

República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Departamento de Metalurgia

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

Título: Evaluación del sistema de calentamiento y bombeo sobre el residuo almacenado en la base de petróleo de la Empresa Puerto Moa

Autor: *Rodolfo Camilo Lobaina*

Tutores: *MSc. Rafael Antonio Castillo Díaz*

Ing. Andrés Duran Reyes

CURSO: 2009 – 2010

“Año 52 de la Revolución”



Declaración de Autoridad

Yo **Rodolfo Camilo Lobaina**

Autor de este trabajo de diploma certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad de la preparación de nuevos técnicos.

Firma del Diplomante

Firma del Tutor

Firma del Tutor



Pensamientos

El camino hacia el éxito no debe ser recorrido con botas de siete leguas. Paso por paso, poco a poco, pedazo por pedazo, ese es el camino a la prosperidad, ese es el camino a la sabiduría, ese es el camino a la gloria.

Charles Buxton

Educar es depositar en cada hombre toda la obra humana que le ha antecedido, es hacerle resúmenes sobre el mundo viviente hasta el día en que vive, es ponerlo a la altura de su tiempo para que flote sobre el sin lo cual no podrá salir a flote: es preparar al hombre para la vida.

José Martí Pérez



Dedicatoria

Dedico la culminación de este trabajo:

En especial a mis padres Rodolfo R. Camilo Aria y Lidia R. Lobaina López, por apoyarme y guiarme en mi formación por sus deseos de verme con un título Universitario.

A mi hermano Reinier Camilo Lobaina, mi tutor, amigo y guía Rafael Castillo Días por el aliento que me dieron para llegar a esta meta.

A todas aquellas personas cercanas a mí que influyeron en mi desarrollo profesional, por ayudarme durante toda mi carrera y a los que siempre guardo en mi corazón.

A los profesores y compañeros de aula que durante estos años me han ayudado a formarme como profesional.



Agradecimientos

Mis agradecimientos a mis padres y hermano: por su comprensión y contribución para mi formación profesional.

A mis tutores: Rafael Castillo Díaz y Andrés Duran Reyes, por su ayuda y dedicación durante la realización de este trabajo.

Al colectivo de profesores del ISMM Dr. "Antonio Núñez Jiménez", quienes de forma desinteresada contribuyeron a mi formación profesional, para poder cumplir de ahora en lo adelante con las tareas que me encomiende la Revolución.

A mis compañeros de aula: por apoyarme desde que comenzamos los estudios universitarios.

A la Revolución Cubana: Por su grandeza y por darme la oportunidad de estudiar; una de las tareas más forjadoras del futuro.

A todos, muchas gracias



Resumen

En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica de los métodos que existen actualmente para tratar los residuos sólidos que se depositan en los fondos de los tanques de almacenamiento de combustibles, así como la caracterización del tipo de petróleo que se almacena en el tanque # 5 de la base de combustible del Puerto de Moa y el residuo que se forma.

Se determinan los principales parámetros de un intercambiador de calor de tubo y coraza existente en este tanque, además de evaluar el sistema de bombeo instalado en la base de combustible para el posible transporte de los residuos sólidos, esclareciendo que con el incremento de temperatura disminuye la viscosidad y facilita la extracción de los residuos del tanque de almacenamiento. Mostrando que es más económico la limpieza del tanque por un proceso de calentamiento y transporte que por el método que se realiza actualmente.

Palabras Claves: Residual, Petróleo, Transporte, Calentamiento.

Abstract

On this work was performed a review of the currently existing methods for the solids residuals contained on the bottom of the fuel storage tanks as well as the characteristics of the fuel stored on tank # 5 of storage base of Puerto Moa and the settle formed.

The main parameters of a heat exchanger type tube and shell existing on this tank were determined, besides the pumping system installed for the transport of the solid residuals remarking that with the increase of the temperature the viscosity decreases and the extraction of the residuals becomes easier. It is more economical the clean up of the tank by a heating and pumping process instead of the current method used now a day.

Key Words: Residual, fuel, transport, heating.



Índice

Contenido	Página
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. Introducción del capítulo	4
1.2. Estado del arte	4
1.3. Alternativas aplicadas para la extracción de los residuales	8
1.4. Efecto de la temperatura en líquidos muy viscosos	10
1.5. Generalidades de los intercambiadores de calor	11
1.6. Propiedades del flujo para el transporte de petróleo y extracción del residual.	12
1.7. Descripción de la Instalación	13
1.7.1. Recepción del combustible	14
1.7.2. Almacenamiento del combustible	14
1.7.3. Descarga del combustible	14
1.8. Descripción del flujo tecnológico de la Base de Combustible	14
1.9. Características Técnicas del tanque # 5 de almacenamiento	15
1.10. Conclusiones del capítulo 1	16



Contenido	Página
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción del capítulo	17
2.2. Características del crudo cubano almacenado en los tanques	17
2.3. Características del residual depositado en los tanques de almacenamiento	18
2.4. Tipos de intercambiadores según el método de transferencia de calor	20
2.4.1. Características comparativas de los intercambiadores de calor	21
2.4.2. Materiales para la fabricación de serpentines	22
2.5. Calculo de un calentador para petróleo con calentamiento por vapor	22
2.5.1. Cálculo del flujo de vapor	26
2.5.2. Cálculo del consumo de vapor para calentar el petróleo	27
2.6. Generalidades de los sistemas de extracción o bombeo	27
2.6.1. Parámetros fundamentales de las bombas	27
2.6.2. Características de selección en la operación de las bombas	28
2.6.3. Principio del funcionamiento de las bombas de tornillo	39
2.6.4. Principio del funcionamiento de las bombas de tornillos o de roscas	39
2.6.5. Ventajas principales de las bombas de tornillos	39
2.6.6. Detalles de funcionamiento de las bombas de tornillos	30
2.6.7. Uso de las bombas de tornillos o de roscas	30



Contenido	Página
2.7. Metodología de cálculo	30
2.8. Conclusiones del capítulo 2	33
CAPÍTULO 3: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	
3.1. Introducción del capítulo	34
3.2. Resultados del cálculo de un calentador para petróleo con calentamiento por vapor	34
3.3. Cálculo del flujo de vapor	37
3.4. Cálculo del consumo de vapor para calentar el petróleo	37
3.4.1. Resultados obtenidos en la metodología de cálculo planteada	39
3.5. Valoración Económica	43
3.6. Impacto Medio Ambiental	47
3.7. Conclusiones del capítulo 3	48
Conclusiones Generales	50
Recomendaciones	51
Bibliografía.	52
Anexos	



INTRODUCCIÓN

El petróleo es un recurso natural que ha desempeñado un papel fundamental para el buen funcionamiento de la vida económica de nuestro país, en especial de las industrias del níquel, que junto al turismo están entre las primeras fuentes de ingresos del país, enfrascadas en estos momentos en un proceso de ampliación de sus capacidades de producción y modernización de sus tecnologías para mejorar su desarrollo industrial, permitiendo incrementar su papel en la economía nacional. Actualmente la producción de níquel y cobalto constituye unas de las mayores posibilidades para el desarrollo de la economía cubana debido a las grandes reservas de dichos minerales y al alto precio en el mercado internacional a partir del año 2000, aunque en los momentos actuales existe una crisis mundial la cual ha afectado a dicha industria, deprimiendo el precio del níquel y el cobalto en el mercado mundial, por lo que se hace necesario aumentar la eficiencia de dicha industria, desarrollando nuevas tecnologías, accesorios y en general soluciones que permitan su desarrollo.

Debido al papel protagónico que juega hoy en día la industria del Níquel en el desarrollo de nuestro país se necesita de un proceso continuo de producción sin interrupciones, por lo que se hace necesario de una base de combustibles donde se almacenen los recursos energéticos por un periodo de tiempo determinado (aproximadamente de 15 días). Por lo que necesita desarrollar toda una infraestructura que permita el almacenamiento y transporte hasta el lugar de utilización por parte de la entidad que lo necesite. Ahora bien, la industria del petróleo como la del gas, están sometidas a riesgos de todo tipo, cuyo origen puede ser debido a deficiencias técnicas, como las averías de las máquinas en las refinerías, a bordo de los buques o en los oleoductos; a causa de desastres naturales imprevisibles, las tormentas en el mar y en tierra o los incendios; y también a problemas políticos, económicos y comerciales, como las crisis que afectan periódicamente las relaciones entre países productores y países consumidores.

Normalmente cualquier petróleo esta compuesto por miles de hidrocarburos ya sean gaseosos, líquidos y sólidos, que poseen diferentes temperaturas de ebullición, inflamación y de congelación. Los hidrocarburos gaseosos son los de más baja temperatura de inflamación dentro del crudo cubano y suelen alcanzar los 6 °C. El petróleo es considerado como un coloide por su comportamiento y la estabilidad de la misela depende de varios factores dentro de los cuales se encuentra la temperatura, al

incrementarse la temperatura, los hidrocarburos de más bajo punto de ebullición se convierten en gases y constituyen el punto de partida de los hidrocarburos que poseen mayor punto de ebullición.

El estudio de la variante tecnológica más adecuada para el tratamiento de los residuales petrolizados, depende de las características del residuo sólido a tratar, las condiciones del sitio contaminado y de almacenamiento, así como del costo de la propuesta tecnológica. Estos desechos contienen hidrocarburos que pudieran ser recuperados y reutilizados en la industria del cemento o del vidrio, que poseen quemadores diseñados para quemar estos productos, además de contener contaminantes peligrosos para el medio, tales como metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos de carácter cancerígeno, entre otros. Para el desarrollo de una tecnología eficiente de los tratamientos de estos desechos, se debiera incluir la recuperación del valor energético de estos residuales y su reincorporación al flujo productivo de las empresas.

Actualmente la formación de los lodos o desechos sólidos en los tanques de almacenamiento, es un problema no resuelto por parte de la base de combustibles de la Empresa Puerto Moa.

Por lo que se define la siguiente **Situación Problemática:**

Debido al mal manejo del combustible almacenado en los tanques de la base de combustibles de la Empresa Puerto Moa, la no utilización del sistema de calentamiento, provoca la formación de lodos o residuos sólidos petrolizados en el fondo del tanque número 5, que con el tiempo se compactan haciendo imposible su extracción, provocando la disminución de la capacidad de almacenamiento de los depósitos de combustible de la base de petróleo.

Se define como **Problema de la Investigación:**

Poco conocimiento de los parámetros tecnológicos del sistema de calentamiento y Bombeo instalados en el tanque número 5 de la Empresa Puerto Moa y su influencia sobre la formación de los residuos.

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

Sistema de calentamiento y extracción del residual de combustible depositado en el sistema de almacenamiento de la base de petróleo de la Empresa Puerto Moa.

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

Con un sistema de calentamiento eficiente, es posible la disminución de la viscosidad del Petróleo y la del Residual hasta una temperatura que posibilite su extracción mediante el sistema de bombeo instalado, adecuando las condiciones de trabajo.

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

Evaluar el sistema de calentamiento y bombeo del petróleo instalado en la base de combustibles para evitar la formación de los residuos sólidos petrolizados.

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

- Establecer el estado actual del sistema de calentamiento, extracción y bombeo del residual de petróleo de la Empresa Puerto Moa.
- Verificar el sistema de calentamiento del petróleo.
- Verificar el sistema de bombeo del petróleo y del residual de petróleo almacenado para diferentes valores de viscosidad.
- Valoración económica y medioambiental de la propuesta efectuada.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción del capítulo

La Empresa Puerto Moa perteneciente a nuestro territorio, se encuentra enfrascada en un proyecto de ampliación y modernización de la base de combustibles. El mayor problema existente en esta industria, es la formación de los lodos petrolizados en el fondo de los tanques de almacenamiento que limitan la capacidad de almacenaje por diseño, debido a la falta de un mecanismo de agitación o calentamiento, por lo que se realiza un análisis para darle solución al problema existente. Situación que ha llevado a la necesidad de buscar alternativas de manera conveniente para el proceso productivo y su efecto en el medio ambiente.

En tal sentido el **objetivo** del capítulo es: Realizar un análisis de la bibliografía que nos permita definir el estado del arte de nuestra investigación.

1.2. Estado del Arte

Se realiza un análisis de las diferentes publicaciones expuestas en la bibliografía especializada en la temática, con el fin de disponer de los elementos teóricos básicos esenciales para el desarrollo del trabajo.

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 %). Compuestos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros son parte de otros compuestos de hidrocarburos como gas natural y petróleo. (Diccionario LAROUSSE de ciencia y técnica).

Como se conoce en la práctica, los yacimientos petrolíferos en explotación no tienen por lo regular un petróleo crudo puramente naftenico, parafínico o aromático, lo que ha llevado a una clasificación aceptada donde sus características los dividen en (Powel, 1998):

- Parafínicos: Alto contenido de alcanos y no poseen resinas ni asfaltenos en cantidades importantes.
- Parafínicos – Nafténicos: Similares contenidos de alcanos, cicloalcanos con bajos aromáticos y arenos así como pobre contenido de resinas y asfaltenos.
- Nafténicos: Alto contenido de cicloalcanos en todas las fracciones y presentan cantidades limitadas de resinas y asfaltenos.

- Parafínicos – Nafténicos – Aromáticos: Cantidades pequeñas de parafinas 1,5 %, resinas y asfaltenos pueden alcanzar hasta el 10 %.
- Nafténicos – Aromáticos: Contenido predominantes de cicloalcanos y arenos, los alcanos solo se presentan en las fracciones ligeras en pequeñas cantidades mientras que las resinas y asfáltenos pueden alcanzar valores desde 10 % hasta valores superiores al 20 %.
- Aromáticos: Se distinguen por su alta densidad y por elevado contenido de arenos en todas las fracciones del petróleo.

En el 2007, Obami plantea la composición elemental del petróleo crudo cubano normalmente está comprendida dentro de los siguientes intervalos:

Tabla 1.1. Principales elementos que componen el Crudo cubano.

Elemento	Peso (%)
Carbono	84 - 87
Hidrógeno	11 - 14
Azufre	0,1 - 7
Nitrógeno	0,2

El Petróleo se compone con una mezcla de hidrocarburos, es decir, compuestos de hidrógeno y carbono. Mezclados con unos pocos compuestos de azufre, oxígeno, vanadio, nitrógeno y otros elementos. El contenido de azufre varía entre un 0,1 y un 7 %. El petróleo se forma bajo la superficie terrestre por la descomposición de organismos marinos. Los restos de animales minúsculos que viven en el mar y, en menor medida, los organismos terrestres arrastrados al mar por los ríos o los de plantas que crecen en los fondos marinos, se mezclan con las finas arenas y limos que caen al fondo en las cuencas marinas tranquilas. Estos depósitos ricos en materiales orgánicos, se convierten en rocas generadoras de crudo.

Residual o Residuo: Se define como sobrante o materias que quedan después de efectuar alguna operación química, tratamiento industrial, transformación, etcétera. Ejemplo, la refinería deja residuo asfáltico.

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.

Residuo petrolizado almacenado: Podemos definirlo como el proceso de incompatibilidad o envejecimiento que sufre el petróleo durante un período de tiempo determinado de almacenamiento, depositado en el fondo de los tanques.

Los residuales petrolizados depositados en el fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo, son producto a la baja eficiencia en el calentamiento, incompatibilidad, envejecimiento, que conllevan a la sedimentación y compactación de este combustible.

Los residuales comúnmente llamados lodos, se han convertido en un grave problema, debido a que las regulaciones ambientales existentes, los clasifican como un residuo peligroso, con las correspondientes dificultades en el método de tratamiento generalmente costoso.

La composición del lodo o residuales puede variar significativamente en dependencia del origen de éste, por ejemplo: los lodos acumulados en el fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo, lodos que se encuentran en el fondo del separador y los lodos acumulados en el fondo de los tanques de separación por flotación inducida. En la composición de los lodos varía fundamentalmente el contenido de agua e hidrocarburos, más que el contenido de sólidos (Clements et al., 1978).

Los hidrocarburos acumulados en el fondo de los tanques sufren un envejecimiento gobernado por tres tipos de procesos físicos, químicos y biológicos. Según (Jonson et al., 1993) estos procesos alteran algunas de las propiedades de los hidrocarburos presentes en los residuales como: 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 permitiendo conocer cualitativamente de forma general algunas propiedades de estos residuales almacenados.

La composición de estos lodos, siendo una mezcla de hidrocarburos, sólidos y agua les impide ser directamente utilizados 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. Este sistema se ha aplicado a los fondos de tanques que son relativamente de fácil bombeo (Johnson et al., 1993).

Algunas composiciones generales reportadas para estos lodos petrolizados son: 90 % de hidrocarburos, 5 % agua y 5 % 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 %. (Johnson et al., 1993). Los resultados sugieren un análisis integral para este líquido altamente viscoso, sirviendo como guía a otros trabajos.

En uno de los primeros trabajos relativos a la deposición de asfaltenos, a la luz de los conocimientos de la época sobre estructura coloidal, explicaron las causas de los severos depósitos que se producen durante la depleción del mismo y antes que el fluido de reservorio alcance el punto de burbuja. La causa, según los autores, es la abundancia de componentes livianos en el crudo (40 % de gasolina) que actúan como depeptizantes (precipitantes) de los asfaltenos, solo en la región monofásica.

La incompatibilidad surge (no con poca frecuencia), de la mezcla de dos o más combustibles (Fuel Oil y/o petróleos crudos) de diferente procedencia, la causa básica de la incompatibilidad esta determinada fundamentalmente porque al mezclar dos combustibles (Fuel Oil y/o petróleos crudos), (aunque estos hayan sido estables en si mismos), el equilibrio entre maltenos, resinas, aromáticos y asfaltenos suele alterarse y perder su capacidad de peptización de los asfaltenos, comenzando la desestabilización y ruptura del estado coloidal que altera las propiedades del nuevo combustible y hace coalescer y precipitar los asfáltenos. Pudiera pensarse que mezclar combustible (Fuel Oil y/o petróleos crudos), con altos contenidos de asfaltenos aunque sean estables en si mismo, con combustible (Fuel Oil y/o petróleos crudos), con bajos asfaltenos, se puede dar una mezcla donde se logre el balance que logre la peptización adecuada (Martínez, 2001).

Los asfaltenos 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 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. Campos (2005) generaliza algunas composiciones del tipo de sustancia a tratar, adquiriendo mayores conocimientos a nuestro trabajo.

1.3. 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 (Maruska, y Rao, 1987). Pudiendo aplicarse para cualquier petróleo y su residual.

Se han utilizado mecanismos para evitar la formación de estos lodos en el fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo. Entre estos podemos 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 (Deal et al., 1998).

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.

Formulación de emulsiones petróleo pesado – agua, “dirigido por el Dr. Luís Saltos (2000) determinó las concentraciones más efectivas de petróleo y de sustancias tensioactivas para formar emulsiones estables en agua, dentro de las principales conclusiones consta la siguiente, se ha formado emulsión de petróleo pesado dentro del ámbito de índice de gravedad API (clasificador de los Hidrocarburos) de 15 a 20 utilizando sustancias tensioactivas no iónicas al nivel de concentración de 5 %”. Las emulsiones con un 70 % de petróleo pesado y 5 % de sustancia tensioactiva tienen una alta fluidez de 1/10 de la viscosidad del petróleo (Chematek, 2007).

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).

Se han desarrollado diversas tecnologías con el objetivo de realizar la separación de estos sólidos de la fase acuosa mediante un sistema en YEE. Este sistema se ha aplicado a fondos de tanques que son relativamente de fácil bombeo, generándose un sólido de fácil deposición. Para lograr un recobrado adicional de productos útiles se emplea una extracción con solventes y los sólidos generados se tratan mediante biorremediación (ver figura 1).

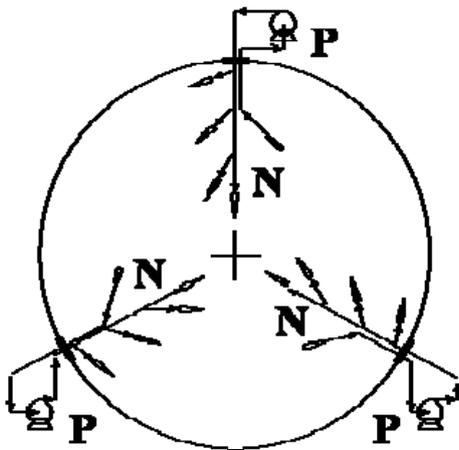


Figura 1. Instalación del sistema en YEE.

La Universidad Nacional Autónoma de México (*UNAM*) estudia la posibilidad de colocar un imán que atrape a los sólidos en el centro del oleoducto, a fin de extraerlos fácilmente. En ese sentido, se apoya en un sistema para predecir cuándo se precipitarán los asfaltenos en condiciones estáticas y en base a los resultados, poder determinar la ubicación del imán con la potencia adecuada para producir el campo magnético. Para lograr la formación de gotas y su dispersión en agua, es necesario comunicarle al sistema cierta cantidad de energía, dada según la siguiente expresión según: (Mena, 1999).

$$\Delta G_{(fe)} = \sigma \cdot \Delta A - T \cdot \Delta S_{(conf)} \quad (1)$$

Donde:

- $\Delta G_{(fe)}$ → Variación de la energía de formación de la emulsión, J.
- σ → Tensión interfacial, N/m.

- $\Delta A \rightarrow$ Variación del área interfacial, m^2
- $\Delta S_{(conf)} \rightarrow$ Variación de entropía debido al cambio de configuración, J/K.
- $T \rightarrow$ Temperatura, K.

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 (Moran, 1989). Se requiere conocer sus propiedades químicas y físicas para su utilización.

Los métodos de disposición y tratamiento de los residuales del petróleo, son generalmente costosos, sin embargo, mediante apropiados sistemas tecnológicos, pueden ser convertidos en materiales de valor energético o pueden ser dispuestos de manera conveniente (Johnson, et al., 1993).

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).

Estos estudios realizados fueron analizados dentro del marco teórico, debido a su importancia en la limpieza de los tanques, aunque no da solución a nuestra investigación.

1.4. Efecto de la temperatura en líquidos muy viscosos

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 más débiles las fuerzas de atracción entre las moléculas, que suelen ser fuerzas de Van Der Waals.

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

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

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de líquidos, se representa bien mediante la ecuación de (Guzmán-Andrade, 1979) utilizada por diversos autores como (Thomas, 1979), con amplia aplicación en la actualidad.

$$\mu_a = A \cdot e^{B.T} \quad (1.1)$$

Donde:

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

e. Constante de Euler.

T . Temperatura; ($^{\circ}\text{C}$).

A . y B . Coeficiente que depende del tipo de fluido.

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

Los estudios relacionados del efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los petróleos y sus residuales, notifican que esta disminuye con el incremento de la temperatura, dando soluciones positivas a nuestro objeto de estudio.

1.5. Generalidades de los intercambiadores de calor

Los serpentines o termointercambiadores, se usan desde la antigüedad en la destilación de bebidas alcohólicas, aunque en la actualidad cualquier proceso de refinado de crudos u obtención de un producto químico puede utilizar un serpentín, bien para enfriar o calentar líquidos y gases, además deben funcionar bajo régimen térmico óptimo, a tenor de la combinación de un rendimiento dado y demás indicadores, determinados por las condiciones tecnológicas, con el gasto mínimo de calor.

Los termointercambiadores o serpentines, son aparatos destinados a transmitir calor de unas sustancias a otras y se fabrican de vidrio, cobre u otro material que conduzca el calor fácilmente, estas sustancias que participan en el proceso de transmisión de calor, que reciben el calor de estas fuentes y lo ceden al medio, que se caldea a través de la pared del intercambiador de calor, se llama caloportadores (Benelmir y Feidt, 2002).

Entre el número de los caloportadores (agentes calentadores), más difundidos figuran los siguientes: el vapor de agua y el agua caliente.

Los de alta temperaturas (agua recalentada, aceites minerales, metales líquidos y otros).

La elección del caloportador depende, en primer lugar, de la temperatura que se requiere para el calentamiento o la refrigeración y la necesidad de regularla, además debe garantizar una intensidad bastante elevada de intercambio térmico siendo pequeño su gasto volumétrico y másico, debe poseer poca viscosidad, pero alta densidad,

capacidad calorífica y calor de vaporización, es deseable que sea incombustible, atóxico, que no ejerza influencia destructora sobre el material del intercambiador de calor y por último que sea una sustancia barata y accesible (AL-Nimr; et al., 2001).

1.6. Propiedades del flujo para el transporte de petróleo y extracción del residual

Existe una relación entre la viscosidad que presenta un fluido y la compresión a la que está sometido. En función de cómo sea esa relación tenemos distintos tipos de comportamiento.

- **Comportamiento 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.
- **Comportamiento Dilatante:** es el comportamiento contrario al anterior, al comprimir el líquido se vuelve más viscoso.
- **Comportamiento Newtoniano:** existe una relación lineal, la viscosidad es independiente, la compresión no produce alteración de la viscosidad.

Estos comportamientos son específicos de cada material.

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, no menos importantes, 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 pseudoplástico o características plásticas en presencia 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 reológicas (Darby, 2000).

Al efectuar una 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 a su aproximación al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinada por el esfuerzo viscoso entre las capas. (Welty y Bandala, 2001).

Placencia (2002) realizó pruebas de formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto, se determina el proceso óptimo para el proceso, además se realizó pruebas de reología con diferentes condiciones de concentración de tensoactivo, temperatura y tiempo de almacenamiento.

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 según (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 ilustra sus aplicaciones para el caso particular del flujo newtoniano.

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por (Nakayama et al., 1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham.

La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y pocos trabajos se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe et al., 1986); (Ibarz et al., 2001); (Vélez, 2003); (Perona, 2003); (Sablani et al., 2003).

Los artículos analizados, son un complemento para la solución de nuestra investigación en los sistemas de extracción o transportación del residual petrolizado almacenado.

1.7. Descripción de la Instalación

La Empresa Puerto de Moa " Raúl Díaz Argüelles" dentro de sus instalaciones que prestan servicios a las empresas del territorio se encuentra la Base de Combustibles que es objetivo de este trabajo y comprende de las siguientes etapas:

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

1.7.1. 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 1 Km, y una doble en tierra formada por dos líneas paralelas con diámetro 500 mm, que a la entrada de la Base de Combustibles se une a otra línea con igual de diámetro de 500 mm, dando paso a los tanques de almacenaje a través de una línea de 400 mm.

1.7.2. Almacenamiento del combustible

El sistema de almacenaje del combustible se realiza de la siguiente manera en la Base de Combustibles.

- Crudo Mejorado 1400, en los tanques 385P-TK-1, 2 y 3, con la capacidad de 20 000 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.

1.7.3. Descarga del combustible

La descarga a las diferentes empresas, se realizará a través de las bombas que se encuentran ubicadas en la estación de bombas de La Base de combustibles, las bombas del tipo de tornillo serán utilizadas para manejar crudos y las del tipo centrifugas para el fuel oil.

1.8. Descripción del flujo tecnológico de la Base de Combustible

La Base de Combustibles asimila la recepción de dos tipos de combustibles simultáneamente fuel-oil y Crudo mejorado, por sus características diferentes se recomendará el uso del 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 # 1: De descarga de combustibles.
- Línea Muelle # 1: Hasta la Base de Combustibles.

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, ésta operación se ejecuta para asegurar la descarga del combustible. Las anclas se fijan mediante cadenas de acero a 4 boyas metálicas con señalización marítima, posibilitando 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 izaje 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 toneladas trasiegan combustible con un flujo promedio de descarga de 2000 a 2700 t/h.

El oleoducto de tierra está formado por dos líneas paralelas de diámetro nominal de 500 mm, con un largo aproximado de 2400 m, el material de las tuberías es de acero al carbono desnuda interiormente y con recubrimiento exterior de pintura poliuretano.

El petróleo es transportado hasta el puerto de Moa en buques, teniendo dos puntos de recepción que son el Muelle # 1 y el Campo de boyas donde se descarga el combustible.

Por el muelle # 1 atracan los barcos cisterna, con capacidad para unas 28 000 t y por el campo de boyas atracan los buques tanques con capacidad para unos 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.

1.9. Características Técnicas del tanque # 5 de almacenamiento

El almacenamiento de crudo pesado se realiza en el tanque # 5, para la extracción de los residuos del petróleo se empleara una bomba de tornillo que cumpla con las condiciones de trabajo de acuerdo con las características técnicas del tanque siguientes.

Código: 385P-TK-5.

Propósito: almacenamiento de combustible (crudo pesado).

Capacidad: 15 000 m³.

Altura: 11000 mm.

Diámetro Interior: 44 196 mm.



Techo: Cónico.

Espesor del tanque: 17.4 mm.

Diámetro del plato: 44 842 mm.

Diámetro del racor de entrada y salida: 426 x 9 mm.

1.10. Conclusiones del capítulo 1

1-Los métodos de formación y extracción de los lodos petrolizados han sido poco estudiados por la Empresa Puerto de Moa.

2-La temperatura tiene una gran influencia sobre la viscosidad de los petróleos y sus residuales, con el incremento de la temperatura disminuye la viscosidad.

3-Para el transporte de material con alta viscosidad como el petróleo y sus residuales se utilizan bombas de tornillo debido al régimen del fluido.

4-Estudios realizados demuestran que los residuos poseen valor calórico para su posible recirculación o posteriores utilidades.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción del capítulo

En la Empresa Puerto Moa, los sistemas de almacenamiento de petróleo tienen como problemática la sedimentación del petróleo provocado por las bajas temperaturas y la formación de otros compuestos, el oxígeno atmosférico reacciona con los compuestos no saturados dando origen a gomas y ácidos que coprecipitan con otras impurezas, dando lugar a la presencia de complejos metálicos, nitrógeno, oxígeno y azufre dificultando su trasiego. Es necesario un sistema de calentamiento para el petróleo almacenado y su residual, este puede usar vapor saturado como agente calentador (serpentín). Manteniendo caliente el petróleo la viscosidad disminuye y puede ser extraído por una instalación de bombeo existente o a través de una nueva.

El **objetivo** del capítulo es:

1. Establecer los parámetros fundamentales para las instalaciones del sistema de calentamiento y bombeo del residual petrolizado en la Empresa Puerto Moa, a partir de sus características.

2.2. Características del crudo cubano almacenado en los tanques

El crudo cubano 650 que es recepcionado en el Puerto de Moa para las operaciones de las Industrias del Níquel consta de las siguientes propiedades físico-químicas expuestas en la tabla 2.1 obtenidas a través del Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET) en Ciudad de La Habana.

Tabla 2.1. Propiedades físicas y químicas del crudo cubano.

Parámetros	Valor	Parámetros	Valor
Punto de congelación (°C)	3	Cenizas (% peso)	0,22
Densidad API	10,6	Viscosidad (cst. a 50 °C)	515,16
Gravedad Específica a 60 °C	0,9902	Densidad (kg/m ³)	998
Agua (% peso)	0,6	Punto de Inflamación (°C)	104
Azufre (% peso)	6,73	Impurezas metálicas (% peso)	1,03
Hidrógeno (% peso)	10,53	Res. Carbón Conradson (% peso)	10,65

Parámetros	Valor	Parámetros	Valor
Carbono (% peso)	80,47	Contenido de sales (mg/l)	267,13
Nitrógeno (%)	0,24		
Sedimento por extracción %	0,080- 0,090	Valor calórico ASTDM-4868	
Contenido de asfálteno	16,66	Bruto	9670
Relación C/H	7.64	Neto	9151

Hay que decir que este combustible, el crudo Cubano 650, es una emulsión con un (70 - 75%) aproximadamente del yacimiento donde se extrae (en dependencia del pozo) y un (25 - 30%) de nafta o petróleos mas ligeros con menor porcentaje de azufre, baja densidad y viscosidad.

2.3. Características del residual depositado en los tanques de almacenamiento

Durante el almacenamiento del crudo cubano en los depósitos de la empresa Puerto Moa, se precipitan un grupo de hidrocarburos sólidos producto a ciertas condiciones físicas, químicas y biológicas dando lugar a los lodos petrolizados que presentan las siguientes propiedades ya expuestas por (Esono, 2009).

El **punto de inflamación** del residual se determino por la Norma Cubana: (NEIB01– 12 – 21: 1982).y la internacional (ASTM D – 93). Estos resultados demuestran que la muestra al superar un valor de temperatura mayor (110 °C) se enciende, esta será el punto de inflamación y esta temperatura se deberá tener muy en cuenta, a la hora de calentar o transportar el residual.

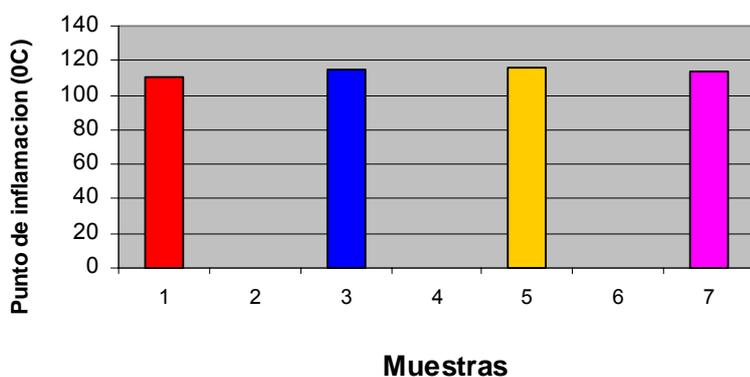


Figura 2.1. Resultados analíticos del punto de inflamación.

Contenido de asfaltenos: Utilizando el método analítico por gravimetría, con el empleo de las normas cubana NC: IP 143/90BSI2000: 199333-16:1984, los equipos de reflujo con n-heptano y balanza. Son obtenidos los valores de asfaltenos de diferentes muestras, donde se observa que las muestras se encuentran en un rango de 40 a 46 por ciento de asfaltenos, como se muestran a continuación en la figura 2.2

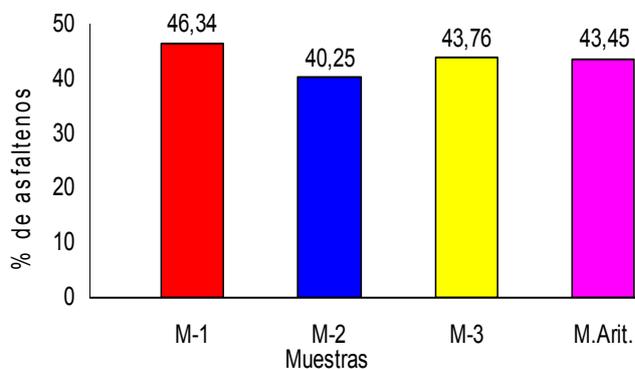


Figura 2.2. Comportamiento del porcentaje de asfalteno contenido en el residual.

Contenido de cenizas: con el empleo de las normas (NC: 33-16:1986) se determina la calidad del residual debido a la presencia de impurezas minerales (compuestos de aluminio, hierro, calcio, silicio y otras), cuya cantidad no solo depende de las impurezas minerales, sino también de los elementos altamente corrosivos que la acompañan en la zona de baja temperatura. Los valores obtenidos se muestran en la figura 2.3, donde se pudo demostrar que la muestra número dos con el mayor valor de 12,72 %, representa un valor alto de impureza en el residual.

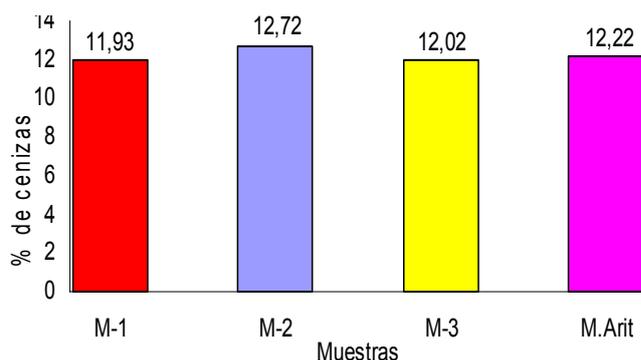


Figura 2.3. Comportamiento del porcentaje de cenizas contenido en el residual.

Elementos químicos disueltos en el residual: se determinó por espectrofotometría de absorción atómica y la utilización de las normas cubanas NC: 33 – 31: 1985. Como se muestra en la figura 2.4, se observa que el hierro, el aluminio y el silicio arrojaron los valores más altos de contenidos en el residual. Sobre la base de estos resultados, se puede afirmar que este residual contiene un alto porcentaje de elementos metálicos.

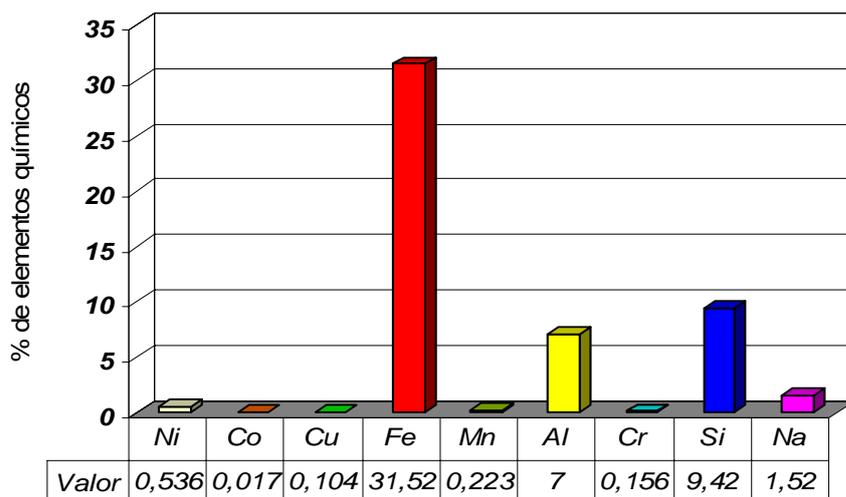


Figura 2.4. Representa el porcentaje de elementos químicos en el residual.

Carbón conradson: con la norma cubana NC: 33-16:1985 y utilizando el equipo de conradson. Se determina la cantidad del mismo que interviene negativamente en la calidad del residual y provoca el desgaste de los equipos en la base de petróleo, mediante la formación de piedras como impureza mecánica. Los valores obtenidos se muestran en la figura 2.5.

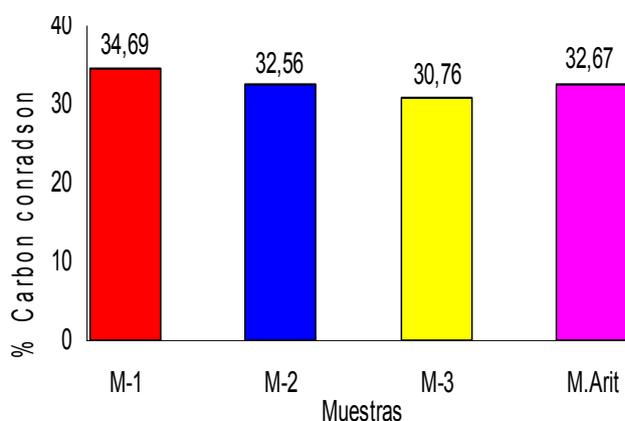


Figura 2.5. Comportamiento del porcentaje de carbón conradson contenido en el residual.

2.4. Tipos de intercambiadores según el método de transferencia de calor

Termointercambiadores de superficie, en los cuales la transmisión de calor entre los ambientes transcurre a través de la superficie de intercambio térmico, que los separa una pared sólida, son los que se emplean con más frecuencia y sus estructuras son muy diversas.

Termointercambiadores de mezclas, en los cuales el calor se transmite desde un ambiente a otro mediante su contacto directo, en los cuales el calentamiento de las

sustancias líquidas tiene lugar debido a su contacto con cuerpos sólidos calentados con anticipación, el relleno que llena el aparato y que se calienta por otros calentadores (Kupriczka, 2002).

En la tecnología química se emplean termointercambiadores fabricados con los metales más diversos (aceros al carbono y aleados, cobres, tantalio y otros). La elección del material está relacionada fundamentalmente con su resistencia a la corrosión y su conductividad térmica, además la estructura del aparato depende considerablemente de las cualidades del material elegido (Kasatkin, 1985).

2.4.1. Características comparativas de los intercambiadores de calor

Termointercambiadores sumergidos el líquido, gas o vapor se mueve en el serpentín espiral, hecho de tubos con diámetro de 15-75 mm, sumergido en el líquido y situado en el cuerpo del aparato. Debido al gran volumen del cuerpo, donde se halla el serpentín, la velocidad del líquido en el mismo es insignificante, por lo cual, son bajos los valores del coeficiente de emisión térmica por el exterior del serpentín.

Para elevar el coeficiente de emisión térmica, se aumenta la velocidad del líquido en el cuerpo, instalado en el un vaso interno, pero, al mismo tiempo, se reduce considerablemente el volumen útil aprovechable por el cuerpo del aparato. No obstante, en ciertos casos, el enorme volumen de líquido que rellena el cuerpo tiene importancia positiva, puesto que garantiza un funcionamiento más estable del termointercambiador y los tubos del serpentín se ajustan en los soportes.

La estructura del intercambiador de calor deberá satisfacer toda una serie de requisitos, que dependen de las condiciones concretas en las que transcurra el proceso de intercambio térmico (carga térmica del aparato, temperatura y presión bajo las cuales se ejecuta la operación, estado de agresión y propiedades físicas-químicas de los agentes caloportadores, su agresividad química y condiciones de intercambio térmico, posibilidad de contaminación de las superficies de funcionamiento del aparato y otras). Al elegir el tipo de intercambiador es necesario tener en cuenta también la sencillez y compatibilidad del aparato, el gasto de metal por la unidad de calor transmitido y otros parámetros técnicos-económicos. Por regla general, ninguna estructura satisface plenamente todos estos requisitos y deberá elegirse la más conveniente (Kasatkin, 1985).

2.4.2. Materiales para la fabricación de serpentines

Un factor importante, que influye en la elección del tipo de intercambiador, es el precio de fabricación y los gastos de explotación, que se componen del precio de amortización del aparato y el costo de la energía necesaria para vencer las resistencias hidráulicas. Un elemento de vital importancia a considerar en la fabricación de los serpentines reside en el tipo de material, el cual se selecciona en dependencia del medio en que va a trabajar (Kasatkin, 1985), los más empleados son de: Cobre, acero al carbono y aleados.

Intercambiadores de acero de bajo carbono. Se utilizan fundamentalmente por su bajo costo, se sueldan con efectividad y rapidez. En la elaboración de estos tipos de tuberías se emplean aceros de bajo carbono ya que por efecto de calentamiento y enfriamiento no adquieren temple por acritud. Son susceptibles a las aguas marinas.

Intercambiadores de aceros aleados. De mayor costo que las de acero al carbono, se utilizan para instalaciones de alta presión, alta temperatura y de alta resistencia a la acción de fluidos corrosivos. Los elementos de aleación utilizados en los aceros aleados para tuberías son el molibdeno, el vanadio, el cromo, el manganeso, el silicio, el níquel y el titanio. Son susceptibles a las aguas marinas.

Intercambiadores de cobre. Se fabrican generalmente de pequeños diámetros y paredes de poco espesor. Son utilizados ampliamente para aire, vapor, agua, gasolina, sistemas hidráulicos de frenos, etc. Las tuberías de mayor diámetro se utilizan en canalizaciones empotradas para agua (duran más que las galvanizadas), para fluidos refrigerantes y fluidos corrosivos.

2.5. Cálculo de un calentador para petróleo con calentamiento por vapor

El suministro de vapor recalentado a la empresa Puerto de Moa, proviene de la Termoeléctrica ubicada en la Empresa Ernesto Che Guevara, el cual puede ser utilizado para alimentar un serpentín, el vapor llega a una temperatura de 128⁰C y 2,6 atmósferas de presión (atm.). Conociendo las características del caloportador y los accesorios para su transporte, procedemos a establecer la metodología de cálculo para un serpentín teniendo en cuenta las características de la sustancia a transportar.

Para calcular el serpentín se utiliza la metodología expuesta en el (Kasatkin, 1985), a continuación se expone el algoritmo empleado.

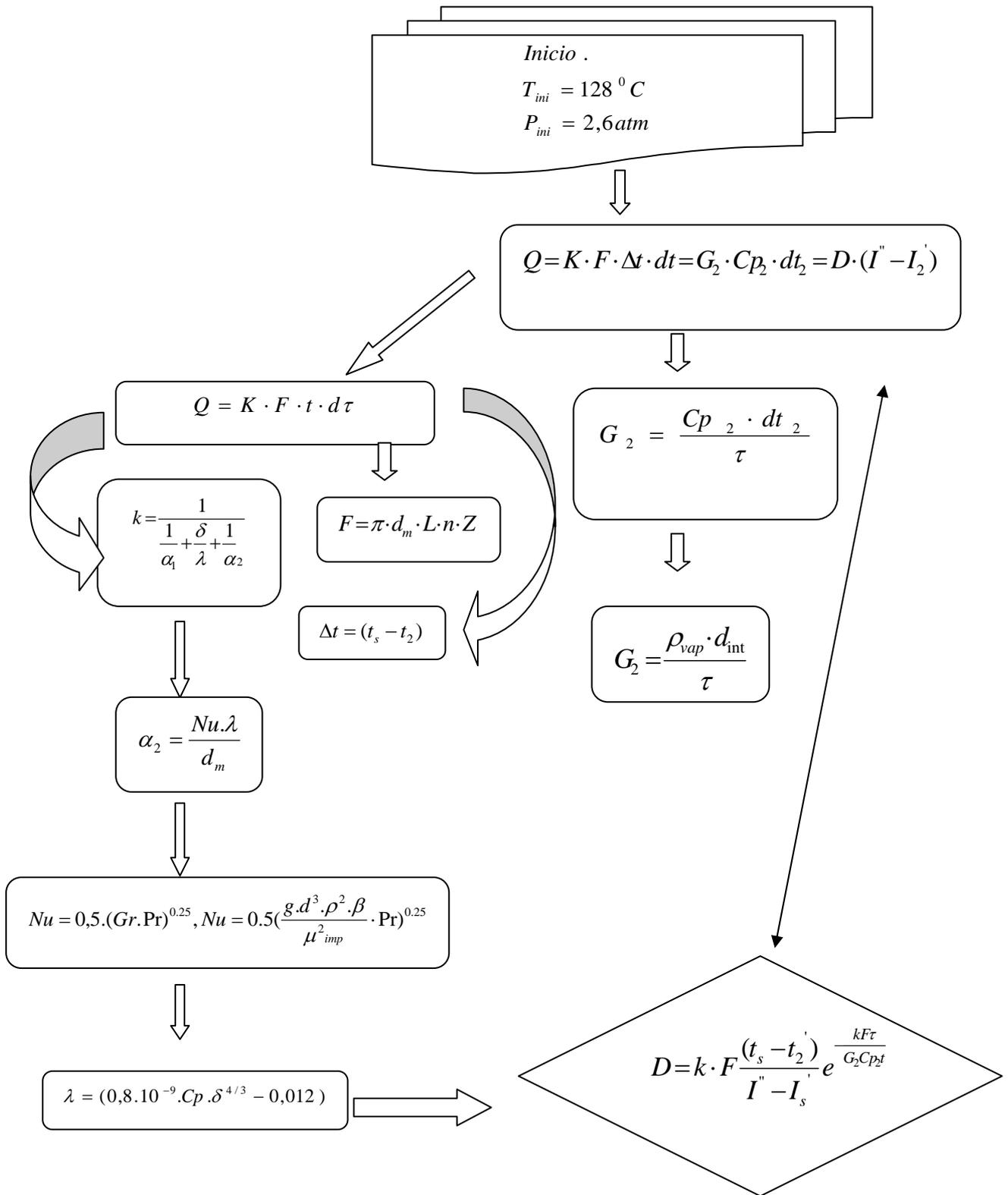


Figura 2.6. Algoritmo empleado en la metodología de cálculo en el Serpentin.

En los aparatos de acción periódica el régimen térmico que se ajusta no es estabilizado, por lo tanto, no se pueden utilizar las ecuaciones que describen el régimen térmico estabilizado; por esta razón la característica fundamental para el cálculo es la cantidad de calor transferida (Q) y la cantidad de vapor (D) que disminuyen en función del tiempo. La variación de temperatura del fluido que se calienta y del vapor que se condensa se puede expresar por la expresión:

$$Q = K \cdot F \cdot t \cdot \tau \quad (2.1)$$

Donde:

Q . Cantidad de calor; del primer fluido al segundo; (kJ/h).

K . Coeficiente de transferencia de calor; (kJ/m²°C).

F . Área de transferencia de calor; (m²).

t . Temperatura final del combustible; (°C).

τ . Tiempo; (s).

Existe una diferencia de temperatura inicial entre el vapor y el combustible, llamada temperatura de apertura en el proceso de calentamiento, el caloportador más frío en el tiempo se expresa a través de la ecuación:

$$\Delta t = (t_s - t_2) \quad (2.2)$$

Donde:

t_s . Temperatura inicial del vapor de; (°C)

t_2 . Temperatura inicial del combustible; (°C)

Posteriormente si el producto de (kF) es la producción de calor específico del calentador por vapor - petróleo, entonces para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor (k), se puede expresar por la ecuación.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.3)$$

Donde:

α_1, α_2 : Coeficiente de transferencia de calor del vapor y del petróleo; (kJ/m²°C).

δ : Espesor del tubo; (m).

λ : Conductividad térmica del acero; (W/m °C).

El coeficiente de transferencia de calor del petróleo (α_2) en el espacio intertubular de los termointercambiadores sumergidos es de poca intensidad, la transferencia de calor transmitida en el proceso de calentamiento ocurre por convección libre y se puede expresar por la ecuación:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_m} \quad (2.4)$$

Donde:

α_2 : Coeficiente de emisión térmica del petróleo; (W/m²°C)

λ : Coeficiente de conductividad térmica del petróleo; (W /m⁰C)

Nu : Coeficiente de emisión calórica.

d_m : Diámetro medio del serpentín; (m).

La conductividad térmica (λ) de cada materia depende de su temperatura y el coeficiente que lo caracteriza por la transferencia de calor por conducción, se puede expresar por la ecuación.

$$\lambda = (8,6 \cdot 10^{-9} \cdot Cp \cdot \delta_p^{4/3} - 0,012) \quad (2.5)$$

Donde:

Cp : Calor específico del petróleo es de; (kW/kg °C).

$\delta_p^{4/3}$: Densidad del petróleo; (kg/m³).

Siendo:

$$C_p = \frac{1}{\sqrt{\delta}} \cdot (1687 + 3 \cdot 39 \cdot t_2). \quad (2.6)$$

La emisión calórica (Nu) no es más que el transporte de calor de una pared plana hacia un fluido o viceversa, mientras que por transmisión del calor se conoce la transferencia de calor desde un fluido más caliente hacia otro más frío, a través de una superficie o pared que los separa y se expresa por:

$$Nu = 0,5.(Gr.Pr)^{0,25} = 0,5\left(\frac{g.d^3.\rho^2.\beta}{\mu^2_{imp}}.Pr\right)^{0,25} \quad (2.7)$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad; (m/s²).

d_m : Diámetro medio del serpentín; (m).

ρ : Densidad del petróleo a calentar; (kg/m³).

μ : Coeficiente dinámico de viscosidad del combustible; (Pa.s).

β : Coeficiente medio de dilatación volumétrica del petróleo.

Pr : Es el criterio del Prant para el combustible.

Posteriormente se determina el área de la superficie de transferencia de calor (F), que puede expresarse por la ecuación:

$$F = \pi \cdot d_m \cdot L \cdot n \cdot Z \quad (2.8)$$

Donde:

L : Longitud del tubo;(m).

n : Número de tubos en un paso; (adimensional).

Z : Números de pasos; (adimensional).

2.5.1. Cálculo del flujo de vapor

El cálculo del flujo de vapor (G_2) que circula por el serpentín en un periodo de tiempo determinado para calentar el combustible, puede ser determinado según la ecuación:

$$G_2 = \frac{\rho_{vap} \cdot d_{int}}{\tau} \quad (2.9)$$

Donde:

G_2 : Flujo de vapor; (kg/s).

d_{int} : Diámetro interior del serpentín; (m).

ρ_{vap} : Densidad del vapor; (kg/m³).

τ_c : Tiempo que demora el vapor en calentar cierto volumen del petróleo; (s).

2.5.2. Cálculo del consumo de vapor para calentar el petróleo

El cálculo de la cantidad de vapor (D) que se necesita para calentar el combustible a las diferentes temperaturas de trabajo, se puede determinar por la ecuación 2.10 que plantea:

$$D = k \cdot F \frac{(t_s - t_2')}{I'' - I_s'} e^{-\frac{kF \tau}{G_2 C_p \rho_2 t_{comb}}} \quad (2.10)$$

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).

2.6. Generalidades de los sistemas de extracción o bombeo

Como se conoce, la bomba es una máquina que realiza el trasiego del líquido mediante la impulsión y, a veces, la aspiración. Desde el punto de vista físico, el trabajo de la bomba consiste en la transformación de la energía mecánica del motor (mando) en energía del líquido, es decir, la bomba comunica cierta potencia al líquido que fluye a través de esta. La reserva de energía que adquiere el líquido en la bomba, permite superar las resistencias hidráulicas al flujo y elevarse a la altura geométrica. La energía que adquiere en la bomba cada unidad de peso del líquido, es decir, el incremento de su energía específica tiene dimensión lineal y representa la altura que crea la bomba (Chercasski, 1986). Según su constitución o forma de las bombas pueden clasificarse en: Volumétricas, de álabes ó centrífugas, de tornillo y axiales. Entre las más difundidas encontramos las bombas centrífugas y las de tornillos.

2.6.1. Parámetros fundamentales de las bombas

Los parámetros fundamentales de las bombas de todo tipo son: El caudal; la altura de elevación y la potencia.

El caudal o capacidad (Q) se expresa en (m^3/s), se define como el volumen del líquido impulsado por la bomba, en la tubería de descarga, en unidad de tiempo.

La altura de elevación o carga desarrollada H se expresa en (m) caracteriza la energía específica comunicada por la bomba a la unidad de peso del líquido. Este parámetro

muestra, en que magnitud aumenta la energía específica del líquido al pasar a través de la bomba y se determina acorde con la ecuación de Bernoulli. La carga desarrollada puede representarse como la altura a la que hay que elevar 1kg del líquido a bombear a cuenta de la energía comunicada a éste por la bomba. Por eso la altura de elevación no depende del peso específico γ (kgf/m^3) o de la densidad ρ (kg/m^3) del líquido impulsado por la bomba.

La potencia útil P_b se expresa en (kW), gastada por la bomba para comunicar al líquido la energía de presión, es igual al producto de la energía específica por el caudal del líquido, como se expresa en la siguiente ecuación expuesta por (Kasatkin, 1985 y Laurencio, 2004).

$$N_u = \gamma \cdot Q \cdot H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (2.11)$$

Donde:

P_b : Potencia de la bomba; (kW).

γ : Peso específico; (kgf/m^3).

Q: Caudal o capacidad; (m^3/s).

H: Altura de elevación o carga desarrollada; (m).

ρ : Densidad del líquido; (kg/m^3).

g: Aceleración de la fuerza de gravedad; (m/s^2).

2.6.2. Características de selección en la operación de las bombas

El objetivo de seleccionar un tipo específico de bomba es optimizar los recursos tecnológicos, minimizando el consumo de energía.

- Punto de operación: Cambiando la curva de la característica de la bomba se puede manipular el punto de operación. Esto se logra con la reducción del diámetro del impulsor y colocándolo en la carcasa original, modificando el diámetro de la tubería o estrangulando el flujo dentro de la misma.
- La curva de la bomba puede modificarse también cambiando la velocidad de trabajo de la misma.
- Niveles de operación variables: Una situación compleja se presenta cuando los niveles de los depósitos no son constantes. Con estas condiciones de trabajo no es

posible lograr un alto rendimiento del sistema y se puede utilizar un motor de velocidad variable.

2.6.3. Principio del funcionamiento de las bombas de tornillo

Las bombas mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles y transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico. La energía se comunica al líquido por medio de un movimiento de rotación, a diferencia de las bombas de desplazamiento volumétrico o positivo, de las rotativas (de engranajes, tornillos, lóbulos, levas, etc.) y alternativas de pistón, de vapor de acción directa o mecánicas.

2.6.4. Principio del funcionamiento de las bombas de tornillo 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 encontramos los siguientes tipos:

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

2.6.5. Ventajas principales de las bombas de tornillo

Son más económicas que las bombas centrifugas. Las bombas de tornillo son muy versátiles en sus capacidades y presiones. Algunas de sus ventajas son:

- De magnífica confiabilidad.
- De diseño sencillo.
- Resistentes.
- De baja velocidad.
- De mínimo desgaste.
- Opera durante años sin problemas.
- Alta eficiencia.
- Poco mantenimiento.

2.6.6. Detalles de funcionamiento de las bombas de tornillo

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 en la tubería de salida (4), según la figura 2.7.

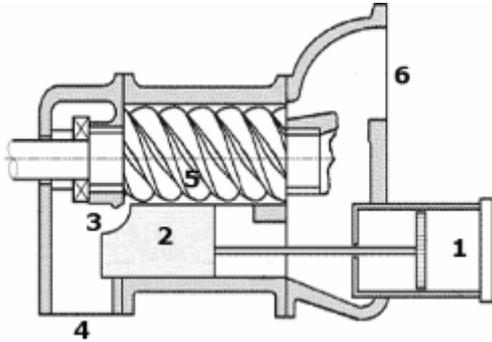


Figura 2.7. Elementos que integran las bombas de tornillo: 1. Pistón regulador de la capacidad, 2. Válvula deslizante, 3. Orificio de escape, 4. Salida de la bomba de tornillo, 5. Tornillo, 6. Entrada a la bomba de tornillo.

2.6.7. Uso de las bombas de tornillo o de roscas

Es un equipo para bombear fluidos viscosos, con altos contenidos de sólidos. La bomba de tornillo al desplazar el líquido no realiza movimientos bruscos. Se utilizan para bombear fangos de las distintas etapas de las depuradoras. Este tipo de bombas son ampliamente utilizadas en la industria petrolera.

2.7. 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 a un 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, para el caso particular que se analiza de un flujo turbulento, la instalación a estudiar se muestra en la figura 2.8.

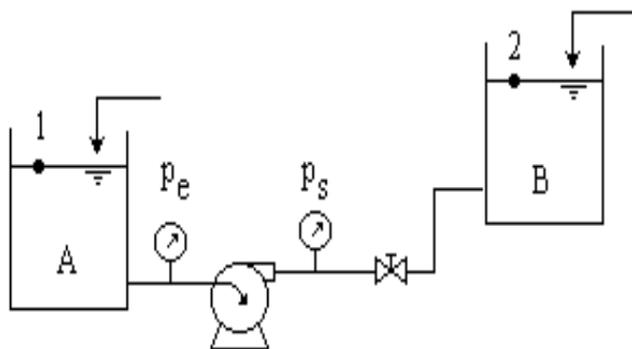


Figura 2.8. Esquema de la instalación de bombeo.

En el caso específico del flujo de suspensiones minerales no newtonianas también se aplica el balance de energía mecánica, hay un equilibrio entre el fluido que pasa por un plano (1) y el que sale por un plano (2), según la expresión 2.12.

$$H_e + \frac{P_e}{\rho \cdot g} + \frac{v_e}{2g_e} = H_s + \frac{P_s}{\rho \cdot g} + \frac{v_s}{2g_s} \quad (2.12)$$

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

Donde:

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, es expresada por la altura (ΔP) y determinada por la ecuación.

$$H_{total} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (2.13)$$

Como la bomba esta acoplada a un motor eléctrico trifásico, al cual se le suministra una potencia (P_{mot}) dada y se determina a través de la ecuación 2.14.

$$P_{mot} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \quad (2.14)$$

Donde:

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

$\cos \phi$: Factor de potencia del motor.

La potencia en el eje del motor eléctrico se puede calcular por 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.

$$P_{eje} = P_{mot} \cdot \eta \quad (2.15)$$

Conocidas estas dos potencias podemos calcular la eficiencia del motor eléctrico:

$$\eta_{mot} = \frac{P_{ele}}{P_{mot}} \quad (2.16)$$

Por último la potencia de la bomba (P_{Bomba}), es decir la potencia suministrada al fluido es:

$$P_{Bomba} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3}}{\eta_{motor}} \quad (2.17)$$

Donde:

Q : Caudal del líquido; (m^3/s).

Así la eficiencia de la bomba (η_b) es:

$$\eta_{Bomba} = \frac{P_{Bomba}}{P_{mot}} \quad (2.18)$$

Posteriormente se determina la eficiencia total de la Bomba ($\eta_{Tot.}$), que es el producto de la eficiencia de la bomba y la de transmisión del motor, según la expresión 2.19.

$$\eta_{Total} = \eta_{Bomba} \cdot \eta_{Motor} \quad (2.19)$$

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.

$$P_{inst} = \beta \cdot P_{mot} \quad (2.20)$$

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).

2.8. Conclusiones del capítulo 2

1. Se caracteriza el petróleo crudo utilizado por la Empresa Puerto Moa y el residual obtenido en los tanques de almacenamiento.
2. Se establece la metodología para el cálculo de un calentador utilizando como fuente de calor el vapor sobrecalentado proveniente de la empresa Ernesto Che Guevara.
3. Se establecen las ecuaciones que caracterizan el transporte de un material que presenta comportamiento no newtoniano y de pseudoplasticidad, como es el caso del petróleo y sus residuos.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción del capítulo

La presencia de compuestos persistentes en suelos o matrices acuosas, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos o los bifenilos policlorados, han conducido al desarrollo de varias tecnologías para el tratamiento de estos contaminantes. En este capítulo se expondrán los resultados analíticos obtenidos mediante la metodología de cálculo expuesta en el capítulo 2 de nuestra investigación, así como la representación gráfica de determinados parámetros a partir de los datos experimentales ya obtenidos.

Finalmente se analiza el efecto económico de la investigación y los posibles daños medios ambientales provocados por estos residuales.

El objetivo del capítulo es:

1. Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2. Resultados del cálculo de un calentador para petróleo con calentamiento por vapor

El cálculo del calentador para petróleo o residual utilizando vapor como medio de calentamiento. Se determina mediante la metodología expuesta en el capítulo II, teniendo como parámetro fundamental la cantidad de calor suministrada expresada por la ecuación (2.1), para resolver esta ecuación hay que determinar primeramente los diferentes parámetros que la componen como: Coeficiente de transferencia de calor; área de transferencia de calor; temperatura final del combustible durante el tiempo de calentamiento.

Como punto de partida tenemos que diseñar un calentador que no sobrepase la temperatura de inflamación del residual de 116°C y teniendo en cuenta la temperatura inicial del vapor 128°C que llega de Che Guevara. El combustible y el residuo se encuentran a una temperatura de 30°C , la temperatura (Δt) según la ecuación 2.2 para la apertura del proceso de calentamiento del caloportador es igual a 98°C .

En la figura 3.1 se muestra la diferencia de temperatura de 98°C , que se alcanza a partir de las temperaturas iniciales del vapor y del combustible a calentar, hasta alcanzar las temperaturas de fluidización del residual deseada, desde $(50, 60 \text{ y } 70)^{\circ}\text{C}$.

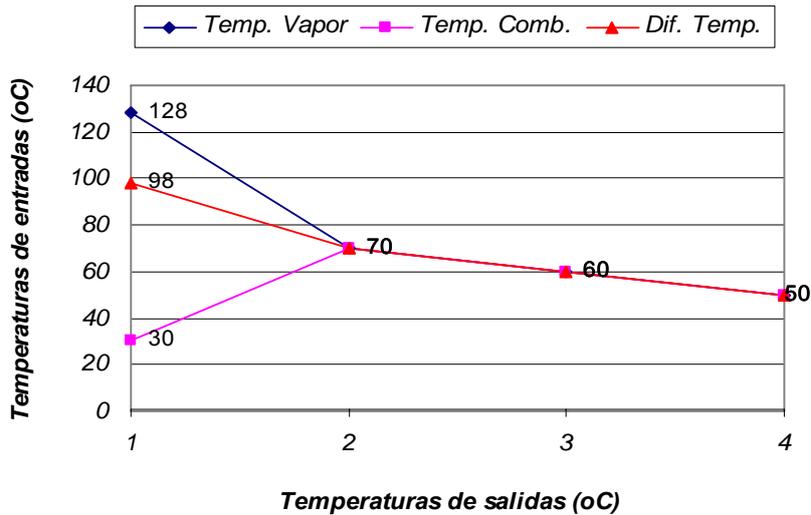


Figura 3.1. Diferencia de temperatura alcanzada para calentar el combustible.

La producción de calor específico del calentador (kF) es por vapor - petróleo, entonces el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor (k), se calcula por la expresión: 2.3, donde (δ) es el espesor del tubo igual a 5mm, la conductividad térmica del acero (λ) es igual 203 expresado en $W/m^{\circ}C$, el coeficiente de emisión térmica del vapor cuando tiene lugar la condensación en película de agua, varía dentro de los límites desde ($7-12 \cdot 10^3 W/m^2 \cdot ^{\circ}C$), tomando un valor promedio será de ($10 \cdot 10^3 W/m^2 \cdot ^{\circ}C$), entonces será:

$$\alpha_1 = 10 \cdot 10^3 W / m^2 \cdot ^{\circ} C = 10 kW / m^2 \cdot ^{\circ} C$$

Posteriormente se procede a determinar la relación densidad - conductividad térmica del acero:

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,005 m}{203 W / m^{\circ} C} = 0,000025 W / ^{\circ} C = 0,025 kW / ^{\circ} C$$

Para poder continuar con este cálculo es necesario primeramente determinar la conductividad térmica según la ecuación 2.5 hay que obtener primeramente a el calor específico del petróleo (C_p) según la ecuación 2.6, conociendo la densidad del petróleo ($\delta_p^{4/3}$) de ($981,4 kg/m^3$). Obtenemos que calor específico del petróleo sea $C_p = 57,23 kW / kg^{\circ}C$. Por lo que el coeficiente de conductividad térmica del petróleo es $\lambda = 0,05 kW / m^3 \cdot ^{\circ} C$.

Para la determinación de la emisión calórica a través de la expresión 2.7 hay que tener en cuenta la Aceleración de la gravedad (g) igual a $9,81 m/s^2$, Diámetro medio del

serpentín (d_m) igualado a 0,075 m, La (ρ) densidad del petróleo a calentar es 981,4 kg/m³, el coeficiente dinámico de viscosidad del combustible (μ) es de 0,615 Pa.s, Coeficiente medio de dilatación volumétrica del petróleo es de ($\beta=0,042$), en un intervalo de temperatura comprendido entre (39,6 y 119,6 °C), El criterio del Prant para el combustible (Pr) es de 1,965. Sustituyendo estos valores en la ecuación tenemos que $Nu = 2,715$.

Se determina el coeficiente de transferencia de calor del petróleo (α_2) expresado por la ecuación 2.4, donde el diámetro medio del serpentín (d_m) es de (0,075 m). Sustituimos los valores obtenidos y tenemos que $\alpha_2 = 1,81kW / m^2 \cdot ^\circ C$.

Entonces finalmente para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor (k), por la ecuación 2.3 será $k = 1,176 kW / m^2 \cdot ^\circ C$.

Posteriormente se determina el área de la superficie de transferencia de calor (F), expresada por la ecuación 2.8. Donde la longitud del tubo (L) es igual a 38 m, el número de tubos en un paso (n) igual a 5 y números de pasos (Z) igual a 3. Obteniéndose el valore del área de la superficie de transferencia de calor igual a: $F = 134,3 \text{ m}^2$.

Finalmente se puede obtener el parámetro fundamental para el diseño y para la comprobación del calentador que es la cantidad de calor que se le suministra al medio (Q) y es el parámetro fundamental, expresada por la ecuación (2.1), en este caso se obtuvo para tres rangos de temperatura (50, 60 y 70)°C.

$$Q_{50} = 1,176 kW / m^2 \cdot ^\circ C \cdot 134,3m^2 \cdot 50^\circ C \cdot 1s$$

$$Q_{50} = 7896,84kW \cdot s$$

$$Q_{60} = 1,176 kW / m^2 \cdot ^\circ C \cdot 134,3m^2 \cdot 60^\circ C \cdot 1s$$

$$Q_{60} = 9476,21kW \cdot s$$

$$Q_{70} = 1,176 kW / m^2 \cdot ^\circ C \cdot 134,3m^2 \cdot 70^\circ C \cdot 1s$$

$$Q_{70} = 11055,6kW \cdot s$$

Entonces el calor suministrado al serpentín en un segundo por el vapor de agua será igual 7896,84kW · s, 9476,21kW · s y 11055,6kW · s, para cada rango de temperatura. Estos valores permiten determinar la cantidad de vapor necesaria para calentar el

petróleo y el tiempo en que se alcanzará dicha temperatura que se le quiere transmitir a una sustancia de trabajo.

3.3. Cálculo del flujo de vapor

Según la ecuación 2.9 del capítulo 2 para el cálculo del flujo de vapor (G_2) que circula por el serpentín para calentar el combustible, en una unidad de tiempo (1 s), se obtiene que: $G_2 = 0,07749 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$.

3.4. Cálculo del consumo de vapor para calentar el petróleo

La cantidad de vapor (D) que se necesita para calentar el combustible a los diferentes rangos de temperatura (50, 60 y 70) °C, expuesta en el capítulo 2 por la ecuación 2.10 será de:

$$D_{50} = 1,176 \cdot 134,3 \frac{(128 - 30)}{(2720,5 - 2556,6)} \cdot e^{-0,712}$$

$$D_{50} = 46,4 \text{ kg} / \text{h}$$

$$D_{60} = 1,176 \cdot 134,3 \frac{(128 - 30)}{(2720,5 - 2556,6)} \cdot e^{-0,593}$$

$$D_{60} = 52,3 \text{ kg} / \text{h}$$

$$D_{70} = 1,176 \cdot 134,3 \frac{(128 - 30)}{(2720,5 - 2556,6)} \cdot e^{-0,509}$$

$$D_{70} = 56,9 \text{ kg} / \text{h}$$

En la tabla 3 del anexo 3 se encuentra también la cantidad de calor necesario con respecto a la cantidad de calor para los tres rangos de temperatura.

El calentamiento se comporta de forma exponencial, se puede observar que la necesidad de flujo de vapor también será exponencial, según se representa en la figura 3.2. A medida en que se incrementa el suministro de calor al sistema, el gasto de vapor aumenta, lo que demuestra que ambas propiedades en el sistema de calentamiento son directamente proporcionales.

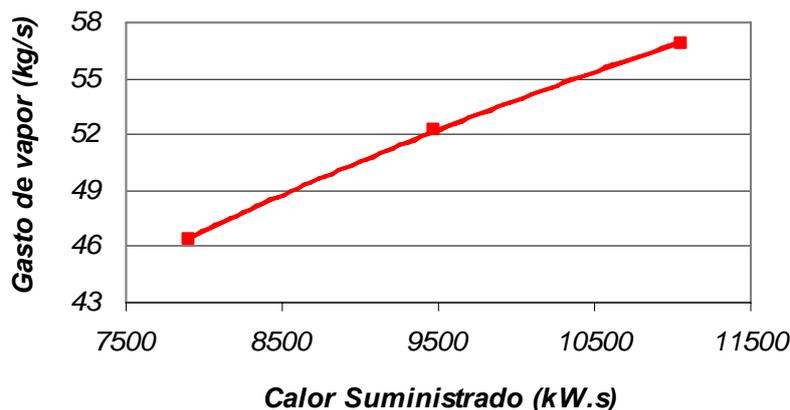


Figura 3.2. Relación de calor y gasto de vapor.

Hay que explicar que este calentador es el existente actualmente en el tanque número 5 de la base de combustibles y la construcción del mismo data del año 1999, los datos técnicos se pueden encontrar en el anexo 2 al igual que la figura 1, hace aproximadamente un periodo de unos meses que se instaló y se echó a andar, pues nunca se había utilizado. Este calentador tiene muchos tubos empalmados o con soldaduras que al encontrarse en un medio altamente corrosivo, tienden a tener salideros provocando la inestabilidad de la misela de petróleo y cediendo a la formación de los lodos. Otra desventaja es que se encuentra a una altura muy elevada con respecto a donde se forma el lodo, la distancia entre los tubos es de 30 cm y con respecto al fondo del tanque es de 40 cm y no calienta toda la superficie del fondo del tanque con la misma intensidad por la forma geométrica del mismo por lo que en los lugares donde no hay suficiente calor se sedimentara más el residual.

Por todas estas razones, el calentador existente puede utilizarse para bajar la viscosidad de los petróleos crudos pesados y ser bombeado a la instalación de almacenamiento de la industria Che Guevara, pero no se podría utilizar para extraer el residuo sólido, por que para alcanzar la temperatura de trabajo del combustible de 50 °C en todo el tanque demora un tiempo de 5 días, luego se cerrará la válvula de entrada del vapor recalentado para evitar que ocurra un aumento de temperatura mayor a la del punto de inflamación. El combustible permanece con esta temperatura durante tres días aproximadamente, y así se repite la operación hasta los 20 días de trabajo, en que se emplea todo el petróleo en el proceso de combustión de los generadores de vapor de la termoeléctrica de la empresa Ernesto Che Guevara. El condensado demora de 2 a 3 segundos, después de entrar el vapor al serpentín. No existen instrumentos de medición (flujómetro o manómetros, termopar) que midan las

condiciones de entrada del vapor a la entrada del serpentín y a la salida del condensado.

Con todos estos criterios expuestos anteriormente nos damos cuenta que hace falta diseñar otro sistema de calentamiento con el objetivo de disminuir su altura, hasta la altura de formación de los lodos para que pueda ser calentada y extraída esta sustancia, este sistema de calentamiento debe ser en forma de espiral o como se muestra en figura 2 del anexo 4 para que la forma geométrica del mismo permita una mayor distribución del calor y pueda alcanzarse la fluidización del residuo.

3.4.1. Resultados obtenidos en la metodología de cálculo planteada

En la base de combustibles de la empresa puerto de Moa existe instalado un sistema de bombeo compuesto por una bomba de tornillo y un motor, cuyas características pueden observarse en el anexo 1 y 2. Esta instalación será evaluada para transportar el residuo para ver si con esta misma bomba puede ser bombeado el residual petrolizado sin necesidad de construir otra instalación.

Los datos de partida para evaluar el sistema de bombeo se encuentran tabulados en el anexo 4. Según la ecuación 2, 13 del capítulo 2 para el cálculo de la altura total a la que puede ser enviada la sustancia de trabajo para diferentes gastos de la bomba se obtuvo y se puede observar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de altura en dependencia del caudal.

Caudal(m ³ /h)	Altura(m)	Caudal(m ³ /h)	Altura(m)
0,044	5	0,038	20,2
0,043	10	0,036	23
0,042	15	0,035	25
0,0402	17	0,033	27
0,039	19	0,032	30

Con la base de los datos calculados, se construyeron las curvas características de la bomba en condiciones normales y superiores a las de trabajo. Donde se pudo demostrar en la figura 3.3 que el menor valor de (0,032 m³/s) del caudal, se encuentra

a los (30 m) de altura y el mayor valor de (0,044 m³/s) del caudal, se encuentra a los (5 m) de altura. Estos datos se deberán tener muy en cuenta, a la hora de transportar el residual.

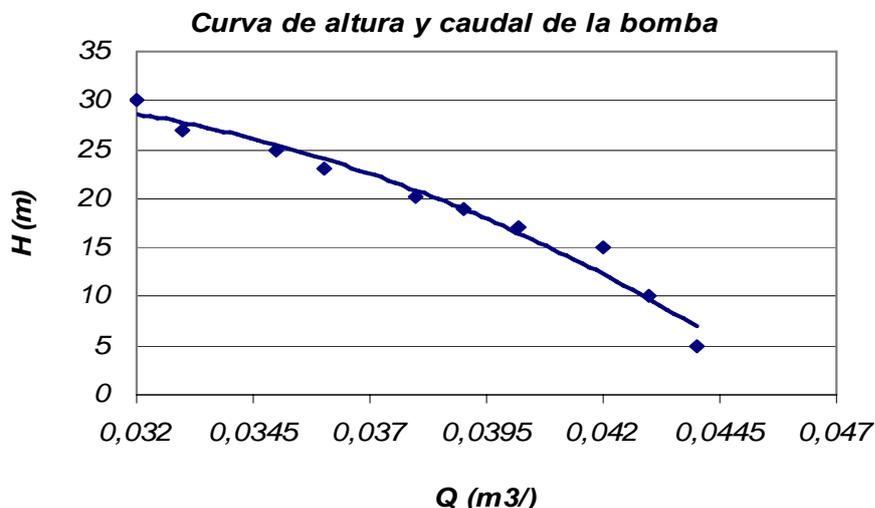


Figura 3.4. Relación entre la altura y el caudal.

Otro parámetro fundamental en la explotación de la bomba, es la relación entre la potencia de la bomba y el caudal a transportar, la potencia de la bomba se determina por la ecuación 2.17 según el capítulo II valores obtenidos que se muestran a continuación en la figura 3.4, pero antes se tuvieron que determinar otros parámetros como eficiencia del motor (η_{mot}) ecuación 2.16, potencia del eje del motor (P_{eje}) ecuación 2.15 y la potencia del motor eléctrico por la ecuación 2.14, Los resultados de estos parámetros se pueden observar en la tabla 2 del anexo 3. Donde se pudo demostrar que 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.

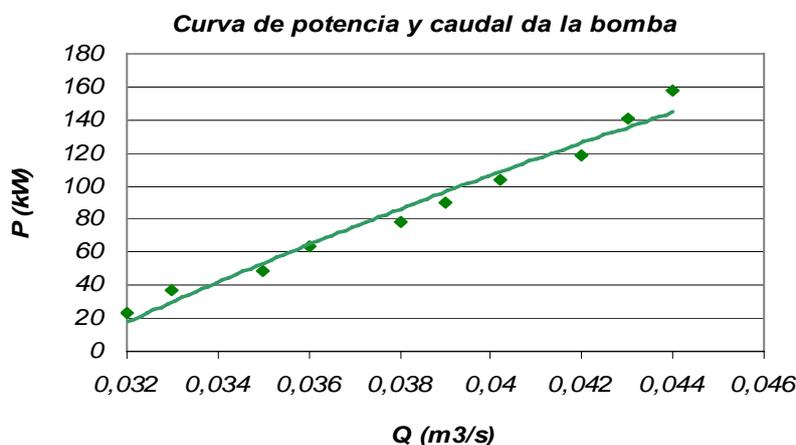


Figura 3.5. Relación entre potencia del eje de la bomba y caudal.

Otro parámetro muy importante dentro del rango de operación de la bomba, es la eficiencia alcanzada por la misma durante el período de explotación. Los valores obtenidos a partir de la ecuación 2.18 se muestran a continuación en la figura 3.5, donde se pudo demostrar que el menor valor ($0,032 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (67 %) de eficiencia y el valor medio ($0,036 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (71 %) de eficiencia, mientras que el mayor valor ($0,044 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (68 %) de eficiencia. Estos datos se deberán tener muy en cuenta a la hora de transportar el combustible o el residuo.

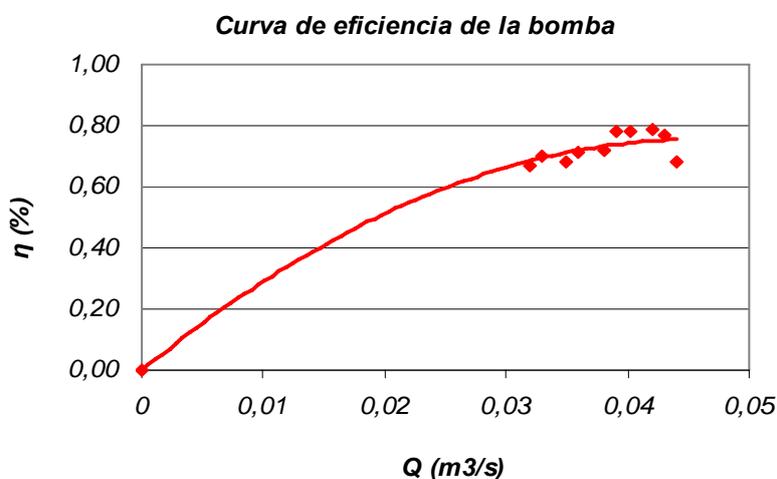


Figura 3.6. Relación entre eficiencia de la bomba y caudal.

Otro parámetro que se debe tener presente en la explotación de la bomba, es la selección del motor que se acoplará con el eje de de la bomba. Los valores obtenidos que se muestran en la figura 3.6, donde se pudo demostrar que el menor valor de (33 kW) de potencia, se encuentra a los ($0,032 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal y el mayor valor de (236 kw) de potencia, se encuentra a los ($0,044 \text{ m}^3/\text{s}$) del caudal, donde el valor de potencia de trabajo del motor, se encuentra en rango superiores e inferiores del calculado.

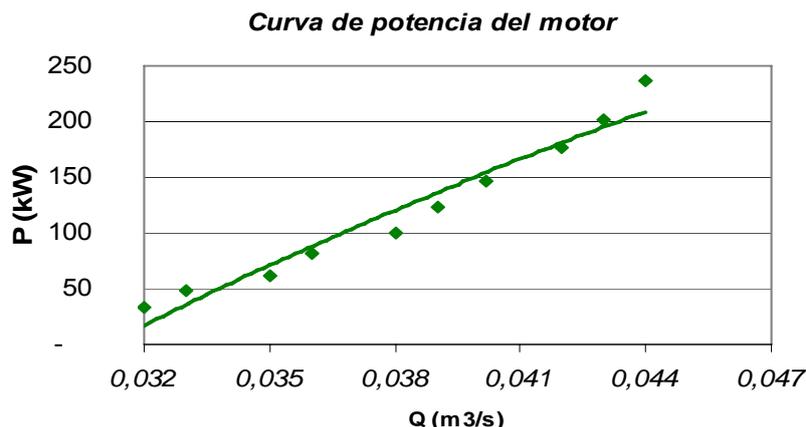


Figura 3.7. Relación entre la potencia del motor y caudal.

También, uno de los parámetros más importantes dentro del rango de operación del motor, es la eficiencia alcanzada por el mismo durante el periodo de explotación. Los valores obtenidos se muestran en la figura 3.7, donde se pudo demostrar que el menor valor ($0,032 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (80 %) de eficiencia y el valor medio ($0,036 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (90 %) de eficiencia, mientras que el mayor valor ($0,044 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (95 %) de eficiencia. Estos datos se deberán tener muy en cuenta a la hora de transportar el residual.

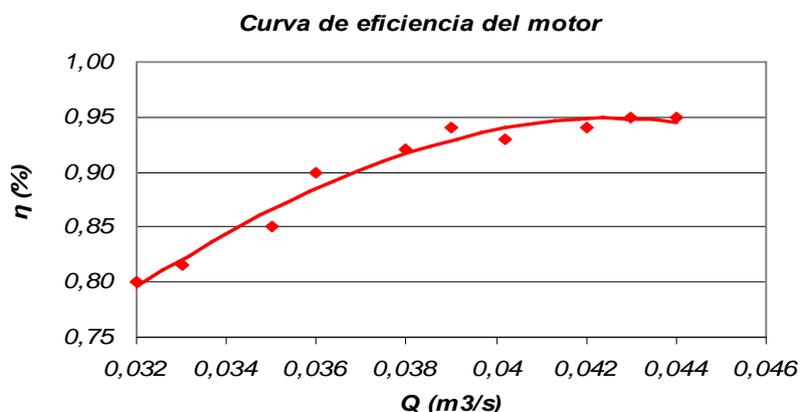


Figura 3.8. Relación entre eficiencia del motor y caudal.

Por último, resumiendo los valores experimentales obtenidos de eficiencia y caudal de la bomba para el residual, a la mayor temperatura analizada de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ a través de todo el sistema, se muestran en la figura 3.9, donde se pudo demostrar que el menor valor ($0,0000048 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (67 %) de eficiencia y el valor medio ($0,0000059 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (71 %) de eficiencia, mientras que el mayor valor ($0,0000091 \text{ m}^3/\text{s}$) de caudal se encuentra a (68 %) de eficiencia. Estos datos se deberán tener muy en cuenta a la hora de transportar el residual.

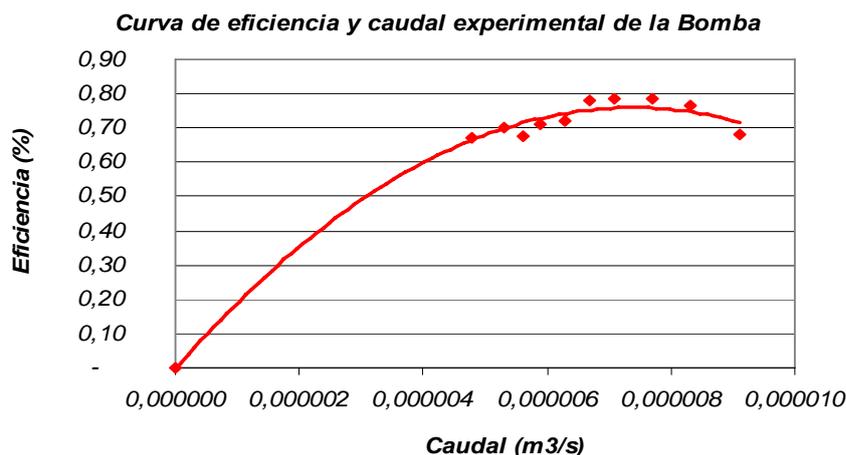


Figura 3.9. Relación entre eficiencia de la instalación y el caudal.

Si analizamos los resultados calculados y los obtenidos experimentalmente, y los comparamos con los que entrega el fabricante de la bomba a través de la teoría de la semejanza, vemos que la bomba instalada cumple con los parámetros obtenidos de altura, potencia, caudal y eficiencia de la bomba, donde puede observarse muy claramente que los resultados obtenidos siguen la misma tendencia de curva gráfica que los entregados por el fabricante.

Así, podemos concluir que se puede confiar en los datos entregados por el fabricante expuestos en el anexo1, para el uso de esta bomba en el trasiego de este combustible y sus residuales ya que al aumentar la temperatura, la viscosidad disminuirá y se comportará de la misma manera que el petróleo, aunque se pueden emplear otras bombas con características similares, de mayores y menores parámetros, según la aplicación práctica a tener en cuenta.

También hay que decir que la succión de la bomba se encuentra en un lateral del tanque, pero el fondo del mismo es cónico, si la sección se encontrara en el centro del fondo la conicidad ayudaría a mover el lodo hacia la salida y se depositará menos, siendo más eficiente el sistema de calentamiento. El calentador que debe calcularse e instalarse debe ser parecido al que se encuentra en la figura 2 del anexo 4.

3.5. Valoración Económica

Para la estimación de los costos no sea empleado ninguna metodología de cálculo existente, más bien se ha tenido presente el precio del barril de petróleo en el mercado y el costo para generar el vapor necesario para calentar el petróleo y sus residuales, así como el costo por transportación.

La cantidad de petróleo necesaria para producir una cantidad de vapor determinada se calcula por la norma petróleo-vapor. El vapor que se recibe en las instalaciones de la Empresa Puerto Moa, procede de la empresa Che Guevara, cuya norma petróleo-vapor es de 0,073 Ton/Ton. El caudal de vapor requerido para elevar la temperatura del residuo a 70°C, es de 56,9 Kg/h, lo que representa un consumo de vapor en 5 días de 6828 Kg, o sea 6,828 Ton de vapor.

Conociendo la norma de la Empresa Che Guevara, se determina que la cantidad de petróleo requerida es de 0,498 Ton.

Tabla 3.2. Costo del consumo de vapor requerido para calentar el residuo en CUC.

Consumo de Vapor	Costo de la tonelada de Vapor (CUC)	Costo total del vapor
6,828	41	\$ 279,95

Efecto económico de transporte

Tabla 3.3. Parámetros requeridos para el cálculo de la caída de presión en la tubería.

Parámetros	Valores
K Índice de consistencia másica ($Pa \cdot s$)	132,32
n Índice de la ley de potencia (adimensional)	0,2918
D diámetro de la tubería (m)	0,2502
ρ densidad del fluido (Kg/m^3)	1259
L longitud de la tubería (m)	100
ΔZ diferencia de altura (m)	1,5
ξ coeficientes de perdidas locales	1,3 para codos (2) de 90° 1,0 para salida de la tubería
Pf presión final	2 003 655,8 Pa
Re* (adimensional)	43,3

Costo unitario de consumo energético para transportar el petróleo

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

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

Donde:

C_T -Costo unitario de Transportación, *CUC*.

G_b - Gasto horario de la bomba, *CUC*.

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

L - Longitud de la línea, (*m*).

Gasto horario de la bomba

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

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

Donde:

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

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

Donde:

T_a - Tarifa de corriente eléctrica.

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

K_p - Coeficiente de pérdida.

t_t - Cantidad de horas de funcionamiento.

η_m - Rendimiento del motor eléctrico.

η_b - Rendimiento de la bomba.

Tabla 3.4. Valores de los parámetros analizados para el cálculo del costo de energía eléctrica.

Parámetros	Valores	Parámetros	Valores
$t_t (h)$	24	$T_a (CUC / kw.h)$	0,15
η_m	0,80	$L (m)$	100
$N_n (w)$	89510,4	$Q (m^3/h)$	115,2
K_p (adimensional)	132,32	η_b	0,70

Teniendo en cuenta los parámetros de la tabla 3.2 se obtuvo que el costo para calentar el residual con un flujo de vapor por un tiempo de 5 días sea de 279,95 CUC. A partir de la ecuación 3.1 se obtuvo la tabla 3.4 que representa el costo unitario de transportación del residual sólido petrolizado, el cual es de 259,12 CUC analizando el caudal de la bomba y a una distancia de 100 m. Estos resultados en cierta medida dan una visión del costo total por calentar y transportar el residuo petrolizado que va a ser de 539,07 CUC.

De aprovechar el poder calórico de estos residuales por las industrias del cemento y del vidrio que son altamente consumidores de petróleo, por la que han adaptados quemadores especiales para todo tipo de residuales.

1 Barril = 158,98 litros $1 m^3 = 7$ Barriles

El volumen del sedimento contenido en el tanque es de $48 m^3$, lo que representa un total de 336 barriles de petróleo. Al precio de mercado actual, este sedimento representa \$ 26880 USD si se llegara a quemar o a utilizar para producir asfalto.

Una vez calculados los costos del petróleo contenido en el residual depositado en el fondo del tanque #.5 de la base de combustibles de la Empresa Puerto Moa, podemos asegurar que con la recuperación del volumen de este residual se ahorrarían 26880 CUC, solamente en el tanque de menor capacidad de la base de combustibles de seis disponibles.

3.6. Impacto Medio Ambiental

Durante el proceso de almacenamiento de los diferentes tipos de petróleo en la Empresa Puerto Moa, se forman residuos sólidos petrolizados en el fondo de los tanques. Debido a esta situación disminuye la capacidad de los depósitos, los elementos químicos presentes conllevan a la corrosión del fondo, paredes y cubierta, producto a esto es necesario el mantenimiento o limpieza. Para esta tarea la empresa cuenta con un grupo Técnico que realiza los cálculos de la cantidad de lodo y realiza un estudio y desarrollan las condiciones necesarias de cómo sacar el residuo de la mejor forma. Luego de desarrolladas las condiciones se comienza con la tarea de apertura del tanque buscando la mejor manera de extraer el residuo, el mismo se corta con equipo de oxicorte.

Este trabajo se realiza de forma manual y es de gran envergadura e importancia, exponiendo a un grupo de trabajadores a sustancias tóxicas y volátiles, las herramientas que se utilizan son palas y carretillas para recoger el lodo, los trabajadores cuentan con 15 minutos para arrastrar, barrer o extraer del fondo, todo el sedimento compactado, el alto riesgo que presenta la atmósfera dentro del depósito, de incendiarse o asfixiarse obliga a tomar un grupo de medidas con el propósito de salvar al trabajador de un accidente.

Para la entrada de los trabajadores a estos tanques es obligatorio el uso de los medios de seguridad, para el desarrollo de esta actividad cuentan con botas de goma, fajas, mascarillas contra gases adecuados, cascos, overoles y guantes impermeables.

Además de tener un grupo de medidas de estricto cumplimiento en esta área como:

- No fumar dentro del área de trabajo, ni dentro de la base de combustible.
- Entrar en parejas para la extracción de los residuos.
- Evitar la utilización de equipos y herramientas que puedan producir chispas.
- No entrar en el Tanque sin previa autorización después de realizado el chequeo médico.
- En el área deben estar presente los medios contra incendio, en este caso los carros de bomberos y el personal médico o paramédico con una ambulancia.

Estos residuos sólidos petrolizados no han recibido tratamiento alguno y pueden ocasionar un serio impacto ambiental si son derramados al medio, ya que pueden contaminar el subsuelo y las aguas subterráneas.

De contaminarse las aguas subterráneas puede contaminarse el mar, debido a la cercanía de la base de combustible con el mar. En caso de 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 un contenedor cerrado o piscina impermeabilizada de Hormigón. (Utilizar equipo protector).

Según investigación realizada por Esono, 2009 sobre el residual depositado en el fondo del tanque de la Empresa Puerto de Moa. Existen un grupo de elementos químicos disueltos en el residual del petróleo por encima de los niveles estándares, por lo que son considerados de sustancias tóxicas, establecidas a partir de la norma 08/99 de CUPET y son expresados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Sustancias tóxicas presentes en el residuo sólido petrolizado, ($\mu\text{g/g}$).

Muestras	Pb	Cu	Zn	V	Cr	Ni	Ba
CUPET(1)	150		300		300		20 000

Los trabajadores expuestos a estos residuos pueden sufrir de náuseas o mareos, vómitos, frecuentes dolores de cabezas, en ocasiones desmayos y la aparición de enfermedades cancerígenas, etc.

La biorremediación es una de las tecnologías que pudiera utilizarse para tratar estos desechos, por el bajo costo de su implementación, y por la completa destrucción de los contaminantes, o su transformación a compuestos como ácidos grasos, aldehídos, cetonas, que no son dañinos al medio. Sin embargo, la presencia de compuestos persistentes en suelos o matrices acuosas, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos o los bifenilos policlorados, han conducido al desarrollo de varias tecnologías para incrementar la biodegradabilidad de estos contaminantes.

3.7. Conclusiones del capítulo 3

- Los parámetros calculados para la instalación del sistema de calentamiento para petróleo son los correctos para este tipo de termointercambiador.
- El sistema de Bombeo instalado para bombear el combustible se puede utilizar para el bombeo del residual en condiciones normales de trabajos, con el inconveniente de que debe bajarse su viscosidad.



- Podemos decir que es más económico calentar el residuo para ser transportado que la limpieza y mantenimiento de los tanques.
- El residual es una sustancia clasificada como peligrosa por el efecto que puede causar a las personas que están expuestas a ella y a la naturaleza.

Conclusiones Generales

- Los métodos de formación y extracción de los lodos petrolizados han sido poco estudiados por la Empresa Puerto de Moa. Actualmente el petróleo crudo que se recepciona es el 650 con un contenido de azufre de 6,7 %.
- Estudios realizados demuestran que los residuos poseen valor calórico para su posible recirculación o posterior utilización siendo la temperatura el principal parámetro que influye sobre la viscosidad de los petróleos y sus residuales.
- Los parámetros calculados para la instalación del sistema de calentamiento para petróleo son los correctos para este tipo de termointercambiador, necesitándose 56,9 kg/h de vapor para calentar el petróleo por 5 días para que alcance la temperatura de 50 °C.
- El sistema de bombeo instalado para bombear el combustible se puede utilizar para el bombeo del residual en condiciones normales de caudal 0,044 m³/s, con el inconveniente de que debe calentarse hasta una temperatura de 70 °C.
- Podemos decir que es más económico calentar el residuo para ser transportado que la limpieza y mantenimiento de los tanques.
- El residual es una sustancia tóxica que causa malestares y enfermedades a las personas que están expuestas.



Recomendaciones

1. Se recomienda realizar un estudio para el diseño de un nuevo calentador que sirva para calentar el petróleo pero a la vez caliente el residuo para su extracción.
2. Se analice la posibilidad de cambiar la succión del tanque.
3. Se revise el manual de operación del tanque y el manejo del petróleo con el objetivo de evitar la formación rápida de los lodos.
4. Se debe tener el más estricto control sobre el tratamiento de los residuos y la posibilidad de ser quemados por empresas que poseen quemadores especiales para ello, como son la industria del Cemento y la del Vidrio.

Bibliografía

1. ACOSTA, I; INFANTE, C; LÓPEZ, W. *Efecto de lodos petrolizados y lodos de tratamiento de aguas servidas sobre un suelo calciorthids de la península de Paraguaya*. Agronomía Trop. 1995, 527-537.
2. ÁLVAREZ, J. A, y col. "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, 2004.
3. AL-NIMR, M. A; DAQQAQ y HADER, M. A. *Effect of Working Fluids on the Performance of a Novel Summer Air Conditioning System*, Int. Comm. Heat and Mas Transfer, 28 (4), 2001, 565-573.
4. AMENEIROS, J. A; GARCÍA, O. *Compuesto de lodos generados en sistemas de tratamiento de aguas residuales*, CIMAB, La Habana, Cuba, 2003.
5. BANDALA, M. *Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
6. BANERJEE, T. P. *Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves*. Canadian Journal of Chemical Engineering: 72 (Abril), 207-211, 1994.
7. BENELMIR, R; FEIDT, M. *Heat and mass Transfer in Finned Coil & Exergy Análisis of Heat Transfer*, Proceedings of the International Symposium on Compact heat Exchangers, Grenoble, August 24, 2002.
8. BROWN y ERICKSON. *Measurement and Prediction of the Kinetics of Paraffin Deposition*, 1995.
9. BUSTABAD, O. M; ECHEVERRÍA, N. L. *Flujos de fluidos y separaciones mecánicas*. Departamento de ediciones del ISPJAE, Ciudad de la habana, 1984.
10. CHERCASSKI, V. *Bombas, Ventiladores y Compresores*. Editorial Mir. Moscú, 1986.
11. CHILIIN, A. *Accionamientos Eléctricos*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1988.
12. CLEMENTS.; et al. *Recovering oil from emulsion by stirring, heating and setting*. United States Patent. 4,123,357, 1978.
13. DARBY, R: *Laminar and turbulent pipe flows of non newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomena*, 2000.

14. DEAL.; et al. *Method for cleaning chemical sludge deposits of oil storage tanks*. United States Patent. 4, 770,711, 1998.
15. ESONO, C.N. *Determinación de la Composición Química y las propiedades reológicas del Lodo petrolizado*. (Tutores) DrC. Eulicer Fernández Maresma, MsC. Rafael Castillo Díaz. Tesis en opción al título de ingeniero metalúrgico. ISMMM, 2009.
16. FERNÁNDEZ, L. B. *Introducción a la mecánica de los fluidos*, 2da. Edición, Alfa Grupo, Editorial. México, 1999.
17. FRANCO.; et al. *Process for the thermo-chemical cleaning of storage tank*. United Stated Patent. 5, 580,391, 1996.
18. GARCELL, L. *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas*. Apuntes para una monografía (2), 2001, 1 – 40.
19. GARCELL, L. *Efectos que influyen en la disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura*. Ediciones Pueblo y Educación, 1993.
20. GARCELL, L; DÍAZ, A; SURIS, G. *Transferencia de la cantidad de movimiento, calor y masa*, Ediciones Pueblo y Educación, 1988.
21. GUTIÉRREZ, J. *Contenido de de un estudio de impacto ambiental en el uso de lodos albañales en la agricultura*. CIGEA, La Habana, Cuba, 2003.
22. GUZMÁN y ANDRADE. *Estudió del efecto de las temperaturas en la viscosidad de los líquidos*, 1979.
23. HANNAY, J. *Method for abandoning an underground storage tank*. United Stated Patent, 1993.
24. HERNÁNDEZ, F. E. *Estudio del comportamiento de los residuales de la dársena del puerto de Moa*; Tesis de grado; 2006.
25. JOHNSON, J.; et al. *Process for recovery of tank bottom wastes*. United States Patent. 5, 259,945, 1993.
26. KASATKIN, A. G. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Tomo I, Editorial educación, 1985.
27. KASATKIN, A. G. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Tomo II, Editorial educación, 1985.



28. KUKOR, J. J. y col. *Remediation of contaminates including low bioavailability hydrocarbons*. United States Patent 20020034421, 2002.
29. KUPRICZKA, R. A; ROTKEGEL y WALCZYK, H. *On the airside Heat Transfer Performance of Finned Tube Bundles*, Proceedings of the International Symposium on Compact heat Exchangers, Grenoble, August 24, 2002.
30. LAURENCIO, H. A. *Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad (cola) en el proceso carbonato amoniacal*, Tesis de grado, Moa, 2004, 84.
31. MARTÍNEZ, L. P; LINARES J, A. *Resistance Coefficients of Fittings for Power-Law Fluids in Laminar Flow*. Journal of Food Process Engineering: (24), 2001, 135-144.
32. MARUSKA, Y; RAO, B, *Fuel Science and Technology N°5*, Volumen 2, 1987, 119-168.
33. MATURANO, S. y ZAPANA, L. *Efecto electroreológico en crudos argentinos*, Congreso Producción, 2000.
34. MECHETTI, M, y ZAPANA, L. *Estudios electroreológicos de fluidos basados en dispersiones de asfaltenos*, Congreso Producción, 2000.
35. MECHETTI, M, y ZAPANA. *Estudio comparativo de actividad electroreológica en petróleos argentinos*, I Encuentro Internacional de Física aplicada a la Industria del Petróleo y IV Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada, Bucaramanga, Colombia, 2000.
36. MORAN. *Apparatus and method for removal of sludge from tanks*. United States Patent. 4, 828,625, 1989.
37. MOREJÓN, Y. *Tratamiento a escala de laboratorio de residuos sólidos petrolizados*, Trabajo de Diploma, ISPJAE, Cuba, 2004.
38. MULERO, A; SUERO, M. A; VIELBA, A. *Cuadros F. El Sistema Internacional de Unidades en el supermercado*. Revista Española de Física, Volumen 16, nº 5, 2002, 41-45.
39. NAKAYAMA, T. E. *Pipe Transportation of Minced Fish Paste*. Journal of Food Science: 45 (4), 1980, 844-847.
40. NEKRASOV, B. *Hidráulica*. Editorial Pueblo y educación, La Habana, 1968.



41. OBAMI, H. *Beneficio de petróleo crudo*. (Tutores) Dr. Amaury Palacios R.; Dr. Pedro E. Beyris M. Tesis en opción al título de ingeniero metalúrgico. ISMMM, 2007.
42. ORIOL, J.; et al. *Máquinas de Transporte Continuo*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1988.
43. PALACIOS, F. *Tratamiento, uso y eliminación de lodos urbanos*, La Habana, Cuba. 2003.
44. POWEL, J. E. *System and process for in tank treatment of crude oil sludges*. United States Patent. PCT/US98/13448, 1998.
45. PÉREZ. F, D. *Instalación al estado de los sistemas de tuberías*. Centro de investigaciones hidráulicas, Instituto superior José Antonio Echeverría. Habana Cuba, 1970.
46. PERONA, P. *An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids*. Journal of Food Engineering: (60), 2003, 137-145.
47. PERRY. *Chemical Engineers, Handbook*. Edición revolucionaria. Instituto cubano del libro. La Habana, 1987.
48. PLACENCIA, A. P. *Formulación de emulsiones petróleo pesado en agua*, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Petroecuador/ESPE, 2002.
49. PUPO, L. *Informe anual*. Centro de investigaciones del petróleo (CEINPET), Ciudad Habana, 2002.
50. *EAL DECRETO*, por el que se establecen las Unidades Legales de Medida, de 27 de octubre, 1317/1989.
51. SALDÁS. *Determinación de las propiedades de transporte del petróleo Mesa-30 destinado en la refinería Níco López*. (Tutor) Ma.C. Héctor L Laurencio Alfonso. Tesis en opción al título de ingeniero Mecánico. 2008.
52. SCALLIET. *Process of breaking a sludge emulsion with a ball mill followed by separation*. United States Patent. 6, 056,882, 2000.
53. SKENLLAND, A. *Nom newtoman flow and Heat transfer*. Edición revolucionaria, Instituto cubano del libro, La Habana, 1987.
54. TOOSE, E. M. *A boundery integral method for two dimentional) (non) – Newtonian drops is slow visions flow*. Journal of Non–Newtonian Fluid Mechanics (2), 1995, 129 – 154.



55. WARTEL, M. *Method for cleaning an oil storage tank and device for implementing.* United States Patent. PCT/FR97/02347, 1997.
56. WAISSBLUTH, M.; et al. *El paquete tecnológico y la innovación.* BID-SECAB-CINDA, Conceptos Generales de Gestión Tecnológica, Santiago de Chile, CINDA, col. CyT, N.26. 1990.
57. WELTY, J. R; BANDALA, V. *Wicks Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer.* Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA, 2001.



Anexos 1

Datos Técnicos de la Bomba de Tornillo según especificaciones del Fabricante.

Marca: WOUTTUIN-B.V

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

Tipo: R-02/SDM-PT-46.

Caudal: 154 m³/h.

Altura de presión: 277 N/cm².

Eficiencia: 0,75%.

Velocidad de Rotación: 1160 rev/min.

Motor serie BAO

Potencia nominal: 288 kW.

Asincrónico, trifásico de 2 polos.

Velocidad: 1180 rev/min.

Frecuencia: 60 Hz

Motor: Destinado para el régimen continuo de trabajo alimentado por una red de corriente alterna de 660 Volts, en una instalación estacionaria.

Anexo 2

Características principales del sistema de calentamiento de tubo y coraza existente en el tanque # 5 de la base de combustible.

Equipo	Serpentín de tubos circulares
Fabricación	URSS en 1999
Función del equipo	Calentar el petróleo
Espaciamiento entre los tubos	300 mm
Espesor de los tubos	5 mm
Material de construcción	Acero 20
Conductividad térmica	203 W/m °C
Diámetro interior del tubo	70 mm
Diámetro exterior del tubo	80 mm
Longitud de los tubos en los calentadores locales	1000mm
Longitud total de los tubos en el calentador principal	38000mm

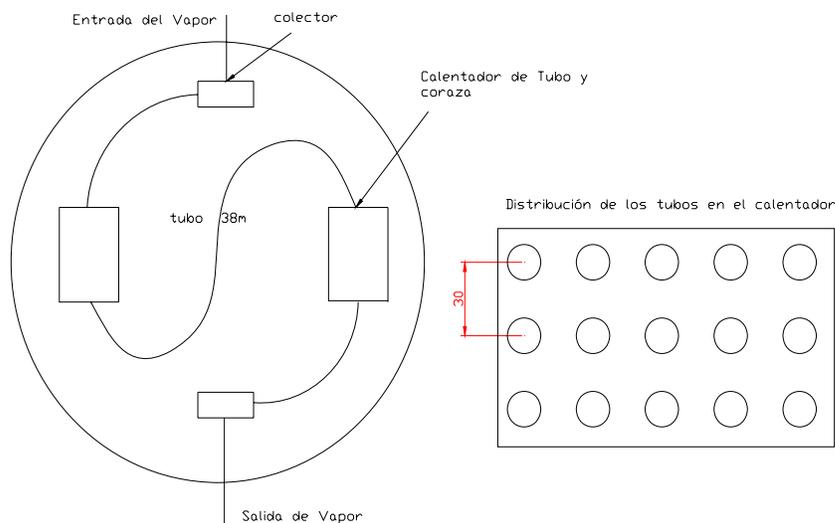


Figura 1. Esquema del tipo de calentador de tubo y coraza instalado en el tanque No.5.



Anexo 3

Tabla 1. Valores de la eficiencia de la instalación y el caudal experimental de la bomba.

Caudal Exp.(m3/s)	η bomba	Caudal Exp.(m3/s)	η bomba	Caudal Exp.(m3/s)	η bomba
0,0000091	,68	0,0000067	0,78	0,0000053	0,70
0,0000083	0,77	0,0000063	0,72	0,0000048	0,67
0,0000077	0,79	0,0000059	0,71	0,0000000	-
0,0000071	0,78	0,0000056	0,68		

Tabla 2. Resultados obtenidos en la metodología de cálculo planteada.

η Total	Caudal(m3/h)	Altura(m)	η bomba	η motor	P Motor	P bomba	η Total
η Total	0,044	5	0,68	0,95	236	158	0,65
η Total	0,043	10	0,77	0,95	201	141	0,73
η Total	0,042	15	0,79	0,94	176	119	0,74
η Total	0,0402	17	0,78	0,93	146	104	0,73
η Total	0,039	19	0,78	0,94	124	90	0,74
η Total	0,038	20,2	0,72	0,92	100	78	0,66
η Total	0,036	23	0,71	0,90	82	64	0,64
η Total	0,035	25	0,68	0,85	62	49	0,58
η Total	0,033	27	0,70	0,82	49	37	0,57
η Total	0,032	30	0,67	0,80	33	23	0,54
	0		0,00	0,00		0	0,00

Tabla 3. Relación de calor y gasto de vapor.

Q	D	t
7896,84	46,4	50
9476,21	52,3	60
11055,6	56,9	70

Anexo 4**Tabla 1. Datos para el cálculo de los parámetros del sistema de bombeo para un rango de temperatura del residual de 50 °C.**

DP(Pa)	t(s)	Q(m ³ /s)	v(m/s)	tao(Pa)	ρ(kg/m ³)	μ(Pa.s)
457986,9	45	0,0000022	0,079	343,49	12,72	3,28
464851,8	42	0,0000024	0,084	348,64	11,87	3,10
474658,8	39	0,0000026	0,091	355,99	11,02	2,94
485446,5	37	0,0000027	0,096	364,08	10,46	2,86
495253,5	34	0,0000029	0,104	371,44	9,61	2,68
510944,7	32	0,0000031	0,111	383,21	9,04	2,60
522713,1	30	0,0000033	0,118	392,03	8,48	2,49
532520,1	28	0,0000036	0,126	399,39	7,91	2,37
550172,7	27	0,0000037	0,131	412,63	7,63	2,36
579593,7	25	0,0000040	0,142	434,70	7,07	2,30

Figura 2. Termointercambiador de calor de tubo.