o unidades de elementos y luego seleccionar una muestra aleatoria de conglomerados cuyos elementos formaran la muestra general. (Guerra, 2004).

Para la toma de las muestras generales (1, 2 y 3), se hace un compósito por cada conglomerado de residual es almacenándolo en un envase de 3 litros y es homogenizado para la realización de los experimentos y determinación de algunas propiedades física, química y reológica en los laboratorios químicos del CEINNIQ, ECG y ISMM de moa, certificados por la ISO 2000.

2.2.2- Determinación de la cantidad de residual depositado en el fondo del tanque.

El tanque es un cilindro por lo que el volumen del residual depositado puede calcularse según ecuación 2,1.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (2.1)$$

Donde:

V. Volumen del tanque; m³

π . Constante igual a 3,1416

r. Radio de la base

h. Altura del residual depositado en el tanque

2.3.- Determinación de las propiedades físicas del residual.

Para el análisis de las propiedades físicas del residual de combustible es necesario determinar el contenido de cenizas, punto de inflamación, carbón conradson, porcentaje de asfaltenos y otros. Los cuales necesitan de un equipamiento en específico y el uso de las normas que rigen estos procesos.

Análisis del punto de inflamación.

Utilizando el método analítico del punto de Inflamación, con el empleo de la norma cubana NEIB01 – 12 – 21: 1982 y el equipo del punto de inflamación a copa abierta según la figura 2,2. Se procede encendiendo el equipo (Cleveland – semiautomático), la muestra es colocada en el porta muestra a través de una cápsula de platino que contiene una marca estándar para la cantidad de muestra a analizar, se enciende el equipo y una plancha de calentamiento durante 5 ó 10 minutos, se coloca un termómetro dentro de la muestra para ir midiendo desde la temperatura ambiente hasta que aparezca la primera señal de humo (gases) y con un chispero (encendedor) se comienza a flamear la muestra cada un minuto, para observar en que instante de temperatura se enciende el combustible, determinándose el punto de inflamación.

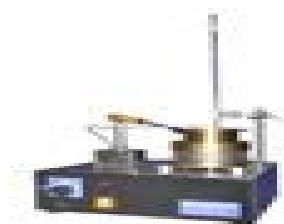


Figura 2.2. Equipo Cleveland – semiautomático del punto de inflamación.

Análisis del contenido de asfaltenos.

Utilizando el método analítico por gravimetría, con el empleo de las normas cubana NC: IP 143/90BSI2000: 199333-16:1984, y los equipos de reflujo con n-heptano y balanza como se muestra en la figura 2,3. Se procede a pesar un gramo (1 g) de la muestra (petróleo) en un Beaker de 250 ml añadiéndole 100 ml de n-heptano para disolver mejor la muestra y después envasarla en un Matraz aforado de 500 ml que se coloca en una plancha de calentamiento conectándole un serpentín en la parte superior, durante el

proceso de reflujo por espacio de una (1 h), luego se enfría, se lava la muestra con 40 ml de n-heptano y luego se coloca durante una hora el crisol con el contenido de la muestra en una estufa a 110°C , se enfría y finalmente se determina el porcentaje de asfalto.



Figura 2.3. Equipo de reflujo con n-heptano y balanza.

Análisis del contenido de carbón conradson.

A través del método analítico de conradson, con la norma cubana NC: 33-16:1985, utilizando el equipo de conradson representado en la figura 2,4. Se procede a la toma de un crisol de porcelana con capacidad de 50 ml se tara (se lleva a cero la balanza) y luego se pesa un gramo (1 g de la muestra (petróleo) en crisol colocándolo en el equipo de carbón conradson por espacio de 30 minutos, finalmente se enfría, se pesa y se determina el porcentaje de carbón conradson por diferencia de pesada.



Figura 2.4. Equipo analizador de carbón conradson.

.Análisis del contenido cenizas.

Utilizando el método analítico por gravimetría, con el empleo de las normas (NC: 33-16:1986) y los equipos de balanza, crisoles de porcelana y plancha como se muestra en la figura 2,5. Se toma un papel de filtro del tipo Whatman de 125 mm, luego se coloca el en fondo del crisol de porcelana, pesando seis gramos (6 g) de la muestra aproximadamente, se traslada sobre una plancha con temperatura de 110°C ,

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

encendiéndose la muestra juntamente con el papel mas los 10 ml de ácido clorhídrico (1:1) y cuando todo el papel se halla quemado, se coloca en una mufla a 900 °C por un tiempo de una hora (1 h), se baja, se enfría y finalmente se determina el porcentaje de ceniza por diferencia de pesada.



Figura 2.5. Equipo analizador de ceniza.

2.4.- Determinación de las propiedades químicas del residual.

La base del método, es la medición de la Emisión Atómica, por una técnica de Espectroscopia Óptica. La porción de ensayo es nebulizada, el aerosol producido es transportado al plasma, y se produce la excitación. Las líneas atómicas características del espectro de emisión son producidas por un plasma inductivamente acoplado por el equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica como se muestra en la figura2,6.



Figura 2.5. Espectrofotómetro de absorción atómica AA- 6601.

Modos de operación Absorción atómica

Con una lámpara de cátodo hueco, sin corrección de fondo,
con corrección de fondo mediante lámpara de deuterio

Absorción molecular

Para medición de absorción molecular y dispersión, usando la lámpara de deuterio.

Monocromador	Rango espectral: 190 a 900 nm Montaje: tipo Czerny-Turner con corrección de aberraciones. Distancia focal: 282 mm Red de difracción: holográfica, 1800 líneas/mm Ancho de banda: 0,1- 0,2 - 0,5 - 1,0 - 2,0 y 5,0 nm (cambio automático en 6 pasos)
Detector	Fotomultiplicador R-787-04
Lámparas de cátodo hueco	Frecuencia: 500 Hz (método de la lámpara de deuterio); 100 Hz (método de auto-inversión) Corriente: 0-60 mA (nivel bajo) - 0-600 mA (nivel alto, método SR), para 8 lámparas de cátodo hueco, con posicionamiento automático controlado por la computadora.
Torreta de lámparas	Dos lámparas pueden ser encendidas simultáneamente, una en uso y la otra en pre-calentamiento para análisis multi-elemento secuencial.
Software	Basado en MS-Windows™ 95
Requerimientos ambientales	Temperatura: 10~35 °C Humedad: 45~80 %
Requerimientos eléctrico	220 V, 50/60 Hz y 6 kVA con horno, 600 VA sin horno

2.4.1-Análisis del contenido de los elementos químicos disueltos en el residual.

Utilizando el método analítico de espectrofotometría por absorción atómica, con el empleo de la norma NC: 33 – 31: 1985. Se pesan 0.5 g de la muestra, tratada con una dilución de ácido clorhídrico y ácido nítrico en proporción 3:1, la misma se lleva a sequedad y luego se disuelve con ácido clorhídrico al 1:1 y luego se determina por ciento del contenido de elementos químicos disueltos en el residual, representada en la ecuación 2,1

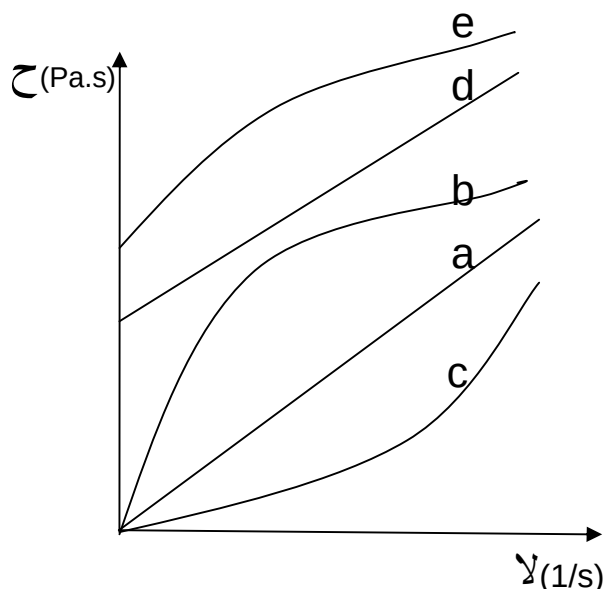
$$\% = \frac{mg / l}{10^6} \times \frac{diluciones}{aliquota} \quad (2,2)$$

2.5.- Determinación de los modelos reológicos del residual.

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican reológicamente en newtoniano y no newtoniano (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988; Díaz, 1989). A su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos. Se establece la caracterización de los principales factores y parámetros relacionados a las propiedades de transporte de fluidos complejos y en específico a los casos de estudio, donde los modelos más difundidos son los tratados en este tópico por (Kasatkin, A 1985 y otros).

2.5.1.- Curvas de flujo.

En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad representada en la figura 2.7, que al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.



La figura 2.6. Muestra las curvas de flujo típico

a) Newtonianos; b) Seudoplásticos; c) Dilatantes; d) Plástico ideal (Bingham; e) Plástico real. (Garcell, 2001).

La experiencia demuestra que todos los gases y los líquidos homogéneos son fluidos newtonianos; la baja viscosidad de estos fluidos se mantiene constante respecto a los

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

cambios en la magnitud del esfuerzo cortante y del gradiente de velocidad

$$\left(- \frac{dv_x}{dy} \right) = (\gamma') \text{ (Figura 2.6, curva -a), entonces } \tau = \mu \cdot (\gamma') \quad (2,3)$$

Donde:

τ . Esfuerzo cortante del fluido; Pa

γ' . Gradiente de velocidad del fluido; s^{-1}

μ . Viscosidad del fluido; Pa.s

2.5.2- Flujo de viscosidad independiente del tiempo.

Seudoplásticos: Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante (para $n > 0$). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para $n < 1$). (Figura 2.6, curva -b).

$$\tau_{x,y} = K \cdot (\gamma')^n \quad (2,4)$$

Donde:

$\tau_{x,y}$. Esfuerzo cortante según Ostwald; Pa

n. índice de la ley de potencia; adimensional

k. Índice de consistencia; Pa.s

$(\gamma')^n$. Gradiente de velocidad; s^{-1}

El parámetro n es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para $n < 1$ el fluido es seudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante. Para $n = 1$, la ecuación 2,4 se transforma en la ley de Newton, siendo $k = \mu$. El parámetro k es el índice de consistencia, el cual da una medida del grado de viscosidad del material. Para los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente (μ_a), de acuerdo con la ecuación 2,5 la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma'} \quad (2,5)$$

Donde:

μ_a . Viscosidad aparente; Pa.s

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

τ . Esfuerzo cortante; Pa

$^o\gamma$. Gradiente de velocidad; s^{-1}

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (2,4) se obtiene la ecuación (2,6)

$$\mu_a = K \cdot (\gamma)^{n-1} \quad (2,6)$$

Donde:

μ_a . Viscosidad aparente; Pa.s

K. Índice de consistencia; Pa.s

γ^{n-1} . Gradiente de velocidad; s^{-1}

Dilatantes: Sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau_o > 0$). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para $n > 1$), ver figura 2.6, curva – c.

Plásticos ideales: Se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo cortante inicial, que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir. El modelo de Bingham se escribe en la curva – (d), que se representa en la figura 2.6.

$$\tau_{x,y} = \tau_o + \mu_p \cdot (\gamma) \quad (2,7)$$

Donde:

$\tau_{x,y}$. Esfuerzo cortante según Bingham; Pa

τ_o . Esfuerzo cortante inicial; Pa.

μ_p . Viscosidad plástica; Pa.s

γ . Gradiente de velocidad; s^{-1}

Para $\tau_o = 0$, la ecuación 2.8, se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu_o$. La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene, combinando la ecuación 2,7 en la ecuación 2.5. Como se muestra en la ecuación 2,8.

$$\mu_a = \mu_p + \left(\frac{\tau_o}{\gamma} \right) \quad (2,8)$$

Donde:

μ_a . Viscosidad aparente; Pa.s.

Plásticos reales: Sus viscosidades también disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que τ_o sigue el modelo de Herschel – Bulkley. (Figura 2.6, curva -e), según la ecuación 2,9.

$$\tau_{x,y} = \tau_o + k \cdot (\dot{\gamma})^n \quad (2,9)$$

Donde:

$\tau_{x,y}$. Esfuerzo cortante según Herschel – Bulkley; Pa

Los parámetros índice de consistencia, índice de la ley de potencia y esfuerzo cortante inicial, se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales, para $n = 1$ la ecuación 2,9 se transforma en el modelo de Bingham para $\tau_o = 0$, mientras que en el modelo Ostwald de Waele para $\tau_o = 0$ y $n = 1$ se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan las ecuaciones 2,8 y 2,4, se obtiene la expresión de la viscosidad aparente, según la ecuación 2.10.

$$\mu_a = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + k \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (2,10)$$

2.6.- Diseño de experimentos.

Para la confirmación de la hipótesis científica se escogió un diseño de experimento factorial completo (Gutiérrez y De la Vara, 2003), con dos variables y tres niveles. Este método de planificación estadística de la investigación, establece el número de ensayos a realizar.

El residual se somete a la acción de un proceso de calentamiento a diferentes condiciones de temperaturas, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo en la calidad de la fluidez del residual el proceso térmico. Teniendo en cuenta que no se dispone de elementos que permitan fijar de antemano los valores de aquellas variables que definan la calidad del proceso, se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en el sistema que se considera que son las más importantes:

- Temperatura

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

- Gradiente de velocidad
- Esfuerzo cortante

Es conocido que el diseño de sistemas de almacenamiento requiere conocer la relación entre los gradientes de presión, requeridos para lograr flujos volumétricos, en diferente intervalo del diámetro del tanque, a distintas temperaturas de operación y diferentes propiedades físicas de los fluidos. En la Figura 2.6 esquema estructural de los parámetros principales del proceso.

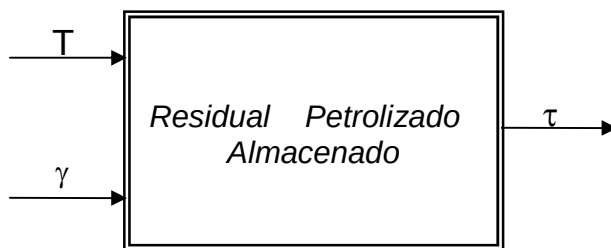


Figura 2.7- Esquema estructural del proceso de calentamiento en el residual.

Los parámetros de entrada del proceso son:

T_{ent}. Temperatura del residual a la entrada del reómetro; °C

γ . Gradiente de velocidad; s^{-1}

Como parámetros de salida se destacan los siguientes:

τ . Esfuerzo cortante; (Pa)

Temperatura ejercida sobre el residual petrolizado: Variable cuantitativa, inversamente proporcional a las variables de salidas y se relaciona con las propiedades físicas-mecánicas a obtener en el residual con el incremento del calor en todo el sistema.

Esfuerzo cortante en el residual: Variable que define el comportamiento de la presión en función del modelo reológico a obtener y está relacionado con los valores del gradiente de velocidad, a mayor presión mayor velocidad y menor tiempo de salida del producto a evaluar.

El número de experimento cuando intervienen k factores con tres niveles cada uno ($-1, \Delta$ y $+1$), se determina con un arreglo de la función exponencial $N = 2^k$, donde se realizaron ocho experimento por cada muestra para un total de 24 replicas

2.7.- Determinación de las propiedades reológicas.

El esquema detallado de la instalación aparece en la figura 2.8, donde (D^o) es un depósito hermético de acero inoxidable en el cual se introduce el residual petrolizado almacenado a la temperatura de fluidización, a través del embudo (E), que está comunicado con el depósito mediante la válvula (V_3). La presión se transmite al depósito mediante la tubería (T_p), gracias a la válvula (V_1), midiéndose dicha presión con un transductor de presión conectado al indicador digital (ID).

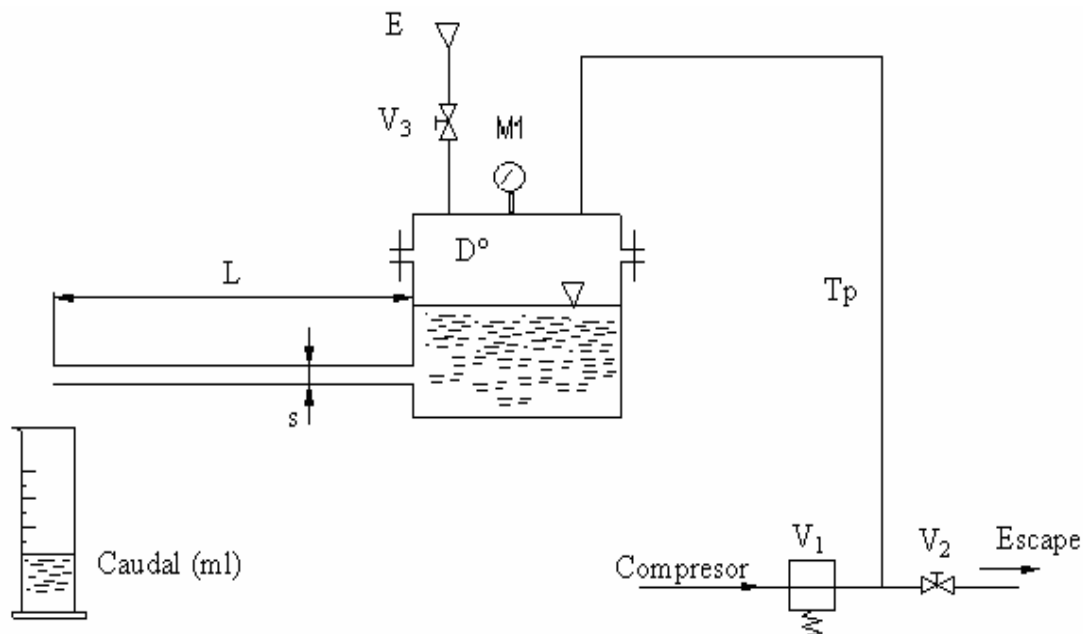


Figura 2.8- Esquema detallado de la instalación.

El manómetro ($M1$) mide la presión relativa entre 0 y 9 kgf/cm^2 . La presión en el interior del depósito se irá regulando mediante la válvula (V_1), a base de aumentar o reducir el caudal de aire comprimido que desde el compresor del laboratorio llega a su entrada., esta presión también se puede regular con la instalación de la válvula de escape (V_2), variando su apertura manteniendo (V_1) en una posición concreta.

En resumen, para el desarrollo de los experimentos se utilizaron una probeta de cristal con capacidad de 1000 ml, un termómetro con una escala de temperatura de 0 a 300°C , un manómetro con una escala de presión de 0 a 9 kgf/cm^2 , un compresor de aire con capacidad de 15 kgf/cm^2 y un reómetro cilíndrico vertical de acero inoxidable, mas 3 muestras de 3 litros de residual petrolizado (muestras).

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

Las lecturas de presión se tomarán del manómetro (M1), conociendo el diámetro del tubo (D), su longitud (L), se puede determinar las propiedades reológica a partir de los parámetros establecidos, donde el caudal será igual a la ecuación 2,11.

$$Q = \frac{v}{S} \quad (2,11)$$

Donde:

Q. Caudal del fluido; m³/s

V. Velocidad media; m/s

S. Área de la sección del tubo; m²

Donde la sección del tubo se determina según la ecuación 2,12.

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2,12)$$

Donde:

D. Diámetro del tubo; m

π . Constante igual a 3.1416

Conocida la velocidad se calcula el esfuerzo cortante por la ecuación 2,13.

$$\tau = \frac{D \cdot \Delta P}{4 \cdot L} \quad (2,13)$$

Donde:

τ . Esfuerzo cortante del fluido; Pa

L. Longitud del tubo; m

ΔP . Diferencia de presión; N.m²

Finalmente se determina el gradiente de velocidad por la ecuación 2,14.

$$\gamma = \frac{8 \cdot v}{D} \quad (2,14)$$

Donde:

γ Gradiente de velocidad; s⁻¹

La diferencia de presión (ΔP) entre la entrada y la salida del dispositivo (medida en atmósfera), y que a partir de estos parámetros se puede determinar a diferentes temperaturas la viscosidad ó densidad del residual. Si la masa (m) de un fluido contenido

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

en la unidad de volumen (V) del mismo se denomina densidad (ρ) y se determina por la expresión 2,15

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2,15)$$

Donde:

ρ . Densidad del fluido; kg/m³

m. Masa del fluido; kg

V. Volumen del fluido; m³

Mientras que la viscosidad dinámica (μ) se determina por la ecuación 2,16.

$$\mu = \tau / \gamma \quad (2,16)$$

Donde.

τ . Esfuerzo cortante de rozamiento interior; Pa

γ . Gradiente de velocidad; s⁻¹

2.8- Flujo de calor máximo suministrado al sistema

Al incrementarse la temperatura del residual, este absorbe calor, que se hace pasar a través de un cambio de temperatura sobre todo el sistema y ejerciéndole una presión mayor a la atmosférica en un tiempo determinado, donde se logra disminuir la viscosidad del residual con el fin de ser extraído totalmente del recipiente. De tal manera que el balance de energía quedaría expresado por la ecuación 2,18 con la modificación de la ecuación general de Fourier integrada para un flujo permanente, donde toda la energía en forma diferencial de temperatura en un tiempo límite, se convierte en su totalidad en calor.

$$\frac{dT}{dt} = q \quad (2,18)$$

$$q_{\text{máx}} = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2,19)$$

Donde:

$q_{\text{máx}}$. Calor que recibe el sistema a la temperatura de fluidización; kW

ΔT . Temperatura de calentamiento ó de fluidización; K

ρ . Densidad del residual a la temperatura de calentamiento ó fluidización; kg/m³

Cp. Calor específico del residual; kJ/kg.k

V. Volumen del residual a la temperatura de calentamiento ó fluidización; m³

2.8.1- Características principales del sistema de calentamiento.

➤Equipo	Intercambiador de calor de espiral y haz de tubo (Anexo. 2)
➤Fabricación	URSS en 1999
➤Función del equipo	Calentar el petróleo almacenado
➤Longitud de los tubos	5 m
➤Espesor de los tubos	0,005 m
➤Material de construcción	Acero AC - 30
➤Conductividad térmica	50 W/m K
➤Diámetro interior del tubo	0,045 m
➤Diámetro exterior del tubo	0,05 m
➤Diámetro de la espiral	45 m
➤Números de tubos en el calentador	66

El combustible estudiado a la temperatura de (50, 60 y 70°C); presentó un comportamiento pseudoplástico, cuyas propiedades físicas y químicas fueron obtenidas de los trabajos de Durán y Castillo *et al.* (2008).

2.8.2- Metodología de cálculo del intercambiador de calor instalado

El cálculo de la transferencia de calor se divide en dos partes, para el interior y exterior de los tubos. La modificación de la ecuación general de Fourier, integrada para un flujo permanente puede ser igualada a un balance entálpico, siendo la transferencia de calor transmitido (Q), el consumo de vapor (D) y la variación de temperatura necesaria para calentar el fluido mas frío (Δt_m), expresada por la ecuación 2,20, según (Incropera, 2002 y Perry, 1987), con la tabulaciones de las propiedades de los líquidos y gases.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (2,20)$$

Donde:

q. Transferencia de calor real; KJ/s

U. Coeficiente global de transferencia de calor; KJ/m²K

A. Área de transferencia de calor; m²

Δt_m . Diferencia media logarítmica de temperatura; °C

Calculo de la diferencia media logarítmica de temperaturas

Como el intercambiador propuesto tendrá flujo en constante, la temperatura de entrada del flujo caliente ($T_1=403$ K), la temperatura de entrada del flujo frío ($t_1=305$ K), la temperatura de salida del flujo caliente ($T_2=353$ K), la temperatura de salida del flujo frío ($t_2=343$ K) y que la (MLDT) será por la ecuación 2,21.

$$MLDT = \left(\frac{\Delta T_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta t_1}} \right) \quad (2.21)$$

Calculo del área total de intercambiador de calor

Se determinó el cálculo del área de la superficie de intercambio de calor (A), puede expresarse por la ecuación 2,22.

$$A = n \cdot \pi \cdot L \cdot D_e \quad (2.22)$$

Donde:

n . Número de tubos en el intercambiador; 58

L . Longitud de los tubos en el intercambiador; 5 m

D_e . Diámetros exterior de los tubos; 0,05 m

Cálculo del coeficiente global de transmisión de calor

Como la pared es delgada y el material buen conductor de calor sus resistencia térmica es despreciable, entonces para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor (U), se puede expresar por la ecuación 2,23

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (2.23)$$

Donde.

h_i, h_e Coeficiente de calor convectivo por el interior y exterior de la tubería (kW/m² K)

El análisis de la convección en una capa limite es compleja, por lo que es frecuente el empleo del análisis adimensional o técnica analógicas y para la convección forzada se obtiene por la expresión 2,24.

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^b \quad (2.24)$$

Donde:

Nu . Criterio de Nusselt

Re . Numero de Reynolds

Pr . Numero de Prandtl

El Criterio de Nusselt caracteriza la similitud de los procesos de transporte de calor en la frontera entre la pared y la corriente del fluido, relacionando el espesor de la capa límite y la dimensión geométrica determinante (para un tubo – su diámetro), incluyendo para el intercambio térmico el coeficiente convectivo (h_i), como se relaciona en la ecuación 2,25.

$$Nui = \frac{h_i \cdot Di}{k} \quad (2.25)$$

Donde h_i se obtiene primero calculando el (Re), con viscosidad $\mu = 134,4 \cdot 10^{-7} N \cdot s / m^2$, el coeficiente de conducción es $K = 26,1 \cdot 10^{-3} W / m \cdot K$, del vapor a la temperatura de 403 K, según tabla A,4 (propiedades termodinámica del material) y $\dot{m}_c = 1,03 kg / s$ definida como el flujo de vapor por el interior del tubo expresada por la ecuación (2,26) y como el criterio que decide si el flujo es laminar o turbulento en convección forzada es el valor del Número de Reynolds.

Para un tubo: $Re < 2300 \rightarrow$ Flujo Laminar y $Re > 2300 \rightarrow$ Flujo Turbulento.

$$Rei = \frac{4 \cdot \dot{m}_c}{\pi \cdot Di \cdot \mu} \quad (2.26)$$

Como el régimen del flujo de vapor caliente calculado que circula por el interior del tubo es turbulento, el criterio de Prandtl a la temperatura de 403 K será igual a $Pr = 1,04$ y está enteramente compuesto de magnitudes físicas del fluido y caracteriza la similitud de propiedades físicas de los caloportadores en intercambio térmico convectivo.

El régimen es turbulento y usando la ecuación (2,27), se calcula el Nusselt.

$$Nui = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^n \quad (2.27)$$

Donde $n = 0,4$ para el calentamiento ($T_s > T_m$) y $0,3$ para el enfriamiento ($T_s < T_m$) y se cumple para los siguientes condiciones.

$$\left[\begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 160 \\ Re \geq 10000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

Cálculo del coeficiente de calor convectivo para el exterior de los tubos

Como el flujo está almacenado, el coeficiente de calor conectivo a través de unos arreglos de tubos en el intercambiador de calor estudiado, presentado por (Fraas, A 1989) según la ecuación (2,28), que a 343 K de temperatura, el combustible almacenado tiene una viscosidad $\mu = 5,31 \cdot 10^{-2} N \cdot s / m^2$ y $\mu = 1,86 \cdot 10^{-2} N \cdot s / m^2$ en la pared del tubo, con un $C_p = 2.076 kJ / kg \cdot k$, siendo la conductividad térmica del petróleo; $K = 139 \cdot 10^{-3} W / m \cdot k$.

$$Nue = \frac{h_e \cdot D_e}{12k_s} = \left(\frac{\mu_e \cdot Cp}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_e}{\mu_p} \right)^{0,14} \quad (2.28)$$

Donde:

C_p . Calor específico del combustible; kJ/kg.k

μ_e Viscosidad del combustible; kg/s

μ_p . Viscosidad del combustible en la temperatura de la pared; (g/s

k . Conductividad térmica del petróleo; W/m.k

D_e . Diámetro exterior de los; m

Luego se determina el coeficiente de calor por convección por el exterior de los tubos con la ecuación (2,29)

$$h_e = \frac{12k}{De} \cdot Nu_e \quad (2.29)$$

Análisis de la efectividad del intercambio de calor

Con las características fundamentales del flujo de vapor en el interior del tubo igual a ($m_c = 1,03 \text{ Kg/s}$) a una temperatura de entrada de ($T_1 = 130^\circ \text{C}$) y ($T_2 = 80^\circ \text{C}$) a la salida, capacidad calorífica de ($C_p = 2,014 \text{ Kj/Kg.K}$), y las temperatura de entrada ($t_1 = 32^\circ \text{C}$) y ($t_2 = 70^\circ \text{C}$) del combustibles a calentar, procedemos a determinar la efectividad de

trabajo del intercambiador de calor instalado. Un parámetro fundamental en los equipos de transferencia de calor, es la efectividad con que trabajan los calentadores durante el proceso de intercambio de calor, y siendo la relación entre la transmisión de calor real y la transmisión de calor máxima posible, expresada por la ecuación. 2,30.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (2.30)$$

2.8.3- Cálculo del consumo de vapor para calentar el combustible

Finalmente el cálculo de la cantidad de vapor que se necesita para calentar el volumen necesario de combustible a las diferentes temperaturas, según la ecuación 2,31.

$$D = U \cdot A \frac{(T_1 - t_2)'}{I'' - I_s'} e^{-\frac{UA\tau}{G_v C_{p_v} t_{comb}}} \quad (2.31)$$

Donde:

D . Cantidad de vapor necesaria; kg/h

I'' y I_s' . Entalpía del vapor a la salida y entrada de la superficie; KW/kg

2.9- Características del sistema de bombeo

A partir de la experiencia experimental y la toma de datos, es posible la confección de las curvas características para la bomba instalada en la Empresa Puerto de Moa. Como, la energía suministrada por la bomba en metros, la potencia de eje y la de eficiencia. Estos datos servirán para calcular, mediante determinadas relaciones, que se indicarán mas adelante, la altura, eficiencia y potencia de la bomba de tornillo tipo: R-02/SDM-PT-46, representada por la instalación de bombeo en la figura 3,2.

Datos de catalogo del Fabricante de la bomba

Marca: WOUTTUIN-B.V

Destino: Bombeo combustible: Puerto - Che Guevara, Puerto - Moa Níkel

Tipo: R-02/SDM-PT-46

Caudal: 154 m³/h

Altura de presión: 27.7 kgf/cm²

Eficiencia: 0,75

Velocidad de Rotación: 1160 rpm

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

Motor serie BAO

Potencia nominal: 288 kW.

Asíncrono, trifásico de 2 polos

Velocidad: 1180 rpm

Frecuencia 60 Hz

Motor: Destinado para el régimen continuo de trabajo alimentado por una red de corriente alterna con frecuencia a 60 Hz en una instalación de hasta 660 Volts.

2.9.1 –Metodología de cálculo

Una de las leyes fundamentales de la mecánica de los fluidos se expresa mediante la ecuación de balance de energía mecánica aplicada al sistema de flujo en cuestión. En la mayoría de los textos de Ingeniería Química, el balance de energía mecánica para condiciones estacionarias de flujo se conoce como ecuación de Bernoulli, y se ilustra sus aplicaciones para el caso particular del flujo turbulento que se analiza en este caso presentado en la figura 2.9, para esta instalación.

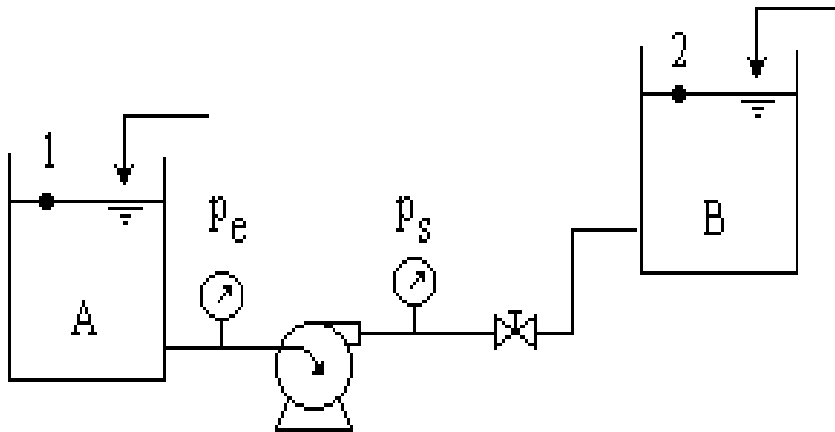


Figura 2.9 Esquema de la instalación de bombeo.

En el caso específico del flujo de suspensiones minerales no newtonianas también se aplica el balance de energía mecánica en un sistema de flujo, al cual entra el fluido por un plano (1) y sale por un plano (2), según la expresión 2,32

$$H_e + \frac{P_e}{\rho \cdot g} + \frac{v_e}{2g_e} = H_s + \frac{P_s}{\rho \cdot g} + \frac{v_s}{2g_s} \quad (2.32)$$

Donde:

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

(El subíndice (e) indica entrada y (s) salida).

V. Velocidad del fluido; m.s

P. Presión; N.m²

H. Altura; m

g. Aceleración de gravedad; m.s²

ρ. Densidad del fluido; kg/m³

Como $V_e \approx V_s$ y $H_e \approx H_s$, así el término para la energía entregada por la bomba al fluido, expresada en altura (ΔP) determinada por la ecuación 2,33

$$H_{total} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (2.33)$$

Como la bomba está acoplada a un motor eléctrico trifásico, al cual se le suministra una potencia P_{mot} dada por la ecuación 2,34.

$$P_{mot} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \quad (2.34)$$

Donde:

$U \cdot I$: Tensión (V) y corriente(A), que entra al motor

$\cos \phi$: Factor de potencia del motor, que oscila desde (0,7 hasta 0,9)

Para calcular la potencia en el eje del motor eléctrico, es el producto de la potencia del motor y el rendimiento del eje de transmisión del motor (η), que es de 0,95, con un 0,05 porciento de pérdidas mecánica y rozamiento, de esta forma se calcula mediante la expresión 2,35.

$$P_{eje} = P_{mot} \cdot \eta \quad (2.35)$$

Conocidas estas dos potencias se calcula la eficiencia del motor eléctrico:

$$\eta_{mot} = \frac{P_{ele}}{P_{mot}} \quad (2.36)$$

Por último la potencia de la bomba (P_{Bomba}), expresada por la ecuación 2,37

$$P_{Bomba} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3}}{\eta_{motor}} \quad (2.37)$$

Donde:

Q. Caudal del líquido; m³/s

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

Así la eficiencia de la bomba η_b se determina por la expresión 2,38.

$$\eta_{Bomba} = \frac{P_{Bomba}}{P_{mot}} \quad (2.38)$$

Entonces la potencia total de la instalación (P_{inst}), se calcula a base de la magnitud (P_{mot}), teniendo en cuenta la posibles sobrecargas durante la puesta en marcha de la bomba, que surge con motivo de la necesidad de superar la inercia de la masa del liquido en reposo, según la expresión 2,39.

$$P_{inst} = \beta \cdot P_{mot} \quad (2.39)$$

Donde:

β : Coeficiente de reserva de potencia, su valor se define a tenor de la magnitud nominal de la potencia del motor, que en nuestro caso toma el valor de 1.1, por que la potencia del motor sobrepasa los 50 Kw., según (Kasatkin, 1985).

Conclusiones parciales del capítulo II

- Los métodos y técnicas experimentales utilizadas para el análisis están fundamentadas a partir de la necesidad de la descripción, caracterización del residual petrolizado y su comportamiento reológico para su extracción.
- Se desarrolla el procedimiento matemático para el cálculo del intercambiador de calor y bomba instalada en el tanque de almacenamiento de petróleo, para la posible extracción del residual a partir de los parámetros de trabajos propuesto.

CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1- Introducción

El estudio de las propiedades físicas, químicas del residual petrolizado depositado en el fondo de los tanques de almacenamiento de utilizado en la empresa "Puerto Moa", son de gran importancia en la caracterización del material objeto de estudio, lo que permitirá un análisis de la reología del material y el comportamiento de parámetros de calentamiento y extracción del residual petrolizado, sí el suministro de vapor recalentado que entra al intercambiador de calor a la temperatura de 130°C y 2,6 atmósfera de presión.

A partir de este planteamiento **el objetivo** de este capítulo es:

Analizar los resultados experimentales expuestos en el capítulo precedente

3.2- Determinación de las propiedades físicas del residual

Los resultados del análisis físico de la muestra de residual petrolizado depositado en los tanques de petróleo instalado en base de petróleo se muestran a continuación.

Análisis del punto de inflamación

El punto de inflamación como el menor valor del combustible, nos permite conocer las temperaturas de trabajo en el proceso de calentamiento, evitando cualquier negligencia que produzca un incendio, según se muestran en la figura 3,1.

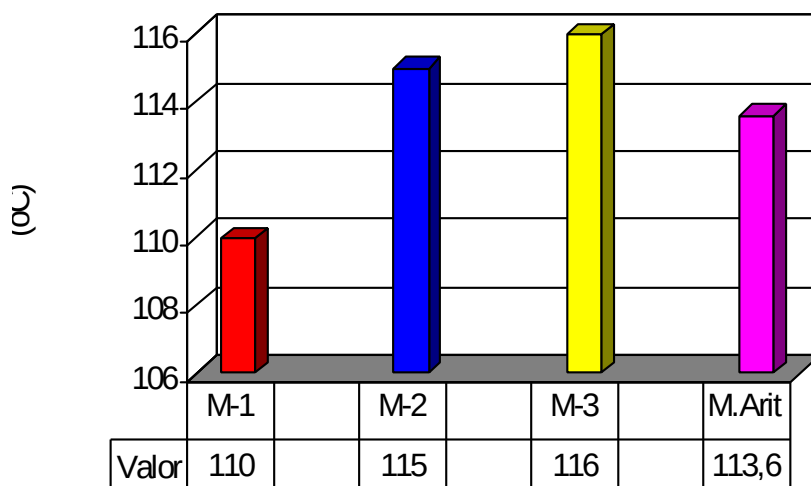


Figura 3.1. Comportamiento del punto de inflamación contenido en el residual.

Análisis del contenido de asfaltenos

Los resultados en el análisis de asfaltenos indican que las muestras poseen valores altos de hidrocarburos, disuelto en el contenido de asfaltenos del residual petrolizado que debe ser aprovechado en los procesos productivos de nuestro entorno, según se muestran en la figura 3,2.

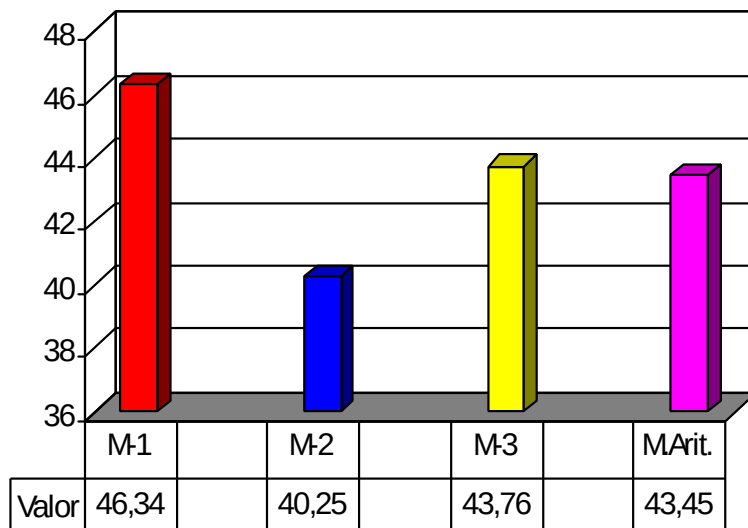


Figura 3.2. Comportamiento del porcentaje de asfalteno contenido en el residual

Análisis del contenido de carbón conradson

Los valores obtenidos de carbón conradson son bajos y no interviene negativamente en la calidad del residual, según se muestran en la figura 3,3.

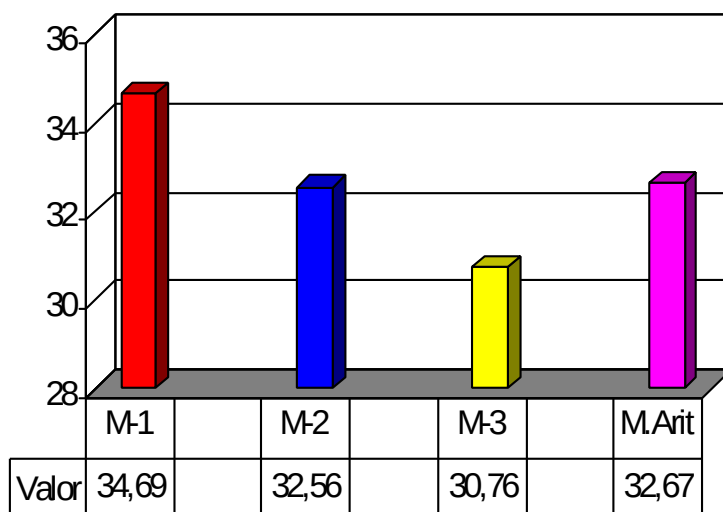


Figura 3.3. Comportamiento del porcentaje de carbón conradson en el residual.

Análisis del contenido cenizas

Los resultados del contenido de cenizas, aunque posee valores pequeños de impurezas minerales (aluminio, hierro, calcio, silicio y otras), intervienen negativamente en la calidad del residual en proceso de combustión, según se muestran en la figura 3,4.

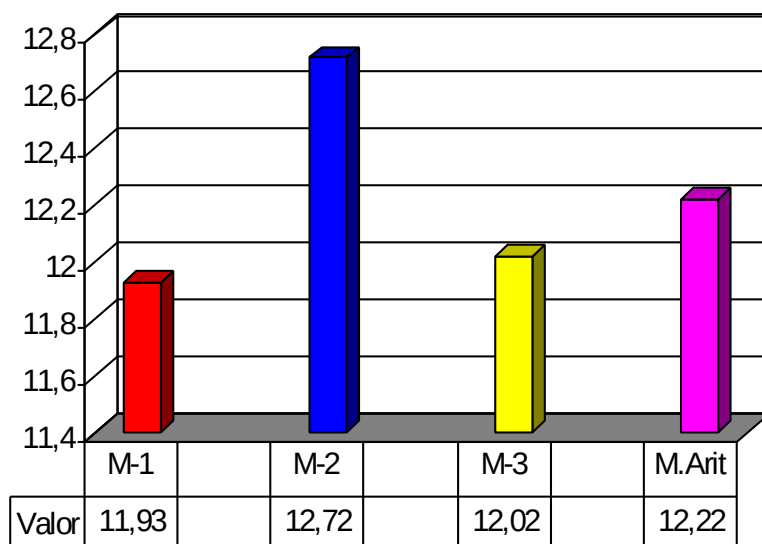


Figura 3.4. Comportamiento del por ciento de cenizas contenido en el residual

3.3- Determinación de las propiedades químicas del residual.

Sobre la base de estos resultados, se puede afirmar que el residual contiene un alto por ciento de elementos metálicos (hierro, aluminio y silicio), que afectan la combustión, como se muestran en la figura 3,5.

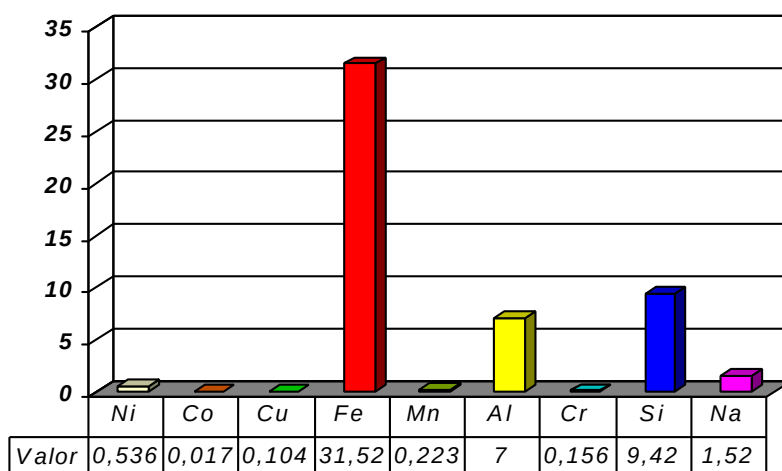


Figura 3.5.- Representa el por ciento de elementos químicos en el residual

3.4- Resultados experimentales de las propiedades reológicas

Los resultados del análisis reológico del residual de petróleo almacenado se determinaron mediante un reómetro de tubo capilar, algunos factores como viscosidad, gradiente de velocidad, esfuerzo de corte y temperatura se tuvieron en cuenta, comprobando su efecto sobre el comportamiento de las curvas de flujo, las cuales fueron obtenidas graficando los valores de esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación, estas curvas permitirán clasificar el residual petrolizado y obtener los modelos reológicos que lo caracterizan.

En la tabla 3.1 se relacionan los valores de esfuerzo cortante y gradiente de velocidad obtenidos en cada una de las pruebas realizadas al residual petrolizado para los diferentes valores de temperatura analizados (50, a 70 °C) obtenidas a partir del calentamiento del residual, permitiendo determinar los valores de viscosidad aparente.

Tabla 3.1. Resultados de esfuerzo cortante y gradiente de velocidad

Gradiente de velocidad	Temperaturas (°C)		
	70	60	50
γ (1/s)	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)
67,40	315,54	386,15	450,88
79,97	323,63	392,03	456,03
100,38	328,78	399,39	462,65
120,95	335,40	406,01	469,26
152,20	342,75	412,63	475,88
205,13	350,85	420,72	483,98
224,67	358,20	427,34	487,65
277,53	364,82	435,43	493,54
337,01	372,91	442,05	500,16
428,92	384,68	462,65	508,25

A partir de los resultados de las propiedades reológicas del residual petrolizado almacenado, se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante (τ) en función de la velocidad de deformación (γ), a diferentes temperaturas, observándose un aumento

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

proporcional en los valores de gradiente de velocidad, a medida que se incrementan los valores de esfuerzo cortante.

Las pseudocurvas de flujo obtenidas para el residual petrolizado almacenado se representan en la figura 3,6. En cada caso se define el comportamiento del residual teniendo en cuenta las curvas características de los modelos reológicos establecidos en la literatura. (Garcell, 2001 y Skelland, 1970).

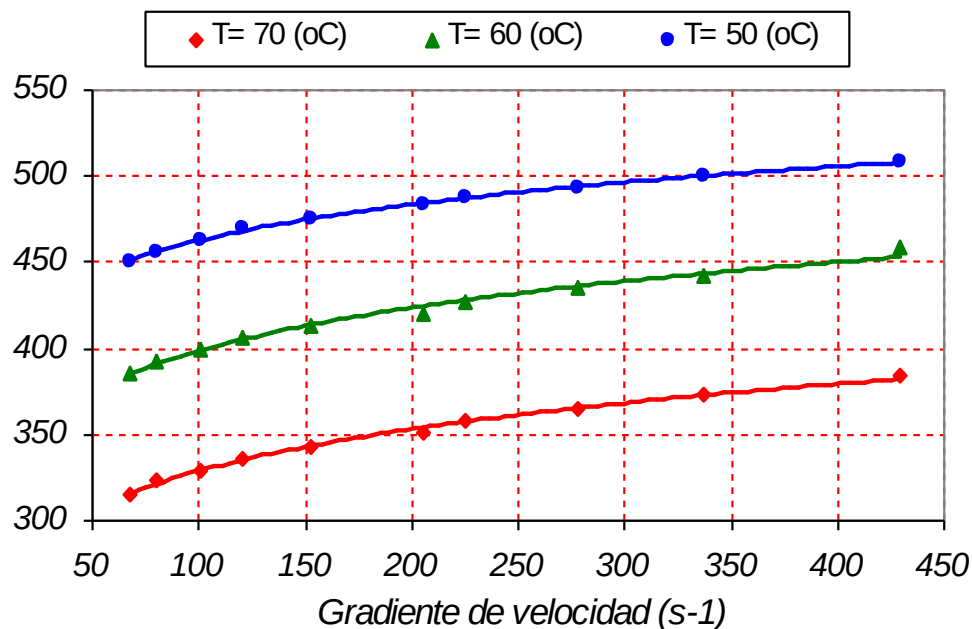


Figura 3.6. Comportamiento del esfuerzo cortante respecto al gradiente de velocidad.

De acuerdo con los reogramas obtenidos, el residual petrolizado almacenado tiene un comportamiento pseudoplástico, las pseudocurvas obtenidas han sido ajustadas mediante el método de mínimos cuadrados usando el software Microsoft Excel modelos ajustados de la ecuación 2,4 referenciado en el capítulo precedente con los correspondientes valores de n y K para cada temperatura expuestos en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Correlaciones de esfuerzo de corte y gradiente de velocidad

Temperatura (°C)	Modelo matemático obtenido por regresión	Modelo reológico
50	$\tau_{xy} = 273,27 \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^{0,107}$	$\tau_{xy} = K \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

60	$\tau_{xy} = 215,97 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,114}$	$\tau_{xy} = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$
70	$\tau_{xy} = 196,14 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,105}$	$\tau_{xy} = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$

Tabla 3.3 Parámetros reológicos del residual de petróleo almacenado

Parámetros Reológicos	Rango de Temperatura (°C)		
	50	60	70
Índice de Consistencia (k); Pa.s	273,27	215,97	196, 14
Índice de flujo (n); (adimensional)	0,107	0,114	0,105
Índice de Regresión (R ²)	0,98	0,95	0,92

Los valores representados en la tabla 3,3 evidencian que a mayores valores de temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, permaneciendo casi constantes los índices de flujo, con un valor promedio de 0,108.

Tabla 3.4. Resultados de la viscosidad aparente.

γ (1/s)	Viscosidad aparente (Pa.s)		
	T= 70 °C	T= 60 °C	T= 50 °C
67,40	4,52810	5,17846	6,36207
79,97	3,88550	4,45041	5,46107
100,38	3,17024	3,63860	4,45780
120,95	2,68308	3,08464	3,77420
152,20	2,18426	2,51637	3,07394
205,13	1,67225	1,93168	2,35478
224,67	1,54146	1,78207	2,17101
277,53	1,27586	1,47782	1,79770
337,01	1,07232	1,24423	1,51150
428,92	0,86415	1,00487	1,21865

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

La figura 3.7, muestra los resultados obtenidos del comportamiento de viscosidad aparente del residual petrolizado a las temperaturas analizadas.

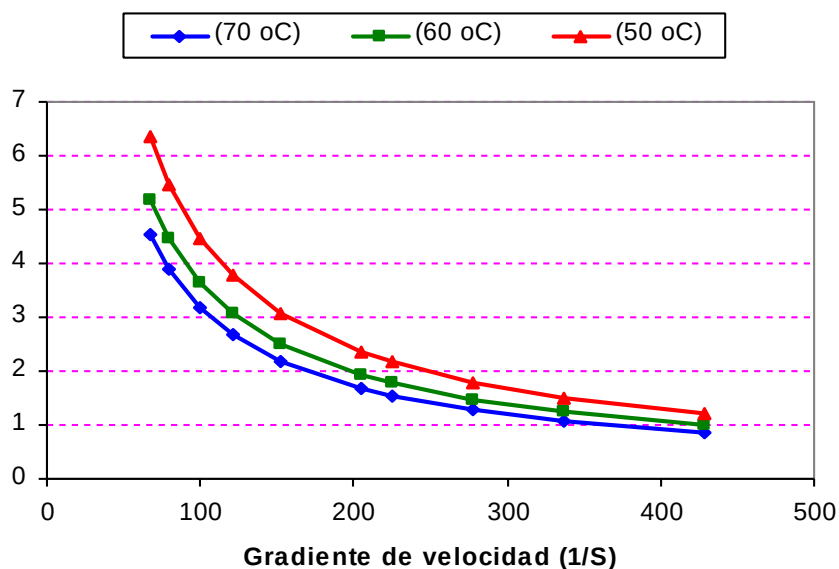


Figura 3.7 Comportamiento de la viscosidad aparente a las temperaturas analizadas

3.5- Resultados del efecto de la temperatura sobre el residual

Al experimentar cambios de temperatura desde 50 hasta 70 °C, se puede obtener la correlación entre el índice de consistencia másica y la temperatura, caracterizada por la aparición de propiedades pseudoplásticas en los residuales de petróleo, según se muestra en la figura 3.8.

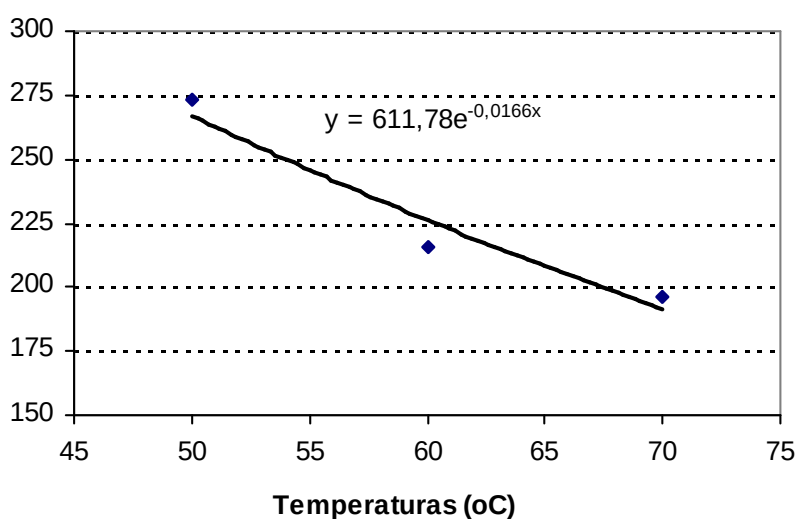


Figura 3.8. Influencia de la temperatura en el índice de consistencia másica.

Al obtener los valores de tendencia de los puntos observados y realizar el ajuste a la ley exponencial, se obtuvo una probabilidad de 0,95 lo que indica el grado de aproximación de los datos experimentales al modelo expresado en la ecuación 2,4.

$$K = 611,78 \cdot e^{-0,016 \cdot T} \quad (3,1)$$

Esta función obtenida por ajuste de regresión simula el comportamiento del índice de consistencia másica al variar la temperatura, con la limitante de que es válida sólo en el rango de temperaturas de 50 a 70 °C. Sustituyendo la ecuación 3,1 en la ecuación 2,3, se obtiene la ecuación de la viscosidad aparente en función de la temperatura y el gradiente de velocidad.

$$\mu_a = 611,78 \cdot e^{-0,016 \cdot T} \cdot \left(\frac{o}{\gamma} \right)^{n-1} \quad (3,2)$$

La ecuación obtenida para las condiciones experimentales del presente trabajo, sólo son válidas para el residual de petróleo almacenado con propiedades físicas, químicas y reológicas determinadas a temperaturas en el rango de 50 a 70 °C.

3.6- Resultados del flujo de calor máximo suministrado al sistema

Para determinar la cantidad de flujo de calor máximo suministrado al sistema manteniendo la condición de fluidez en el residual petrolizado, de acuerdo con los valores de temperaturas obtenidos, según la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Flujo de calor máximo absorbido por el sistema

Temperaturas (°C)	Calor máximo (kW)
50	7896,8
60	9476,2
70	11055,6

Estos resultados demuestran que a la temperatura de 70 °C, el sistema absorbe la mayor cantidad de calor, encontrándose el flujo máximo de calor transferido al

3.7- Resultado del flujo de calor real suministrado al sistema

Para determinar la cantidad de flujo de calor real suministrado al sistema, de acuerdo con los valores obtenidos, según la tabla 3.6

Tabla 3.6. Flujo de calor real absorbido por el sistema

Temperaturas (°C)	Calor real (kW)
50	5145.5
60	6165.3
70	10349,1

Entonces el calor transferido por el intercambiador al combustible almacenado por unidad de tiempo será igual 10349 kJ/s , para el mayor rango de temperatura (70°C) analizada.

Análisis de la efectividad del intercambio de calor por el método de NUT

Un parámetro fundamental en los equipos de transferencia de calor, es la efectividad con que trabajan los calentadores durante el proceso de intercambio de calor, y siendo la relación entre la transmisión de calor real y la transmisión de calor máxima posible, se representan los valores de efectividad para cada temperatura en la tabla 3,7.

Tabla 3.7. Flujo de calor real absorbido por el sistema

Temperaturas (°C)	Efectividad %
50	65
60	65
70	66

Podemos definir por los datos obtenidos que, el intercambiador de calor instalado en el tanque de almacenamiento de petróleo trabaja para una efectividad de 66% y cuanto mayor sea NUT , más estrechamente tiende el intercambiador de calor a su valor límite termodinámico.

Y que para cualquier intercambiador de calor se cumple que: $\varepsilon = f\left(\frac{C_{\min}}{C_{\max}}, NUT\right)$

Análisis del consumo de vapor para calentar el combustible

Finalmente el cálculo de la cantidad de vapor que se necesita para calentar el volumen necesario de combustible a las diferentes temperaturas, se muestra según la tabla 3,8.

Tabla 3.8 Relación entre el consumo de vapor e índice de consistencia másica.

Temperatura(°C)	Cosumo de vapor(kg/s)	Índice de consistencia másica(Pa·s)
50	101,3	274,89
55	102,3	253,75
60	103,3	234,24
65	104,3	216,23
70	105,3	199,61

El comportamiento del índice de consistencia másica con respecto al consumo de vapor en el serpentín, se representa mediante la figura 3,9.

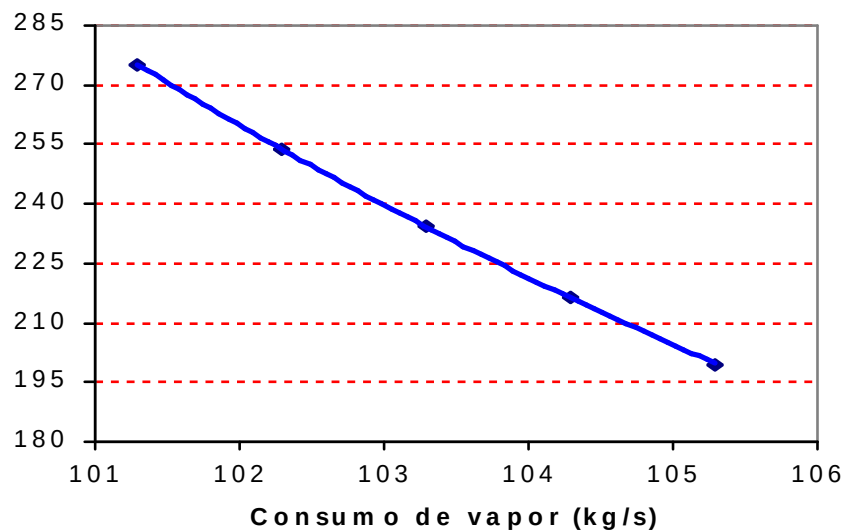


Figura 3.9. Comportamiento del índice de consistencia másica con respecto al consumo de vapor en el serpentín.

3.8- Resultados obtenidos para el cálculo de la bomba.

Los valores obtenidos se muestran a continuación en la figura 3.10, el menor valor de (0,032 m³/s) del caudal, se encuentra a los (30 m) de alturas y el mayor valor de (0,044 m³/s) del caudal se encuentra a los (5 m) de alturas.

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

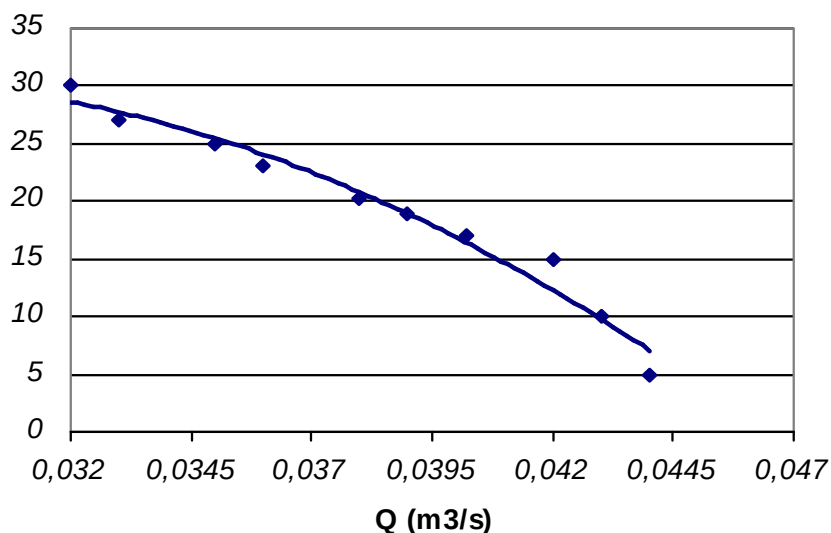


Figura 3.10 Relación entre la altura y el caudal.

Otro parámetro fundamental en la explotación de la bomba, es la relación entre la potencia de la bomba y el caudal a transportar, valores obtenidos que se muestran en la figura 3.11, donde el menor valor de (23 kW) de potencia, se encuentra a los (0,032 m³/s) de caudal y el mayor valor de (158 kW) de potencia se encuentra a los (0,042 m³/s) del caudal.

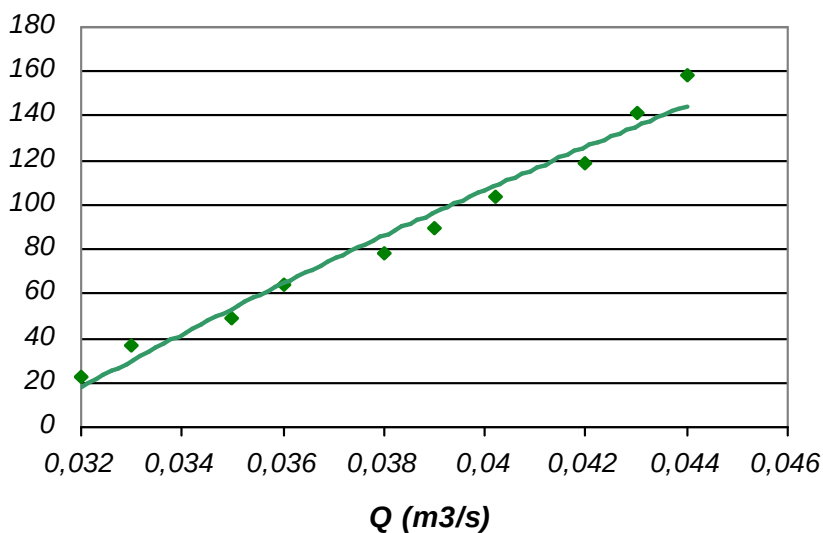


Figura 3.11. Relación entre potencia del eje de la bomba y caudal.

Con los valores experimentales obtenidos demuestran que el mayor valor de caudal se encuentra a un (68 %) de eficiencia de la bomba para extraer el residual, que al obtener

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

los valores de los puntos observados y realizar el ajuste al ley polinómica, se obtuvo una probabilidad de 0,99.

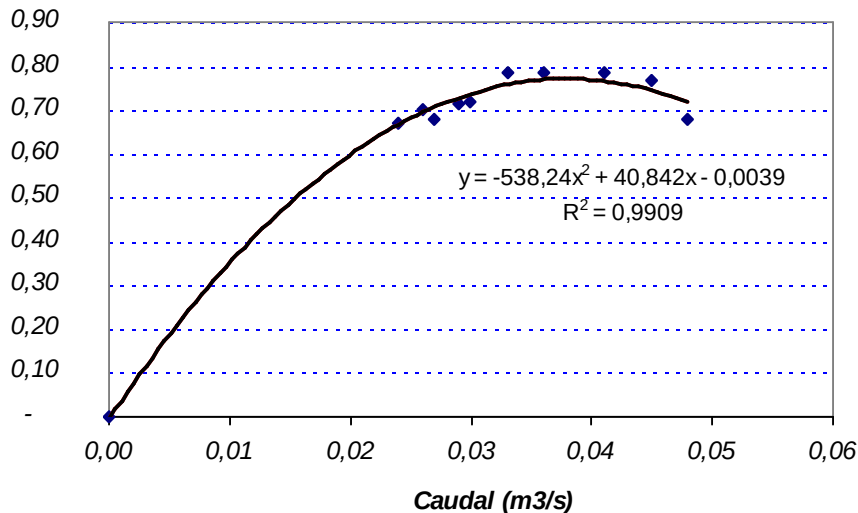


Figura 3.12. Relación entre eficiencia de la instalación y el caudal.

Finalmente con los resultados experimentales obtenidos de las propiedades físicas, reológicas del combustible y los calculados a partir de la metodología de cálculo de transferencia de calor empleada para el sistema de calentamiento y bombeo, la exigencia de ambos sistemas instalados cumplen para calentar y extraer el residual almacenado en los rangos de temperaturas analizado.

3.9- Resultados de la cantidad de residual depositado en el fondo del tanque

Donde el resultado del volumen total de residual depositado en el fondo del tanque N₀ 5 en la base de petróleo de la empresa Puerto de Moa, es de 48.6 m³, disminuyendo la capacidad de almacenaje en el tanque.

$$V = 48,6 m^3$$

3.10– Valoración económica

Para la estimación de los costos, como se observa en la tabla 3.9, no se ha empleado ninguna metodología de cálculo existente, el gasto se calcula en función de los 48,6 m³ de residual petrolizado considerando la siguiente relaciones: (1 m³ = 1000 litros; 1 Barril = 158,98 litros).

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

Por tanto 48,6 m³ representan 48 600 litros y 305, 698 barriles equivalentes de petróleo. El precio considerado para el cálculo es 65 CUC/barril. Los resultados para las condiciones analizadas en la investigación (tres años de explotación) se relacionan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Gasto económico asociado a la pérdida de residual petrolizado.

Volumen de Residual (m ³)	Cantidad de combustible asociado (barriles)	Precio del barril (CUC)	Gasto asociado (CUC)
48,6	305, 698	65	19 870,37
Para los 6 tanques utilizados			119 222.22

Como se aprecia en la tabla anterior el gasto económico asciende a 19 870,37 CUC, el mismo está referido al tanque No. 5. Teniendo en cuenta que en la base de combustible se emplean 5 tanques más, entonces el gasto para los 6 tanques en conjunto es 119 222,22 USD. De los resultados anteriores se deduce la importancia que tiene la evacuación de los residuales que se forman en los tanques de almacenamiento de combustible.

3.11- Impacto de los residuales petrolizados al medio ambiente.

La protección del medio ambiente, es uno de los problemas científico - técnicos más complejos que enfrenta la humanidad actualmente. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años, ha llevado a niveles sin precedentes la contaminación de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas.

Generalidades medioambientales del petróleo y sus residuales

Los residuales del petróleo, los clasifican como un residuo peligroso, con las correspondientes dificultades en el método de su disposición y tratamiento, generalmente costosos, sin embargo, mediante apropiados sistemas tecnológicos, pueden ser convertidos en materiales de valor energético o pueden ser dispuestos de manera conveniente (Jonson et al., 1993).

El análisis de las investigaciones realizadas por diferentes autores muestran que las mismas están dedicadas fundamentalmente a:

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

1. Estudio de las propiedades físicas y químicas de los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos con el fin de aplicar surfantes y establecer el enlace de las características integrales.
2. Estudio de las propiedades reológicas de los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos. Sobre esta base se construye el modelo físico y se deduce la ecuación de equilibrio dinámico y la obtención de la dependencia de cálculo a partir de la utilización de datos experimentales.
3. Estudio del efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos, peculiaridades de los regímenes de flujo en movimiento en sistemas termodinámicos.

De lo explicado anteriormente se observa, que la solución teórica de los principales problemas existentes en los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos es posible obtenerla a partir de una caracterización generalizada, que permita conocer el líquido a tratar y determinar las propiedades fluidodinámicas, según correspondan con los métodos de limpieza y extracción de los mismos. Por ello, los aspectos anteriormente mencionados encuentran su aplicación práctica y han obtenidos desarrollo en trabajos realizados por la mayoría de los investigadores.

Peligros que producen los residuales petrolizados al medio ambiente

Riesgos para el medio ambiente: es un producto nocivo para el medio ambiente, se debe evitar su vertido en agua o tierra.

Derrames: evitar la extensión de la fuga. Bombear, si es posible a un tanque de recogida. Mezclar con restos de arena, tierra, aserrín y pasar a contenedor cerrado (Utilizar equipo protector).

Efectos humanos

Inhalación: la mezcla de vapores sólo se produce cuando el residual de petróleo se encuentra a altas temperaturas, sin embargo, en condiciones normales de exposición, el riesgo es mínimo ya que, al no tener volátiles, no se pueden inhalar. Este compuesto es altamente tóxico y los síntomas principales son: irritación de ojos, nerviosismo, náuseas, cefaleas, insomnio y en casos severos, inconsciencia y muerte.

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

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

Contacto con la piel: altas temperaturas pueden producirse quemaduras en caso que no se tomen precauciones, además existe la posibilidad de irritación en los ojos y la piel.

Conclusiones del capítulo III

- Se comprobó que el contenido de elementos contaminantes (Fe=31,52 %; Si=9,42 % y Al=7 %) en el residual es bajo, con un por ciento de asfaltenos (46,34 %) alto y punto de inflamación de (110 °C).
- El estudio experimental permitió ajustar el modelo reológico que caracteriza el residual petrolizado como un fluido pseudoplástico, a las temperaturas comprendida entre 50 a 70 °C. Obteniéndose coeficientes de correlación de 0,98, 0,95 y 0,92 respectivamente.
- El comportamiento pseudoplástico del residual petrolizado almacenado, lo describe el modelo obtenido. $\mu_a = 611,78 \cdot e^{-0,016 \cdot T} \cdot \left(\frac{o}{\gamma}\right)^{n-1}$ de viscosidad aparente con la temperatura en el intervalo de 50 a 70 °C, con un índice de regresión de 0,95.
- Se determinó que, el calor (10349 kJ/s) transferido por el intercambiador de calor con un 66% de efectividad a los (70 °C), es el mejor parámetro de extracción del residual, para un caudal de (0,048 m³/s) y (68 %) de eficiencia de la bomba, a partir del consumo de vapor (105,3 kg/s) suministrado al calentador.
- La formación de 48,6 m³ de residual petrolizado genera un gasto económico igual a 119 222,22 CUC para los seis tanques analizados en tres años considerados.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El estudio experimental permitió ajustar el modelo reológico que caracteriza el residual petrolizado como un fluido pseudoplástico, a las temperaturas comprendida entre 50 a 70 °C. Obteniéndose coeficientes de correlación de 0,98, 0,95 y 0,92 respectivamente.
2. Se determinó que, el calor (10349 kJ/s) transferido por el intercambiador de calor con un 66% de efectividad a los (70 °C), es el mejor parámetro de extracción del residual, para un caudal de (0,048 m³/s) y (68 %) de eficiencia de la bomba, a partir del consumo de vapor (105,3 kg/s) suministrado al calentador.
3. Se comprobó que la formación de 48,6 m³ de residual petrolizado genera un gasto económico que asciende a 119 222.22 CUC para los seis tanques considerados.
4. El residual petrolizado afecta al medio ambiente y la salud humana, siendo las enfermedades más frecuentes la irritación de los ojos, nerviosismo, náuseas, cefalea e insomnio. Las mismas pueden mitigarse mediante el uso de un sistema calentamiento que facilite su extracción y transporte.

RECOMENDACIONES

1. Realizar nuevos estudios que consideren la caracterización del residual petrolizado para otras condiciones de trabajo no abordadas en la presente investigación.
2. Por el nivel de elementos contaminantes disueltos en el combustible almacenado, se hace necesario cambiar el material acero (AC-30) de fabricación del intercambiador de calor por acero inoxidable (AISI -316) de mayor resistencia térmica y a la corrosión, con el objetivo de disminuir los mantenimientos y mejorar la actividad operacional en la base de combustible del "Puerto de Moa".
3. Aplicar la inyección directa de vapores calientes sobre el combustible sedimentado en los tanques en el caso que exista rotura en el calentador, con el objetivo de evitar roturas innecesarias, mejorar la fluidez del combustible y limpieza dentro de los tanques de almacenamiento de petróleo.
4. Aplicar los métodos empleados en la caracterización química, física y reológica del residual de petróleo almacenado en otra entidad del municipio o del país, que así lo requiera para ser extraído y reincorporado al flujo productivo.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Acosta, I; Infante, C. López, W 1995). "Efecto de lodos petrolizados y lodos de tratamiento de aguas servidas sobre un suelo calciorthids de la península de Paraguay". Agronomía Trop. 45(4): 527-537.
2. Álvarez, J. 2004. "Aplicación de la Biorremediación para tratar los residuales sólidos petrolizados de fondos de tanques de la Refinería Níco López." P 2507, E03. CUPET. C. Habana, Cuba.
3. Ameneiros, J. A, García, O. 2003. "Compuesto de lodos generados en sistemas de tratamiento de aguas residuales", CIMAB, La Habana, Cuba.
4. Anderson, D. A (2007). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Taylor & Francis, Bristol, PA. USA.
5. Bandala, M. Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México (2001).
6. Banerjee, T. P: Das. Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves. Canadian Journal of Chemical Engineering: 72 (Abril), 207-211 (1994).
7. Brown y Erickson, 1995. Measurement and Prediction of the Kinetics of Paraffin Deposition.
8. Caldiño V. I., Salgado M. G. Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México. VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. (2004).
9. Clements et al. Recovering oil from emulsion by stirring, heating and setting. United States Patent. 4, 123,357 (1978).
10. Chercasski, V. "Bombas, Ventiladores y Compresores". Editorial Mir. Moscú, 1986.
11. Darby, R: Laminar and turbulent pipe flows of non newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomena, 2000.
12. Deal et al. Method for cleaning chemical sludge deposits of oil storage tanks. United States Patent. 4, 770,711. 1998.

13. Durán, A y Castillo, R. Características físicos-químicas del residual petrolizado almacenado" <http://www.monografias.com/trabajos81>. 2008.
14. Falatko, M, D; Novak, J, T. Effects of biologically produced surfactants on the mobility and biodegradation of petroleum hydrocarbons. Water Environmental Research. 64, 163 – 169 (1992).
15. Fraas, E. Heat Exchanger design. Jon Wiley and Sons Inc, New York, p.228 -245, 1989.
16. Franco et al. Process for the termo-chemical cleaning of storage tank. United Stated Patent. 5, 580,391 (1996).
17. Frank, P. Incropera y David. P. De Witt. Fundamentals of heat and mass transfers, John Wiley & Sons. Tomo 3, cuarta edición, Páginas (419 – 480), 2003.
18. Garcell, L. 1993. Efectos que influyen en la disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura. Ediciones Pueblo y Educación, 1988.
19. Garcell, L. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
20. Guerra, C. (2004). Estadística. Editorial Félix Várelas. La Habana, Cuba.
21. Gutiérrez, J. (2003). "Contenido de un estudio de impacto ambiental en el uso de lodos albañales en la agricultura". CIGEA, La Habana, Cuba. .
22. Guzmán y Andrade, 1979. Estudió del efecto de las temperaturas en la viscosidad de los líquidos.
23. Hannay J. Method for abandoning an underground storage tank United Stated Patent. (1993).
24. Isachenco V. y otros. Transmisión del calor. Editorial pueblo y educación. 557 pp. 1989.
25. Johnson, jr. et al. Process for recovery of tank bottom wastes. United States Patent. 5, 259,945 (1993).
26. Kasatkin, A, G, (1985). Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Tomo I y Tomo II.

27. Kern, D. 1999. Procesos de Transmisión de Calor. McGraw Hill Book Company, Inc. México DF, p159-512
28. Kern, D. Q (1985). Procesos de Transferencia de Calor. Editorial Mc Graw Hill. España.
29. Krasnoschioko E. A. Problemas de termotransferencia. Editorial Mir, Moscú., 327 pp. 1986.
30. Kreith, F. B (2002). M. Principios de Transferencia de Calor. Editorial Thomson Learning. Madrid, España.
31. Kukor, J, J y col. Remediation of contaminates including low bioavailability hydrocarbons. United Stated Patent 20020034421 (2002).
32. Kupriczka R., A. Rotkegel and H. Walczyk, On the airside Heat Transfer Performance of Finned Tube Bundles, Proceedings of the International Symposium on Compact heat Exchangers, Grenoble, August 24 (2002)..
33. Martínez, L. P; J, A: Linares. Resistance Coefficients of Fittings for Power-Law Fluids in Laminar Flow. Journal of Food Process Engineering: 24, 135-144 (2001).
34. McAdams, W. H, Heat Transmission, 3rd Ed, Mc Graw -Hill, NewYork, 1954.
35. Moran. Apparatus and method for removal of sludge from tanks. United Stated Patent. 4, 828,625 (1989)
36. Nakayama, T. E: Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980).
37. Ozisik, M. 1990. Transferencia de Calor – Umtexto básico. Guanabara Koogan S.A. Río de Janeiro, p.447-502
38. Palacios, F (2003). "Tratamiento, uso y eliminación de lodos urbanos", La Habana, Cuba.
39. Perona, P: An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. Journal of Food Engineering: 60, 137-145 (2003).
40. Perry: Chemical Engineers, Handbook. Edición revolucionaria. Instituto cubano del libro. La Habana, 1987

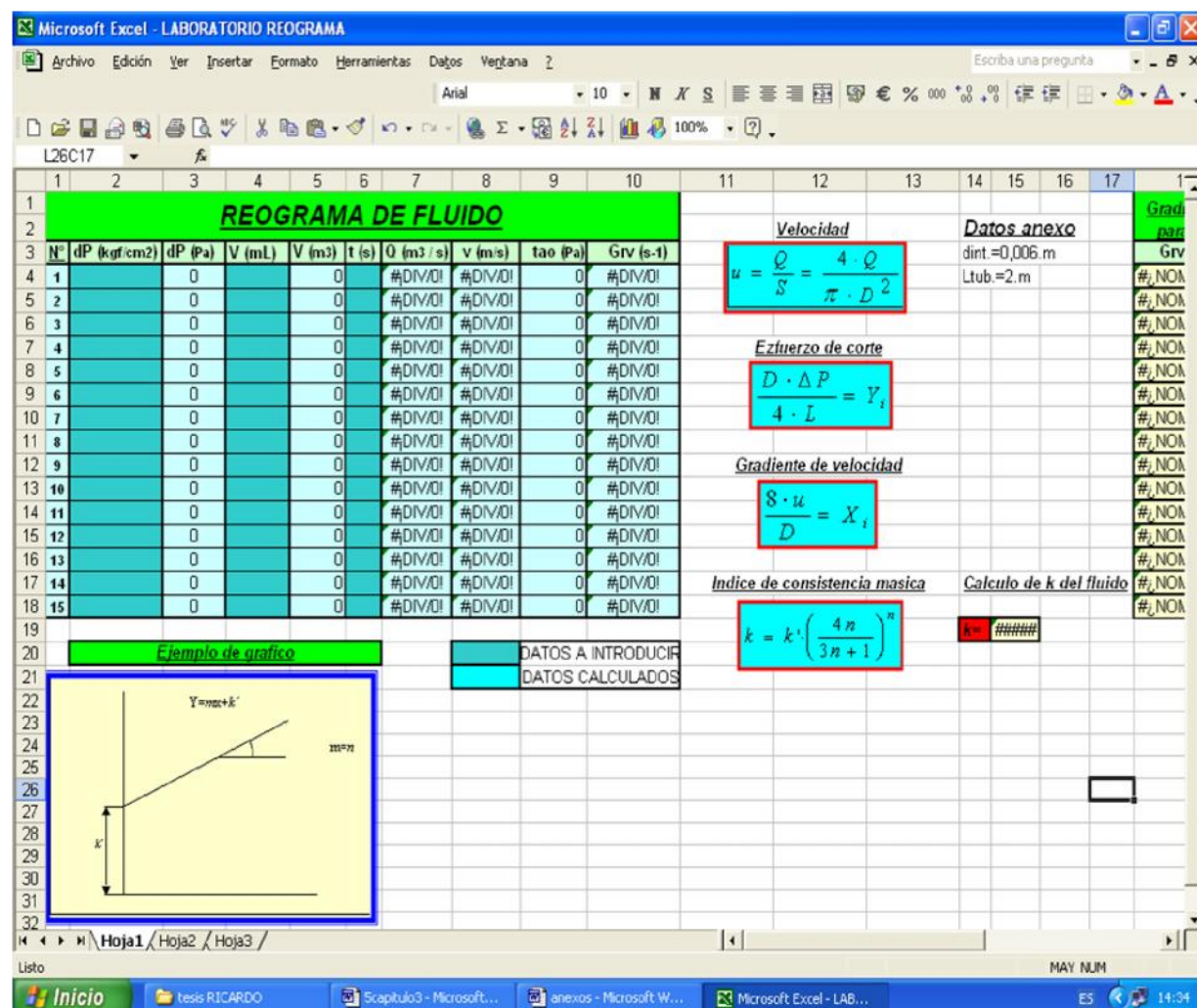
41. Placencia, A. P: "Formulación de emulsiones petróleo pesado en agua", Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Petroecuador/ESPE. (2002).
42. Powel, J. E. Jr. System and process for in tank treatment of crude oil sludges. United States Patent. PCT/US98/13448 (1998).
43. Pupo. L. Informe anual. Centro de investigaciones del petroleo (CEINPET), Ciudad Habana, 2002
44. Ramesh K. S (2003). Fundamentals of heat exchanger design. Editorial John Wiley & Sons. New York, E.U.A.
45. Ron, E. Z.; Rosemberg, E. *Biosurfactants and oil bioremediation*. Current Opinion in Biotechnology, 13, 249-252 2002.
46. Scalliet. Process of breaking a sludge emulsion with a ball mill followed by separation. United States Patent. 6, 056,882 (2000).
47. Skenlland, A: Nom newtoman flow and Heat transfer. Edición revolucionaria, Instituto cubano del libro, La Habana, 1970.
48. Welty J.R; Bandala, V. Wicks Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer. Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA. (2001).

ANEXO

1

Tesis en Opción al Título de Master en Electromecánica

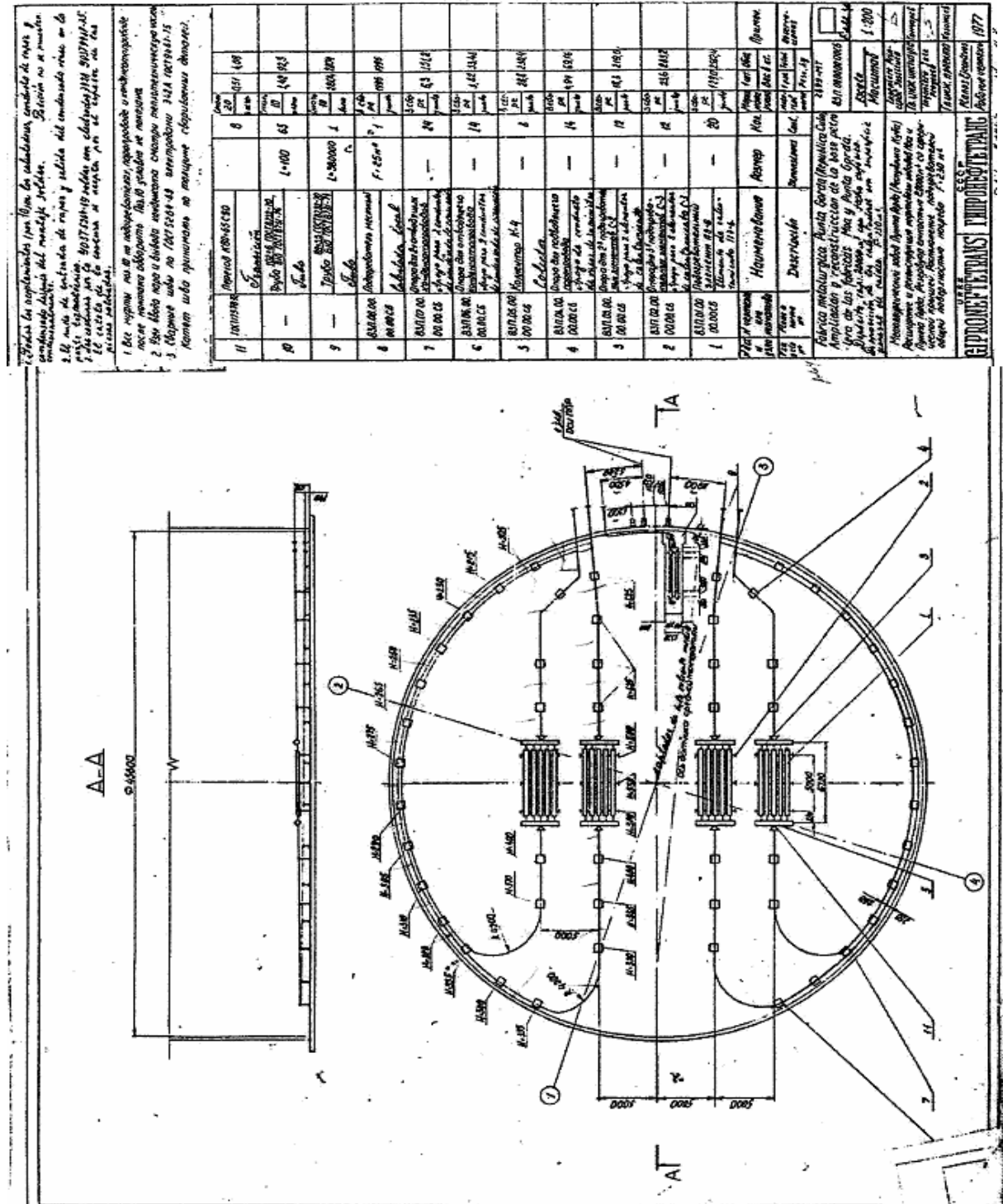
ANEXO. I REOGRAMA DE FLUJO



ANEXO

2

ANEXO. II Intercambiador de Calor



ANEXO

3

ANEXO. III DIAGRAMA DE FLUJO BASE COMBUSTIBLES

