



Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalúrgica – Electromecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

**Valoración operacional del transporte del combustible pesado CM-650 en el
campo de boya de la Empresa Puerto de Moa**

Autor: Anderson Leyva Tarafa

Tutores: Ms. C. Héctor Laurencio Alfonso

Ing. Raúl Guilarte Garrido

Moa-2012

“Año 54 de la Revolución”



Declaración de autoridad

En decisión conjunta, el autor, Anderson Leyva Tarafa y el tutor, Héctor Laurencio Alfonso, certificamos nuestra propiedad intelectual en esta tesis con el título “Valoración operacional del transporte del combustible pesado CM-650 en el campo de boya de la Empresa Puerto de Moa” a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. “Antonio Núñez Jiménez” de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Anderson Leyva Tarafa

Ms. C. Héctor Laurencio Alfonso



Pensamiento

“Investigar es encontrar valores, es desarrollar una ética, una actitud ante la vida, es sembrar sentimientos, es buscar todo lo que pueda estar en el alma del ser humano.”

Fidel Castro Ruz.



Dedicatoria

A los tutores Ms. C. Héctor Laurencio Alfonso e Ing. Raúl Guilarte Garrido por asesorarme técnica y científicamente y haber entregado lo mejor de sus conocimientos para la realización de este trabajo. A todos los profesores del instituto que dedicaron parte de su tiempo a impartirnos las asignaturas necesarias y asesorarnos en aras de vencer las materias necesarias del presente trabajo de diploma.

A mis compañeros de grupo, y del centro en general, por su apoyo y colaboración.

A los que de un modo u otro contribuyeron con el desarrollo del trabajo.

A todos muchas gracias.



Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi tutor Ms. C. Héctor Laurencio Alfonso y a los profesores del Departamento de Mecánica, por las ayudas prestadas en los diferentes momentos, también agradezco a todos los que contribuyeron a este éxito.

A mis compañeros de aula Fidielquis Terrero Peña, Doinis Enrique, Gustavo Romero, Yurielidis Lupetey a mis amigos del barrio, Roberto Cánepa Suárez, Genoveva Navarro, Eric Sosa, Yulisei Vico y demás.

A mi madre Isabel Tarafa, hermana Tahimi Leyva, hermano Marlo Leyva y mi novia Dayquelin Torres que con el apoyo dado han contribuido a que alcanzara esta meta.



Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis operacional de las condiciones actuales del oleoducto del campo de boya de la Empresa Puerto Moa, Cmte. Raúl Díaz Arguelles, donde se determinó que este presenta ineficiencia en la transportación del crudo pesado. Con el fin de contribuir a las soluciones proponemos incrementar en el oleoducto terrestre revestimiento térmico con una diferencia de temperatura de 1,637 °C y un rendimiento de un 86,6 % con respecto al oleoducto actual. Se propone insertar en la línea submarina la protección catódica y anódica la cual representa una vida activa de 10 años, evitando futuros desastres como el derramamiento de petróleo. Se simuló el punto de operación de la red y la bomba empleada por el barco con una presión de operación de $4 \cdot 10^5$ Pa, por lo que se evidenció que se cumple el margen de seguridad en comparación con la presión admisible. Se determinó que el flujo del combustible actual trae consigo un costo de bombeo de la instalación 53 740 CUC/año lo que implica un gasto económico ascendente.



Abstract

The present paper describes an operating analysis of the existing conditions in the Port of Moa multi buoy mooring system, with serious difficulties in the national crude transport. Thermal coating is proposed in the ground pipeline in order to contribute to the solutions, with a temperature difference of 1,637 °C and a production of an 86,6 % regarding the existing pipeline. The catholic and anodic protection is proposed to be inserted in the maritime line, which represents a real life of 10 years, avoiding future disasters like the fuel leaks. The network operating point and the pump used for the ship with an operating pressure of $4 \cdot 10^5$ Pa was simulated, producing a safety margin in comparison with the admissible pressure. It was determined that the existing fuel has an installation pumping cost 53 740 CUC per year with the consequences of increasing economic expenses.

Índice

Contenido	Pág.
Introducción	1
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación	4
1.1 Introducción	4
1.2 Estado del arte de la temática abordada	4
1.3 Clasificación reológica general de los fluidos	8
1.3.1 Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de los fluidos	11
1.4 Regímenes de flujo de fluidos y el número de Reynolds	12
1.5 Fundamentos de termotransferencia y selección de aislamientos	14
1.5.1 Estados estacionario y no estacionario	14
1.5.2 Movimiento libre y forzado	15
1.5.3 Selección del aislamiento térmico	15
1.6 Generalidades sobre los petróleos pesado	16
1.7 Aplicación del transporte de combustible por tuberías en Cuba	16
1.7.1 Equipos de bombeo utilizados	18
1.7.2 Protección catódica y anódica en tuberías	19
1.8 Descripción del proceso tecnológico del área del crudo pesado	19
1.9 Conclusiones del capítulo	21
Capítulo 2. Materiales y Métodos	22
2.1 Introducción	22
2.2 Especificaciones de la tubería de transporte del combustible y aislamientos	22
2.2.1 Datos del sistema de tubería	23
2.3 Propiedades del combustible cubano CM-650	24
2.4 Propiedades termofísicas del aire	27
2.5 Variación de temperatura del crudo pesado en la tubería	29
2.6 Modelos matemáticos para el flujo de fluidos transportados por tuberías	31
2.6.1 Determinación de pérdidas de presión por resistencias locales	33
2.7 Tensiones provocadas por las temperaturas en las tuberías	34
2.7.1 Cálculo de presión admisible en la tubería	35



2.8 Costos de transporte en el oleoducto	36
2.9 Protección catódica y anódica en la de tubería submarina	37
2.9.1 Propiedades de un material anódico	37
2.10 Técnicas experimentales utilizadas	40
2.10.1 Características de los instrumentos	41
2.11 Conclusiones del Capítulo	42
Capítulo 3. Análisis de los Resultados	43
3.1 Introducción	43
3.1.1 Análisis de la metodología de cálculo en el proceso de intercambio de calor	43
3.2 Análisis de la propuesta en la tubería con aislantes	45
3.3 Punto de operación del sistema de bombeo	47
3.4 Presión admisible y protección catódica en la de tubería submarina	49
3.5 Valoración económica de la propuesta de mejora del sistema	50
3.6 Impacto Ambiental	52
3.7 Conclusiones del capítulo	55
Conclusiones Generales	56
Recomendaciones	57
Bibliografía	58
Anexo	62

Introducción

En la actualidad, los principales oleoductos a nivel mundial trabajan a un 60% de su capacidad operativa. El transporte de combustible por oleoductos en Cuba a partir de 1999 hasta el 2005 ha aumentado un 21% hasta un 24%, siendo el Oleoducto Varadero – Matanzas entre las inversiones ejecutadas, un claro reflejo del desarrollo actual de la industria petrolera cubana, que elimina la transportación de crudo por barco (Columbié, 2006).

El puerto de Moa se utiliza dentro de las formas fundamentales de transportación del combustible, cobrando gran auge debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte, por lo que se requiere una buena instalación de bombeo para lograr el trasiego deseado de este producto tan altamente cotizado. No basta que cada elemento sea eficiente en lo individual y que esté bien construido. Los "buques-tanques", barcos donde el crudo pesado es transportado, se construyen generalmente para este fin y son, en realidad, verdaderos tanques flotantes.

El desarrollo de la ciencia y la tecnología, no ha avanzado a profundidad en la evaluación y perfeccionamiento de los diferentes sistemas de transporte, en el caso específico del transporte del crudo pesado, lo que dificulta en gran medida la evaluación a nivel industrial. A pesar de las grandes limitaciones de toda índole, se busca mejorar eficazmente los medios de producción, relacionados al tema en cuestión, para lograr un resultado eficiente en beneficio del país. En las condiciones actuales de la economía se necesita obtener desde un principio, el máximo de seguridad y economía en los servicios del conjunto en un costo mínimo.

Este objetivo se logra por medio de un riguroso estudio, para que todos los componentes y accesorios que forman la instalación guarden entre sí la relación equilibradamente. La transportación del crudo pesado a través de oleoducto depende en gran medida de las pérdidas de cargas a lo largo de la tubería y esta; a su vez del diámetro, su estado de explotación, tecnología, el régimen de trabajo de la instalación y de las propiedades del combustible a transportar. Unos de los problemas que está presentando el puerto de Moa, es la deficiencia en el bombeo del combustible a causa de las malas condiciones en el

trasiego del mismo a través del oleoducto, por lo que se requiere hacer un análisis minucioso del mismo.

El puerto de Moa consta con las instalaciones que se emplean para la recepción de combustibles pesados y pequeñas cantidades de crudo mejorado cubano; estas no disponen de las condiciones técnicas para realizar las operaciones futuras del transporte del crudo. En la actualidad las tuberías de transporte se encuentran en mal estado técnico, carentes de revestimiento térmico, lo que provocan un excesivo consumo de energía. Además se hace necesario restaurar la protección catódica y anódica en la tubería submarina y sustituir diferentes tramos de tubería que se encuentra perforada por la corrosión lo que impide realizar una operación segura.

A partir de estas deficiencias se declara como **situación problemática:**

La recepción del combustible pesado se hace a través del oleoducto constituido por una línea submarina hasta los tanques de almacenamiento del crudo pesado, actualmente el oleoducto es objeto de estudio, por lo que no permite realizar la descarga en el tiempo requerido, trayendo como consecuencia demora en el tiempo de permanencia de los barcos en el puerto de Moa.

Problema:

Ineficiencia en la transportación del crudo pesado en el oleoducto del puerto de Moa.

Hipótesis:

Realizando un estudio de las operaciones de bombeo en el oleoducto, es posible determinar las causas que provocan la ineficiencia en la transportación del crudo pesado, así como proponer parámetros de flujo para disminuir las pérdidas energéticas.

Objeto:

Oleoducto del campo de boya de la empresa Puerto Moa.

Campo de acción:

Eficiencia energética en el transporte del crudo pesado.

Objetivo:

Realizar el análisis operacional de las condiciones actuales del oleoducto del puerto de Moa empleado en el trasiego de combustible pesado desde el campo de boya hasta los tanques de almacenaje.

Objetivos específicos:

- Analizar los parámetros de operación del oleoducto del campo de boya.
- Evaluar las principales incidencias de los impactos económicos y ambientales del proceso.

Tareas a realizar:

- Realización de una búsqueda bibliográfica y sistematización de los conocimientos relacionados con la temática abordada en el trabajo.
- Describir las características del crudo pesado desde el punto de vista reológico; estableciendo la influencia de estos factores sobre su comportamiento.
- Análisis de los resultados y fundamentación del comportamiento del oleoducto del puerto de Moa.
- Valoración económica e impacto ambiental.

Capítulo 1. Marco teórico de la investigación

1.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla el marco teórico de este trabajo de diploma, partiendo del estudio de las investigaciones realizadas del tema, lo cual nos permite conocer varias teorías y sus deficiencias, en tal sentido se define como **objetivo** del capítulo:

Establecer el estado del arte partiendo de la revisión bibliográfica relacionada al tema y ventajas del proceso en estudio, que conformen la base de la investigación del transporte del crudo pesado por el oleoducto.

1.2 Estado del arte de la temática abordada

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes libros de texto, tesis y artículos referidos al proceso de transporte de fluidos viscosos con intercambio térmico en tuberías. La revisión bibliográfica estuvo dirigida a la búsqueda de información relacionada con fluidos no newtonianos, desde el punto de vista científico – técnico y práctico, que se han efectuado en los últimos años.

El problema de los efectos viscosos de disipación de energía, se empezó a abordar experimentalmente con flujos a baja velocidad en tuberías, independientemente en 1839 por el médico francés Jean Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero alemán Gotthif Hagen.

El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e independientemente, al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes.

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, muchos han sido los autores que abordan esta temática; de vital importancia en el desarrollo de la investigación de fluidos; trabajos como (De la Paz *et al.*, 2002), realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones sufridas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la de fluidez como se deforma el

cuerpo al ser sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas, así como la determinación de sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de deformación ensayadas.

La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtonianos y fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe *et al.*, 1986); (Vélez, 2003); (Sablani *et al.*, 2003).

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería, 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.

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Ibarz *et al.*, 2001), (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Foust *et al.*, 1980); (Macedo *et al.*, 2001).

Sánchez (2002), realiza un estudio numérico de mecánica de fluidos 2D en una contracción brusca para fluidos no newtonianos tipo ley de potencia de Ostwald-de-Waele. Se emplean dos métodos de resolución, el método de los volúmenes finitos y el método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de momentum lineal y de continuidad. En ambos métodos se estudia el comportamiento del fluido para diferentes índices de potencia.

Turro (2002), en su tesis doctoral estudia el hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal, planteando a partir del sistema de correlaciones derivado del modelo físico propuesto, su novedad para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte, derivado de los resultados de la caracterización realizada y del sistema de ecuaciones producto del modelo físico – matemático.

Díaz y Hechavarría, (1999) presentan una metodología para el cálculo del diámetro óptimo en régimen turbulento para cualquier tipo de fluido no newtoniano. Plantean que los costos debidos a tuberías y accesorios pueden representar una parte importante de la inversión total de una planta química. En cualquier estado de las condiciones de flujo, un incremento del diámetro de la tubería para usar, incrementa los costos fijos para el sistema de tuberías, pero disminuye los costos de bombeo, lo que implica la existencia de un costo óptimo. El valor del diámetro puede determinarse combinando los principios de la dinámica de fluidos con consideraciones acerca del costo. El valor del diámetro óptimo está determinado en el punto para el cual la suma de los costos de bombeo y los costos fijos del sistema de tubería es mínimo.

El avance tecnológico en la industria del crudo pesado 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 el crudo pesado parafínicos y asfálticos altamente viscosos, los que recién comienzan en (Maruska *et al.*, 1987).

Para fluidos no newtonianos la literatura científico-técnica no reporta coeficientes de corrección, por lo que se ha generalizado erróneamente la aplicación del símil de viscosidad de estos fluidos con los newtonianos según lo refiere Turiño (1996), lo cual ocasiona errores de pronóstico de la curva de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Liu *et al.* (1998), realizaron el análisis teórico y la modelación del transporte de fluidos no newtonianos (del tipo Herschel-Bulkley, Meter y Cross), tanto en conductos como a través de medios porosos, involucrando tres factores de forma y la viscosidad como necesarios para evaluar las caídas de presión durante el flujo. Adhikari *et al.* (2000), incorporaron el concepto de las redes neuronales, como una nueva herramienta computacional, en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtonianos, obteniendo errores de predicción menores a 5,4 % con respecto a los valores experimentales. Los coeficientes de fricción para el manejo de fluidos reoadelgazantes en diferentes accesorios de 1 pulgada, fueron medidos por Martínez *et al.* (2001), dicho coeficiente fue expresado como función del número de Reynolds generalizado. Perona (2003), reportó los resultados obtenidos en la transición de

régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidos, considerando que las discrepancias observadas en su estudio, pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Falcón *et al.* (2006) Este artículo describe algunos resultados de un estudio llevado a cabo sobre la estabilidad de las mezclas aceite de combustible Diesel. La estabilidad se evalúa por propiedades macroscópicas tales como viscosidad y densidad. También se estudió el efecto de los agentes tensoactivo en estas mezclas. La estratificación de las muestras se tuvo en cuenta durante el almacenaje.

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

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

Las teorías para la determinación de las viscosidades, propiedades reológicas y de transporte de líquidos y mezclas no conducen a un método teórico de estimación, sino a técnicas empíricas basadas en la evaluación de algunas constantes; a partir de las estructuras o propiedades físicas del líquido que se trate. Los métodos se basan en el estudio y correlación de datos experimentales (Acosta, 1995).

La termotransferencia forma parte integral de la teoría general del calor, sus cimientos los puso a mediados del siglo XVII M. V. Lomonósov, quien ideó la teoría mecánica del calor y las bases del principio de la conservación y la transformación de la materia y la energía.

Haoulo *et al.* (2005) evalúan el efecto de la densidad y la viscosidad dinámica de mezclas de petróleo en la determinación del gradiente de presión longitudinal, para el flujo de petróleo en tuberías horizontales, considerando un fluido pseudohomogéneo. García y Haoulo (2007) realizan un estudio teórico-experimental para evaluar diferentes modelos empíricos y mecanicistas utilizados comúnmente para predecir patrones de flujo bifásico de petróleo en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas.

Entre tanto Frigaard *et al.* (2007) proponen los modelos de desplazamiento por tubería de un petróleo crudo; los mismos son aplicables a diferentes regímenes de flujo (transición, laminar y turbulento), considerando diferentes diámetros de tubería.

En estos años se publicó el trabajo de O. Reynolds “Teoría hidrodinámica del intercambio térmico” (1847), en el que se establece la relación entre los procesos de transferencia de calor y la cantidad de movimiento.

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

1.3 Clasificación reológica general de los fluidos

El término reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia. En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtonianos y no newtonianos, según (Skelland, 1970), (Tejeda, 1985), (Perry, 1984), (Díaz, 1989).

La reología es la ciencia del flujo y la deformación, que estudia más que nada a los fluidos no newtonianos, las propiedades que le caracterizan como fluido y no como un sólido. El comportamiento reológico de los fluidos no es más que dicho comportamiento según la viscosidad y densidad del mismo, (Steinkopff, Leipzig. 1942).

Los fluidos que obedecen la ley de viscosidad de Newton, se llaman fluidos newtonianos en ellos existen una relación lineal entre el esfuerzo cortante τ y el gradiente de velocidad $\left(-\frac{dv_x}{dy}\right) = \dot{\gamma}$ que pasa por el origen de las coordenadas, esto significa que la velocidad es constante e independiente del gradiente de velocidad, donde él τ es directamente proporcional al $\dot{\gamma}$, cuya tangente del ángulo de inclinación es igual a la viscosidad en la figura 1.1.

Para los fluidos no newtonianos la relación entre τ y $\dot{\gamma}$ son curvilíneas, es decir la viscosidad μ no permanece constante sino que está en función del gradiente de velocidad, estos no obedecen la ley de Newton. El aspecto de estas dependencias, denominadas curvas de la corriente son distintas para los fluidos no newtonianos de diferentes tipos, se puede dividir en tres grandes grupos.

En el primero figuran los fluidos viscosos o estacionarios, independiente del tiempo, véase figura 1.1, (Geankoplis, 1998).

- Plástico ideal (Bingham): Estos son los más simples debido a que, tal como se muestra en la figura 1.1, sólo difieren de los newtonianos en cuanto a que la relación lineal no pasa por el origen. Para iniciar el flujo se requiere un exceso de cierto valor del τ (llamado límite de fluidez) en N/m^2 . Algunos fluidos tienen un límite (cortante) finito, pero la gráfica del τ contra él $\dot{\gamma}$ se curva hacia arriba o hacia abajo. Sin embargo, esta desviación con respecto a la plasticidad de Bingham suele ser pequeña.
- Seudoplásticos: La mayoría de los fluidos no newtonianos pertenecen a esta categoría e incluyen al crudo pesado, sin embargo la relación entre τ y el gradiente de velocidad, llamada viscosidad aparente μ_{ap} , depende de la magnitud del $\dot{\gamma}$. El valor de la μ_{ap} disminuye al aumentar el gradiente de velocidad y la curva de la corriente gradualmente pasa a una recta cuya inclinación es constante.

- Dilatantes: Estos son mucho menos comunes que los pseudoplásticos y a diferencia de estos, se caracteriza por el incremento de la μ_{ap} al aumentar el gradiente de velocidad. Los fluidos dilatantes están menos propagados que los pseudoplásticos y ordinariamente representa de por sí suspensiones con gran contenido de fase sólida.

Al representar gráficamente la relación del μ como función del $\dot{\gamma}$. Se obtienen curvas de la corriente que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.

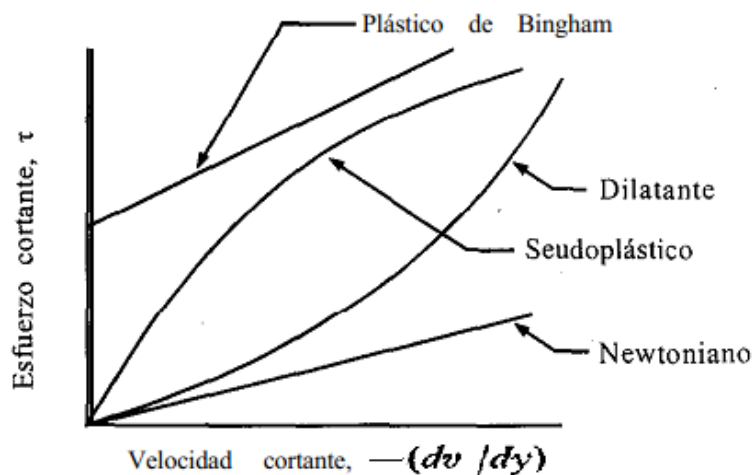


Figura 1.1. Curvas de flujo típicas: 1- Newtonianos; 2- Seudoplásticos; 3- Dilatantes
4- Plástico ideal (Bingham).

Fuente: Garcell, 2001.

En el segundo grupo figuran los fluidos dependientes del tiempo.

- Tixotrópicos: Este al aumentar el tiempo de acción del μ de cierta magnitud la estructura se destruye y la fluidez aumenta. No obstante después de retirar el esfuerzo la estructura del fluido gradualmente se restablece y este deja de fluir. Estos fluidos exhiben una disminución reversible del μ con el tiempo, cuando el $\dot{\gamma}$ es constante. Entre los principales ejemplos pueden incluirse algunas soluciones de polímeros, la manteca, algunos materiales alimenticios y las pinturas. La teoría de los fluidos dependientes del tiempo todavía es un poco confusa (curva 1 en la figura 1.2).

- Los reopécticos difieren, en que al aumentar el tiempo de acción del τ la fluidez de estos disminuyen. Algunos ejemplos son las suspensiones de arcilla bentonítica, algunos soles y las suspensiones de yeso (curva 2 en la fig1.2).

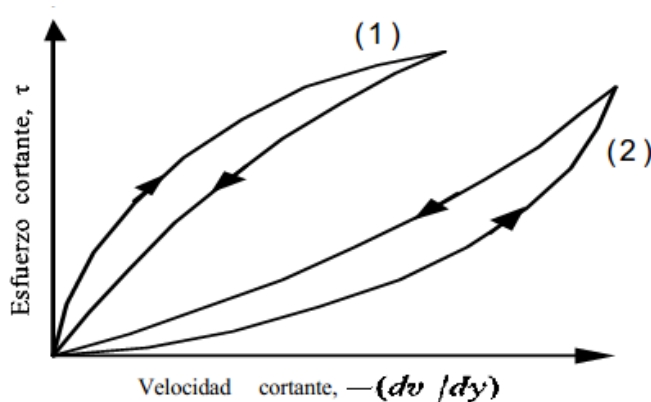


Figura 1.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:

1- Tixotrópico; 2- Reopéctico.

Fuente: Garcell, 2001.

Al tercer grupo se refieren los fluidos viscosos elásticos o líquidos de Maxwell, los cuales fluyen bajo la acción del τ , pero después de retirarlo restablecen en parte su forma, con semejanzas a los cuerpos sólidos. Para estas propiedades se caracteriza ciertas resinas y sustancias de consistencia pastosa.

1.3.1 Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de los fluidos

La viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no está muy afectada para valores moderados de la misma; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, este último crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de estimación de la viscosidad y en general de las propiedades reológicas de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones (Costa, 1984).

El efecto de las temperaturas 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

Diplomante: Anderson Leyva Tarafa
Página 12

Cuando la velocidad de flujo del agua es baja, la coloración es regular y forma una sola línea, esto es, una corriente similar a un cordel, tal como lo muestra la figura 1.3 (a). En este caso no hay mezclado lateral del fluido y éste se desplaza en una línea recta por el tubo. Al colocar varios inyectores en otros puntos de la tubería se demuestra que no hay mezclado en ninguna parte del mismo y que el fluido fluye en líneas rectas paralelas, a este tipo de flujo se le llama laminar o viscoso.

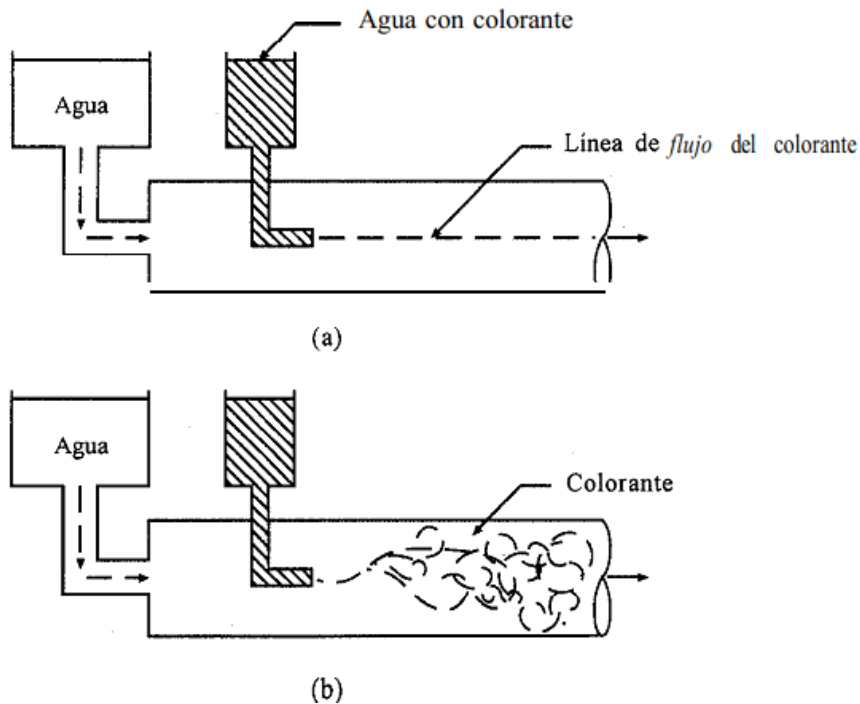


Figura 1.3. Experimento de Reynolds para diferentes tipos de flujo: a) laminar, b) turbulento.

Fuente: Geankoplis (1998).

Al aumentar la velocidad, se ve que al llegar a cierto límite, la línea de colorante se dispersa y su movimiento se vuelve errático, tal como lo muestra la figura 1.3 (b). A este tipo de flujo se le llama turbulento. La velocidad a la que se presenta el cambio de tipo de flujo se llama velocidad crítica.

Con diversos estudios se ha podido demostrar que la transición del flujo laminar al turbulento en tuberías no está sólo en una función de la velocidad, sino también de la

[illegible]

Donde:

Re - es el número de Reynolds; (adim.) D - es el diámetro en (m), ρ - es la densidad del fluido en (kg/m^3), μ - es la viscosidad del fluido en ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) y v - es la velocidad promedio del fluido.

El paso del régimen laminar al turbulento se caracteriza por el valor crítico del número de Reynolds crítico Re_{cr} . Así, por ejemplo, durante el movimiento de los líquidos a través de tubos rectos y lisos $Re_{cr} \approx 2300$ siendo $Re < 2300$ la corriente por lo general es laminar, por lo tanto esta zona de valores de Re se denomina zona del régimen laminar estable del flujo. Por encima de $Re > 2300$ por lo común se observa el régimen turbulento del flujo.

1.5 Fundamentos de termotransferencia y selección de aislamientos

Las investigaciones muestran que la termotransferencia es un proceso complicado. Para su estudio se separa el proceso en fenómenos simples. Se distinguen varios procedimientos elementales en la transmisión de calor (Mijeeva, 1956):

- **Conductibilidad térmica:** La ley fundamental de Fourier establece la cantidad de calor transmitida por conducción a través de un elemento superficial, perpendicular al flujo térmico durante el tiempo, es proporcional al gradiente térmico de la superficie y el tiempo. También constituye que si la temperatura de los diferentes puntos de un sólido, fluido o gas inmóviles es desigual, en estos casos, según demuestra la experiencia, el calor se transmite espontáneamente de las partes que tienen la temperatura alta a las partes cuya temperatura es baja.

1.5.1 Estado estacionario y no estacionario

El conjunto de valores de la temperatura para todos los puntos del espacio en un instante dado se llama campo de temperatura, al mismo tiempo si la temperatura varía con el tiempo, el campo se denomina inestable (no estacionario) y si no varía estable (estacionario).

Intercambio de calor por convección: El proceso de Transferencia térmica de un sólido a un líquido se llama intercambio de calor por convección o emisión calorífica. En este caso la transferencia de calor se realiza bajo la acción simultánea de la conductibilidad térmica y la convección, por eso la convección es posible solamente en líquidos y gases cuyas partículas pueden desplazarse con facilidad.

1.5.2 Movimiento libre y forzado

- Libre: Este opera a consecuencia de la diferencia entre las densidades de las partículas calientes y frías del líquido en el campo de gravitación. El surgimiento y la intensidad del movimiento libre se determina por las condiciones térmicas del proceso y dependen del género del líquido, la diferencia de temperaturas, la tensión del campo de gravitación y el volumen del espacio en el que se desarrolla el proceso. El movimiento libre también se llama convección libre
- Forzado: El movimiento que surge bajo la acción de un agente externo, por ejemplo bomba, ventilador, etc. En caso general a la par con el movimiento forzado puede desarrollarse también el libre.

1.5.3 Selección del aislamiento térmico

Si es necesario reducir la transmisión de calor se debe aumentar la resistencia térmica. Para esto es suficiente aumentar cualquiera de las resistencias térmicas particulares, lo que se puede hacer de diferente modo. En la mayoría de los casos esto se logra, colocando una capa de aislamiento térmico sobre la pared (Mijeeva y Mijeev, 1956).

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

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

- Que tenga una baja conductividad calorífica.
- Que suprima las corrientes de convección.

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

1.6 Generalidades sobre los petróleos pesados

En el petróleo natural, además de hidrocarburos, existen nitrógeno, azufre, oxígeno, colesteroína, productos derivados de la clorofila y de las heminas (porfirinas) y, como elementos; trazas, vanadio, níquel, cobalto y molibdeno. Como consecuencia de los compuestos orgánicos nombrados, el petróleo presenta polarización rotatoria, lo cual revela claramente que se trata de un compuesto de origen orgánico, formado a partir de restos de animales y vegetales. La composición química del petróleo es muy variable, hasta el punto de que los cuatro tipos fundamentales de hidrocarburos: parafinas (hidrocarburos saturados), olefinas (hidrocarburos insaturados), naftenos (hidrocarburos cíclicos saturados o cicloalcanos), e hidrocarburos aromáticos, no solamente son diferentes de un yacimiento a otro, sino también las diversas sustancias que es preciso eliminar más o menos completamente: gas, azufre (que junto con el sulfhídrico, mercaptanos y tioalcoholes pueden alcanzar un 3%), agua más o menos salada, compuestos oxigenados y nitrogenados, indicios o vestigios de metales etc.

1.7 Aplicación del transporte de combustible por tuberías en Cuba

En Cuba el transporte de combustible se emplea fundamentalmente en la industria de generación eléctrica, minera y la metalurgia. El transporte de combustible es una forma de transportación continua de alta productividad cuya característica lo hacen prospectivo para ser aplicado como parte del proceso industrial de obtención del níquel en las diferentes empresas situadas en la zona de Moa. Para poder fundamentar una instalación de este tipo es necesario conocer la velocidad crítica, las pérdidas específicas de cargas, la densidad o concentración de la mezcla, y el diámetro del conducto que permite determinar el régimen racional de trabajo y la selección de los equipos adecuados para el caso

correcto. En el transporte de combustible por oleoducto los costos son mínimos tanto de mantenimiento como en inversión, carga y descarga viene a ser un proceso continuo que puede ser llevado a cabo automáticamente con un esfuerzo mínimo, esto hace que se amortice el costo de las instalaciones, por otra parte este no tiene en cuenta las inclemencias de tiempo ni las condiciones del lugar a transitar, pero tiene sus desventajas, como el rendimiento del oleoducto es constante y el del producto es logrado por la variación de los periodos de bombeo. El transporte de este fluido consiste en el traslado de sustancias de trabajo (combustible) teniendo gran auge en las industrias del níquel. Esta peculiaridad está determinada por las significativas ventajas que este presenta sobre los demás tipos de transporte. El cual garantiza un proceso tecnológico continuo disminuyendo considerablemente el volumen de operaciones principales.

Eleva la productividad de trabajo.

- Posibilitar la automatización de todo el proceso de transportación.
- Las instalaciones y equipos principales son pequeños y de poco peso.

El costo mínimo por esfuerzo realizado por la instalación de bombeo estaría sujeto al incremento del costo por energía que consume la planta, sin embargo la experiencia ha demostrado que esto representa un pequeño porcentaje de los otros costos de notable interés por los gastos e inversiones, es decir que aproximadamente 70% de todos los costos es por capital y (10-15%) por costos de energía. Como indica la lógica y basándose en la naturaleza y el volumen del fluido transportado por unidad de tiempo, las tuberías tienen que ser elaboradas de diversos materiales y de diversos diámetros. En la medida que el diámetro interior de la tubería sea mayor, mayor volumen de fluido por unidad de tiempo podrá trasladar sin que la fricción del fluido al pasar llegue a ser excesiva. Para un volumen de fluido trasladado por unidad de tiempo o gasto determinado, resulta que:

- A mayor diámetro habrá menos fricción entre el fluido y la tubería.
- A mayor diámetro habrá menos caída de presión del fluido al pasar por la tubería.
- A mayor diámetro el fluido tendrá menos velocidad.
- A mayor diámetro la instalación será más costosa.

1.7.1 Equipos de bombeo utilizados

Una bomba hidráulica es una máquina generadora que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía hidráulica del fluido incompresible que mueve, según <http://es.wikipedia.org/>. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

Existe una ambigüedad en la utilización del término bomba, ya que generalmente es utilizado para referirse a las máquinas de fluido que transfieren energía, o bombean fluidos incompresibles, y por lo tanto no alteran la densidad de su fluido de trabajo, a diferencia de otras máquinas como lo son los compresores, cuyo campo de aplicación es la neumática y no la hidráulica. Pero también es común encontrar el término bomba para referirse a máquinas que bombean otro tipo de fluidos, así como lo son las bombas de vacío o las bombas de aire.

La principal clasificación de las bombas según el funcionamiento en que se base: Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico, según <http://es.wikipedia.org/>. En las que el principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez estos tipos de bombas pueden subdividirse en:

- Bombas de émbolo alternativo, en las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. Algunos ejemplos de

este tipo de bombas son, las bombas alternativas de pistón, las bombas rotativas de pistones o la bomba pistones de accionamiento axial.

- Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas, en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son la bomba de paletas, la bomba de lóbulos, la bomba de engranajes, la bomba de tornillo o la bomba peristáltica.
- Bombas rotodinámicas, en las que el principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo.

1.7.2 Protección catódica y anódica en tuberías

En el cátodo el metal de recubrimiento tiene un potencial de electrodo mayor que el potencial del metal base. Para garantizar una buena protección, se necesita que el recubrimiento sea continuo y no poroso. Si no se cumple esta condición se provoca la corrosión mientras que el ánodo en el metal de recubrimiento tiene un potencial de electrodo menor que el del metal base. El recubrimiento protege al metal de un modo electroquímico, en este caso, al formarse el par galvánico, el metal juega el papel cátodo, y se destruye solamente el metal de recubrimiento (Cutiño, 2009).

1.8 Descripción del proceso tecnológico del área del crudo pesado

El proceso tecnológico de la base del crudo pesado comienza con la entrada de los barcos cisternas que transportan el crudo pesado desde otros Puertos de Cuba y el extranjero hasta el Puerto de Moa. El campo de boya 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, operación esta que se ejecuta para asegurar la descarga del combustible. Los Supertanqueros tienen capacidad de 50 000 toneladas los cuales tienen una temperatura inicial de 54 °C disminuyendo hasta 39 °C, hasta los tanques de almacenaje, esto se debe a que el sistema de calentamiento interno en los tanqueros no está funcionando. Los funcionarios marítimos y de aduana realizan su control, para dar

paso al control del nivel, volumen, temperatura, características, propiedades químicas y físicas, recepción de la muestra enviada por la firma que vende el producto y control del nivel en el depósito donde se va almacenar. Concluidas estas actividades comienza la recepción mediante la bomba de tornillo instalada en el barco con una capacidad de bombeo de alrededor de 450 t/h. La transferencia del combustible desde el buque hasta los tanques de almacenaje se realiza mediante una manguera de goma especial y metal con diámetro de 0,25 m y longitud de (4 a 6 m) donde está instalado un manómetro que controla la presión de descarga de las bombas del barco, la que se acopla a la línea submarina de 0,6 m y una longitud aproximada de 1000 m hasta la costa donde se une con el oleoducto de tierra que está formado por dos líneas paralelas.

Para el trasiego del crudo pesado hacia los depósitos se abre la válvula de globo que está después del acople de la manguera y la válvula manual que lo conduce al tanque seleccionado para la recepción. El oleoducto de tierra está formado por dos líneas paralelas de diámetro 0,5 m, con un largo aproximado de 2 230 m y posee las válvulas siguientes (EV 23, 22, 24, 30,31, 16 y 18), el material de la tuberías es de acero al carbono desnuda interiormente y con recubrimiento exterior con pintura de poliuretano. Antes de entrar a la base de combustible ambas tuberías se funden en una sola. Por las características del crudo pesado que se recibirá por la línea, no puede quedar lleno de fluido el oleoducto después del bombeo porque el descenso de la temperatura del combustible hasta la temperatura ambiente incrementa la viscosidad del mismo al grado que pudiera dificultar la descarga siguiente, es por ello que el sistema está concebido para dejar las tuberías llenas de agua de mar que es bombeada del propio barco después de finalizada la descarga. Como el volumen de agua en las tuberías es de aproximadamente 1200 m³, fue necesario proveer la instalación con un tanque auxiliar (TK 6-A) con una capacidad de 2500m³ donde descargar dicha agua para no introducirla en los tanques de almacenaje, la línea de entrada a la intersección con la red de 0,4 m de diámetro quedará siempre llena de petróleo por lo que la tubería está recubierta con aislamiento térmico y entre este y la tubería lleva una resistencia eléctrica de calentamiento para el precalentamiento del petróleo contenido antes de iniciar la descarga. Existen en la Base de Combustible 6 tanques de 20000m³ cada uno (TK1, TK2, TK3 TK4 y TK6) y uno de 15000m³ (TK 5). Este sistema está preparado con sensores agua-petróleo y válvulas

inteligentes para operar de forma automática o manual logrando definir hacia que tanque iría el combustible y el agua de mar, durante los correspondientes desplazamientos realizados al inicio y culminación de las operaciones de recepción del combustible. (Ver anexo 2 y 3)

1.9 Conclusiones del capítulo

1. Es insuficiente la información acerca del flujo del crudo pesado a través del oleoducto y el carácter no estacionario, en específico el oleoducto del campo de boya del puerto Moa.
2. Se describieron las regularidades del transporte del crudo pesado desde el barco cisterna hasta los tanques de almacenaje.

Capítulo 2. Materiales y Métodos

2.1 Introducción

Los conocimientos teóricos acerca del comportamiento y propiedades de transporte del crudo pesado, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la resolución de problemas asociados a la evaluación de los sistemas de transporte del crudo pesado por sistemas de tuberías; en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

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

2.2 Especificaciones de la tubería de transporte del combustible y aislamientos

El material en el oleoducto es acero al carbono ($Mn \leq 1\%$ $Si \leq 0,1\%$), que se emplea para la transportación del petróleo, está ubicado dentro del grupo de materiales de aleaciones especiales por presentar las siguientes propiedades. Acero al carbono: Aleación de níquel-hierro y aleación de cromo con adición de molibdeno y cobre. Presenta excelente resistencia a los ácidos oxidantes, resistencia a la corrosión y el agrietamiento, así como alta resistencia a los ácidos sulfúrico y fosfórico.

Tabla 2.1. Propiedades termofísicas de los aislamientos.

Composición	Propiedades		
	Densidad ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica k_b (W/m·°C)	Capacidad calorífica c_p (J/kg·°C)
Lana de vidrio	32	0,038	835
Placas de aluminio	2702	903	237

Fuente: Incropera y De Witt, 2003.

Tabla 2.2. Propiedades de la tubería.

Composición	Propiedades			
	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·°C)	k_A (W/m·°C)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Acero al carbono (Mn ≤ 1% Si ≤ 0,1%)	7854	434	60,5	17,7

Fuente: Incropera y De Witt, 2003.

2.2.1 Datos del sistema de tubería

- Diámetro exterior de la tubería: 0,6 m.
- Flujo del crudo pesado: 0,051 m³/s.
- Velocidad del flujo: 1,88 m/s (Datos según descarga de los barcos).

Tabla 2.3. Longitud de los tramos de la tubería, cota, cantidad de codos y válvulas. (Ver anexo 2 y 3)

Desde	Hasta	Longitud (m)	Observación	Válvulas de globo	Codos estándar
S-T(Buque)	YE-24"	1000	Submarina 0,6 m	-	2
YE-24"	EST- EC	471	2 Tubo ø 0,5 m	EV-22;EV-24	1
EST EC	EST - T6	268	2 Tubo ø 0,5 m	-	-
EST T6	EST - T2	266	2 Tubo ø 0,5 m	-	2
EST T2	EST - TI	600	2 Tubo ø 0,5 m	-	2
TK H ₂ O -6A	EST - TI	600	2 Tubo ø 0,5 m	EV-30;EV-31	2
SA	TK - 3	25	1Tubo ø 0,5 m	EV-18	2
YE-24'	TK H ₂ O - 6A	260	1Tubo ø 0,5 m	EV-16	1

Fuente: Guilarte, 2012.

2.3 Propiedades del combustible cubano CM-650

En nuestro país, en diferentes procesos se han utilizado diferentes clases del crudo pesado, obtenidos a partir del petróleo crudo, mezclado con otras sustancias para el mejoramiento de sus propiedades, que inciden en el proceso de combustión. Los tipos de crudo pesado que entran el campo de boya generalmente son exportados desde Venezuela. El combustible cubano CM-650 es un derivado del crudo pesado, son obtenidos al mezclar petróleo crudo con nafta y un dispersante de asfáltenos a 100 ppm. Los números que representan a cada uno de estos combustibles definen la viscosidad en CentiSto (cSt) a 50 °C. En la siguiente tabla se expresan la característica físico-química de los combustibles cubanos los cuales varían considerablemente con respecto a los combustibles de producciones internacionales, por lo que este se caracteriza como un combustible de baja calidad.

Tabla 2.4. Características físico-químicas del combustible cubano CM-650.

No	Parámetros	U/M	Valor medio	Método de ensayo	Valor normalizado
1	Azufre total	% m/m	7,16	ASTM D 1 552	7,5 máx.
2	Temperatura de inflamación	°C	33,11	ASTM D 93	ambiente
3	Temperatura de fluidez	°C	14,6	ASTM D 97	15 máx.
4	Carbón conradson	% m/m	13,05	ASTM D 189	14,0 máx.
5	Gravedad a 15 °C	°API	12,75	ASTM D 1298	11 mín.
6	Valor calórico neto	kcal/kg	9123	ASTM D 4868	9 100 mín.
7	Agua por destilación	% v/v	1,1	ASTM D 95	2,0 máx.

Fuente: Laurencio, 2010.

Continuación de la **Tabla 2.4** características fisicoquímicas del combustible cubano CM-650.

8	Sedimentos por extracción	% m/m	0,14	ASTM D 173	0,15 máx.
9	Cenizas	% m/m	0,11	ASTM D 482	0,10 máx.
10	Asfaltenos	% m/m	15,76	IP 143	18,0 máx.
11	Vanadio	p.p.m.	150	ASTM D 5 863	150,0 máx.
12	Sodio	p.p.m.	150	ASTM D 5 863	150,0 máx.
13	Aluminio + silicio	p.p.m.	80	ISO 10 478	80,0 máx.

Fuente: Laurencio, 2010.

En la tabla 2.5, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico. En los datos relacionados, se puede notar que al aumentar la temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, mientras que el índice de flujo, muestra variaciones poco significativas para el valor promedio de 0,92.

Tabla 2.5. Parámetros reológicos.

No	Parámetros	Temperatura				
		29 °C	38,6 °C	50,2 °C	57,4 °C	69,8 °C
1	n (adimensional)	0,917	0,926	0,926	0,925	0,929
2	K (Pa·s)	13,55	6,89	3,097	2,22	1,46

Fuente: Laurencio, 2010.

El parámetro K , es el índice de consistencia; (Pa·s), el cual da una medida del grado de viscosidad del material. La función que posibilita simular el comportamiento (K) al variar la temperatura (t), la viscosidad aparente para un fluido seudoplástico.

La densidad en función del aire utilizado; (kg/m^3).

[illegible]

La capacidad calorífica a presión constante del aire se define como el desarrollo para aumentar el balance de calor; (J/kg.°C).

$$c_{pa} = 999,2 + 0,1434 \cdot t_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot t_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot t_p^3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2.11$$

El coeficiente dinámico de viscosidad del aire se obtiene de la ecuación correspondiente; (Pa·s).

[illegible]

Los valores de las propiedades físicas del aire en los diferentes criterios se tomara por la llamada temperatura pelicular; ($^{\circ}\text{C}$).

$$t_p = \frac{t_s + t_a}{2} \quad (2.13)$$

Donde:

t_p - temperatura pelicular; ($^{\circ}\text{C}$).

t_a - temperatura del aire; ($^{\circ}\text{C}$).

t_s - temperatura de la superficie; ($^{\circ}\text{C}$).

El número de Prandtl para el aire (Trapeznikov, 2011), se determina mediante la ecuación:

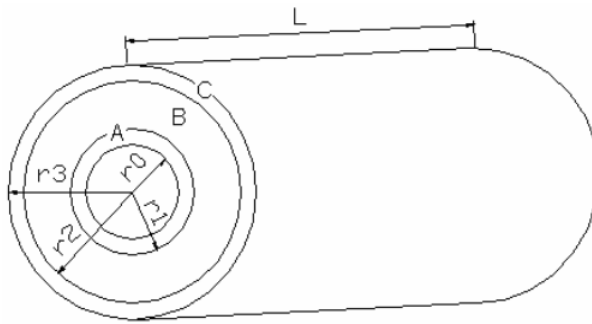
$$\text{Pr}_a = \frac{\mu_a \cdot C_{pa}}{k_a} 2.14$$

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

[illegible]

2.5 Variación de temperatura del crudo pesado en la tubería

Con el objetivo de conocer las variaciones de temperatura durante el transporte del combustible, se realizó la modelación teniendo en cuenta las configuraciones de las tuberías con aislantes (figura 2.1), las propiedades de los materiales y los fluidos que intervienen en el proceso de transporte.



Donde:

L – longitud de la tubería.

r0 – radio interior de la tubería.

r1 - radio exterior de la tubería.

r2 - radio exterior del aislante.

r3 - radio total.

Figura 2.1. Radios de la sección transversal de la tubería de transporte.

Fuente: Laurencio, (2010).

El calor transferido del interior al exterior del conducto con aislante q_A (w) al tomar la diferencia de la temperatura no se desprecia la resistencia en el proceso de convección interna en él tuvo y en su pared.

$$q_A = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{fi} - t_{ea})}{\frac{1}{r_0 \cdot h_c} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{K_B} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{K_c} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{r_3 \cdot h_a}} \quad 2.16$$

Donde:

h_c - coeficiente de convección del combustible; (W/m²·°C).

h_a - coeficiente de convección del aire; (W/m²·°C).

t_{fi} - temperatura del combustible en el interior de la tubería; (°C).

t_{ea} - temperatura exterior del aire; (°C).

r_0 - radio interior de la tubería; (m).

r_1 - radio exterior de la tubería; (m).

r_2 - radio exterior del aislante; (m).

Al combinar la ecuación 2.16 con la 2.8 y 2.15, y sustituida en 2.19 se obtiene la ecuación de variación de temperatura aplicable al transporte de combustibles pesados por tuberías.

$$\Delta t_A = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{fi} - t_{ea})}{Q \cdot \rho_c \cdot C_{pc} \left[\frac{1}{r_0 \cdot 0,023 \cdot Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,3} \cdot \frac{K_c}{D}} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \dots + \frac{1}{K_B} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{K_C} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{r_3 \cdot 0,245 \cdot Re_a^{0,6} \cdot \frac{k_a}{D}} \right]} \quad 2.20$$

El empleo de este modelo (ecuación 2.18), para la simulación del transporte del combustible pesado CM-650, facilita determinar las variaciones de temperaturas del combustible al ser transportado por tuberías, y posibilita conocer si estas variaciones son significativas. La validación del modelo consiste en realizar muestreos de diferencia de temperatura en unidad de longitud en la instalación experimental; para obtener los datos experimentales se contó con instrumentos de medición de alta precisión.

Para el modelo (ecuación 2.19), las propiedades físicas del combustible van a determinar una comparación en las variaciones de temperaturas del crudo pesado al ser transportado por tuberías sin aislantes.

$$\Delta t_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{fi} - t_{ea})}{Q_c \cdot \rho_c \cdot C_{pc} \left[\frac{1}{r_0 \cdot 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,3} \cdot \frac{K_p}{D}} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \dots + \frac{1}{r_1 \cdot 0,245 \cdot Re^{0,6} \cdot \frac{K_a}{D}} \right]} \quad 2.21$$

2.6 Modelos matemáticos para el flujo de fluidos transportados por tuberías

Para determinar la caída de presión (Pa) para un fluido no newtoniano en flujo permanente, estacionario, con un diámetro constante, se debe partir de un análisis de la distribución de esfuerzos cortantes en tuberías.

El modelo teórico-experimental para el transporte del combustible representa el uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, de momentum y de energía,

considerándose los efectos de los esfuerzos de mezclado entre capas de flujo (Vennard y Streeter; 1986; García, 2003).

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

El modelo cumple con el comportamiento de un fluido seudoplástico, lo que queda explícito como:

$$\Delta p = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^n + \frac{a}{Re^b} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot \left(\rho_f - \rho_i \right) \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta Z \quad . \quad . \quad . \quad 2.22$$

Ajustada la ecuación a las características de combustible. La ecuación 2.20 queda de la siguiente forma. (ec. 2.21).

$$\Delta p = \left[2 \cdot K_{med} \cdot L_{total} \cdot \left(\frac{16,32}{\pi \cdot D^2} \right)^{0,925} \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{1,925} \cdot Q^{0,925} + \frac{1,12 \cdot L_{total} \cdot \rho_{med} \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot Re_{med}^{0,2}} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot \left(\rho_f - \rho_i \right) \cdot \rho_{med} \cdot g \cdot \Delta Z \quad . \quad 2.23$$

Donde:

K_{med} - índice de consistencia; (Pa·s).

ρ_m - densidad media; (kg/m³).

ρ_f - densidad inicial; (kg/m³).

ρ_i - densidad final; (kg/m³).

g - gravedad; (m²/s).

ΔZ - variación de la longitud; (m).

L_{total} - longitud de la tubería más el número de codos estándar por la longitud equivalente;
(m).

2.6.1 Determinación de pérdidas de presión por resistencias locales

Los trabajos realizados por Skelland (1970); Garcell (2001); Darby (2001), tanto en flujo laminar como turbulento, con materiales pseudoplásticos y plásticos Bingham, demuestran que las pérdidas por fricción ocasionadas por el flujo de estos combustibles a través de accesorios y válvulas son prácticamente similares a las obtenidas con los fluidos newtonianos.

La expresión para la determinación de la longitud equivalente en codos estándar; (m).
Donde:

[illegible]

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

Para válvulas de globo:

[illegible]

Donde:

ρ_a - densidad del aire; (kg/m^3).

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

2.7 Tensiones provocadas por las temperaturas en las tuberías

Si se tiene un contorno cilíndrico cerrado como se muestra en la figura 2.2.

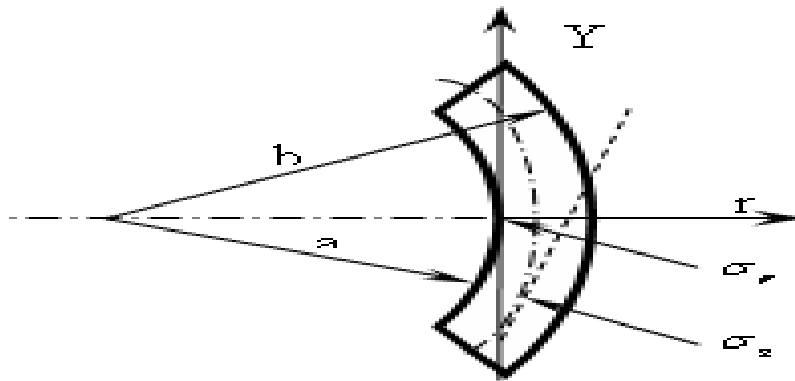


Figura 2.2. Sección de un cilindro de pequeño espesor.

Fuente: Martínez, (2011).

Considerando que en las superficies (interior y exterior) del cilindro las tensiones a lo largo del radio provocadas por dichas temperaturas, (Pa) se pueden determinar por la ecuación (2.26).

$$\sigma_r = \frac{\alpha \cdot E \cdot (t_{int} - t_{ext})}{2(1 - \nu) \cdot \left(\ln \frac{r_o}{r_i} \right)} \left[\left(\frac{r_1^2}{r_o^2 - r_1^2} \right) \cdot \left(\frac{r_o^2}{r_m^2} - 1 \right) \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_1} \right) - \ln \left(\frac{r_o}{r_m} \right) \right] . \quad 2.26$$

Donde:

E- módulo de elasticidad; ($2,1 \cdot 10^5$ MPa).

α - Coeficiente de expansión térmica; ($6,5 \cdot 10^5$ MPa).

ν - Coeficiente de Poisson; (adimensional).

T_{int} - temperatura interior del oleoducto; (°C).

T_{ext} - temperatura exterior del oleoducto; (°C).

r_o y r_i - radio máximo y mínimo de la tubería; con valor de 0,303 m y 0,3 m respectivamente.

r_m .- radio medio de la tubería; (m).

Las tensiones a lo largo del eje provocadas por la dilatación lineal (Pa) entonces se calculan por la ecuación 2.27.

$$\sigma_z = \frac{\alpha \cdot E \cdot (T_{\text{inf}} - T_{\text{ext}})}{2 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\ln \frac{r_o}{r_1} \right)} \left[1 - \left(\frac{2r_1^2}{r_o^2 - r_1^2} \right) \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_1} \right) - 2 \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_m} \right) \right] \quad . \quad . \quad 2.27$$

En tubos sometidos a altas temperaturas se producen grietas en la superficie exterior como resultado de las tensiones térmicas equivalentes las cuales se determinan aplicando tercera Hipótesis de resistencia (Burr, 1987).

$$\sigma_{eq} = \sigma_z - \nu \cdot \sigma_r \leq \sigma_c \quad (2.28)$$

Donde:

ν : Coeficiente de relación de tensiones admisibles; (adimensional).

[illegible]

Donde:

$[\sigma]_t$ Tensión normal admisible a tracción; (Pa).

$[\sigma]_c$ Tensión normal admisible a compresión; (Pa).

Como el material tiene el mismo comportamiento a tracción que a compresión las tensiones antes mencionadas tiene el mismo valor por lo que $\nu=1$.

2.7.1 Cálculo de presión admisible en la tubería

Para determinar la presión en las tuberías, las fuerzas que actúan en la pared en este cuerpo son las fuerzas internas elementales en la pared de la sección y las fuerzas elementales de presión ejercida en la porción del crudo pesado. El área de la sección del fluido es $\pi \cdot r^2$ y el área de la sección de pared puede obtenerse multiplicando la circunferencia $2 \cdot \pi \cdot r$ del cilindro por el espesor de la pared, escribimos la ecuación de equilibrio (Burr, 1987).

$$\sigma = \langle \mathbf{e} \cdot \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{t} \rangle - p \cdot \langle \mathbf{e} \cdot \mathbf{r}^2 \rangle = 0 \quad (2.30)$$

Despejando la presión obtenemos:

[illegible]

Donde:

p - presión manométrica; (Pa).

σ_z - tensión a lo largo del eje provocadas por la dilatación lineal; (Pa).

t - espesor de la tubería; (m).

2.8 Costos de transporte en el oleoducto

El análisis de los costos de operación del sistema de transporte conduce a la determinación de los parámetros racionales de operación, ya sea, la velocidad racional, el diámetro económico de la tubería o la temperatura racional de transporte, para el caso del trasiego de fluidos de elevada viscosidad como el combustible cubano CM-650.

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

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m} \cdot N_{Bom} \quad (2.32)$$

Tabla 2.6. Relación de parámetros para la determinación del costo de bombeo.

η motor	Rendimiento del motor	0,92
t_{el} (CUC/kW*h)	tarifa eléctrica	0,09
tt (h /año)	Tiempo de trabajo	7042,3

Fuente: Laurencio, 2010.

Donde:

C_{bom} - costo de bombeo de la instalación; (CUC/año).

Tabla 2.7. Valores electroquímicos para el cálculo de vida del ánodo a utilizar.

Metal anódico	Capacidad de corriente teórica (A·año/kg)	Rendimiento %	Factor %	Intensidad de corriente (A)
Zinc(Zn)	0,094	90	85	0,1

Fuente: Cutiño, 2007.

Cálculo de la resistencia del ánodo: Cada tipo de ánodo, sumergido o enterrado, tendrá una resistencia determinada que dependerá de la resistividad del medio (R_m), de su longitud y del llamado radio equivalente y que viene dado por la fórmula:

$$R = \frac{R_m}{2 \cdot \pi \cdot L_s} \quad 2.36$$

Donde:

R - resistencia del ánodo; (Ohm).

L_s - Longitud de la tubería submarina; (m).

R_m - Resistividad del medio; (Ohm ·m)

r - radio equivalente; (m).

El radio equivalente es el radio de un cilindro de igual superficie transversal que el ánodo, cuando este se haya consumido en 40%. Si la sección del ánodo es: $s=30,4$

$$r = \sqrt{\frac{s}{\pi} \cdot 0,6} \quad 2.37$$

Cada ánodo podrá suministrar una intensidad de corriente que vendrá fijada por la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad 2.38$$

Donde:

V - diferencia de potencial, entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio agresivo y el potencial de protección (0,80 V) con respecto al electrodo de referencia.

Tabla 2.8. Valores de la resistividad para sedimentos en mares del norte.

Sedimento	Resistividad (Ohm·m)
Arcilla blanda(fango)	0,6-0,75
Arcilla Barro.	0,75-1,1
Arena y arcilla dura.	1,1-1,6

Fuente: Cutiño, 2007.

2.10 Técnicas experimentales utilizadas

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó en la instalación del oleoducto en la empresa puerto Moa Raúl Díaz Arguelles. La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos EROS 5.9.3.14 (figura 2.3). (Ver anexo 2).

El EROS 5.9.3.14 Sistema de Supervisión y Control de Procesos Industriales, facilita a los operadores, ingenieros, supervisores y directivos operar y dirigir cualquier proceso con más eficiencia y productividad. Contiene la experiencia acumulada durante más de 13 años en más de 300 instalaciones en 180 posiciones entre plantas industriales y emplazamientos de Grupos Electrógenos. Se vincula con un sistema de reportes que capta los datos de las estaciones de medición y controla la emisión de reportes periódicos o progresivos. Este sistema permite configurar y emitir reportes periódicos de las variables del EROS. Utiliza toda la potencia de edición de Tablas y gráficos que posee el Microsoft Excel y lo combina con la posibilidad de insertar en celdas seleccionadas los valores que se necesiten de las variables del EROS. En los reportes pueden aparecer tanto, valores puntuales como cálculos estadísticos en un determinado período, tales como valores medios en el intervalo de una hora, turno o día, desviación típica, valores máximos etc.

Las mediciones de temperatura en el campo de boya se efectuaron en el intervalo de temperaturas de 54 a 39 °C, mediante termopares en dos transmisores; la primera se realiza en la tubería submarina con dos elementos independientes, primero con un sensor (termoelemento) de temperatura PT 100 que efectúa la muestra de temperatura, este es conectado a dos hilos por un cable de cobre, en el segundo elemento se realiza con el

transmisor de temperatura TT 302 SMAR. De forma similar se realizan las otras dos mediciones en las líneas paralelas, se censan dos muestras de temperatura utilizando la conexión doble de dos hilos, que permite mediante una conexión simple conectar dos termoelementos PT 100 a un mismo transmisor fieldbus. La medición de la presión, se realiza con un transmisor de presión relativa LD 292 de SMAR.

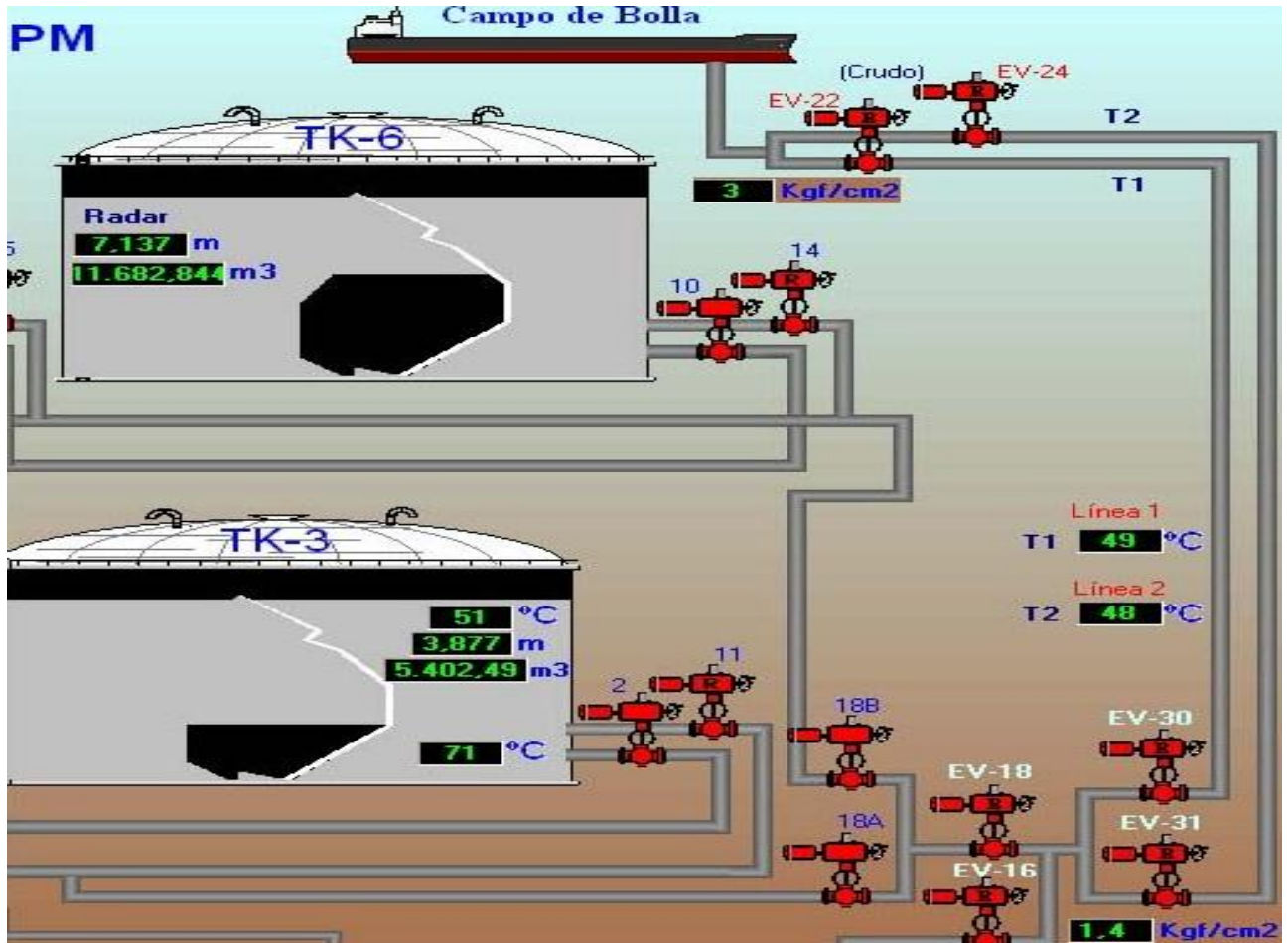


Figura 2.3. Esquema del sistema de suministro de combustible de la Empresa “Raul Díaz Arguelles” visualizado por el EROS 5.9.3.14.

2.10.1 Características de los instrumentos

- La tecnología digital usada en el transmisor TT302 permite a un solo modelo aceptar varios tipos de sensores, amplios rangos, medición individual o diferencial y una interface fácil entre el campo y el cuarto de control. También incluye varias

características interesantes que reducen considerablemente los costos de instalación, operación y mantenimiento.

- El LD292 de SMAR pertenece a la generación de equipos Fieldbus. Es una alternativa económica del transmisor de presión manométrica. El transmisor tiene un sensor capacitivo el cual proporciona una operación segura y excelente desempeño en el campo.
- En su forma más simple, un termopar consiste de dos alambres, cada uno hecho de un metal homogéneo diferente o aleación. Los alambres son unidos en un extremo para formar una junta de medición. Esta junta de medición es expuesta al medio a ser medido. El otro extremo de los alambres van usualmente a un instrumento de medición, donde forman una junta de referencia. Cuando las dos juntas están a diferentes temperaturas, se producirá una f.e.m. (fuerza electromotriz). (Ver anexo 1)
- El manómetro es un instrumento utilizado para la medición de la presión en los fluidos, generalmente determinando la diferencia de la presión entre el fluido y la presión local.

2.11 Conclusiones del capítulo

1. Se propuso un modelo matemático para la instalación de sistemas de aislamientos térmicos para el oleoducto.
2. Se estableció la metodología de cálculo para el transporte del crudo pesado en el oleoducto, así como la metodología de cálculo para la protección catódica en la tubería submarina y la resistencia a la presión de las tuberías.
3. Se plantea que los equipos utilizados para medir temperatura y presión realizan un potente tratamiento estadístico.

Capítulo 3. Análisis de los Resultados

3.1 Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas que describen las regularidades del comportamiento del oleoducto en condiciones reales. También se relacionan los resultados asociados al calentamiento del sistema y los impactos económicos y ambientales. El objetivo del capítulo es:

Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella dar una explicación de los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.1 Análisis de los resultados de cálculo en el proceso de intercambio de calor

Los resultados analíticos del combustible se representan a continuación en la tabla 3.1 donde se determina el comportamiento de las propiedades físicas del combustible.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos en las propiedades del crudo pesado.

Nº	Propiedades	Valores	Ecuaciones
1	Consistencia másica (k_a)	3,254 Pa·s	2.1
2	Coeficiente dinámico de viscosidad del combustible (μ_c)	2,517 Pa·s	2.2
3	Densidad del combustible ρ_c	981,892 kg/m ³	2.3
5	Coeficiente de conductividad térmica del petróleo (k_c)	0,142 W/m·°C	2.5
6	Reynolds para el fluido (Re_c)	733,991	2.6
7	Número de Prandtl del combustible (Pr_c)	2,702·10 ⁴	2.7
8	Coeficiente de convección para el combustible (h_c)	27,423	2.8

Para los resultados obtenidos en las propiedades del crudo pesado, la densidad y la viscosidad para la temperatura del combustible disminuye a medida que aumenta la temperatura, es generalizada para todos los combustibles por lo que aprovechándose de esto en la industria se mejoran las condiciones de transporte de crudos sometiéndolos a altas temperaturas durante el proceso transportación por tuberías. A partir de estos resultados el número de Reynolds para fluidos, determinamos que estamos en presencia del régimen laminar.

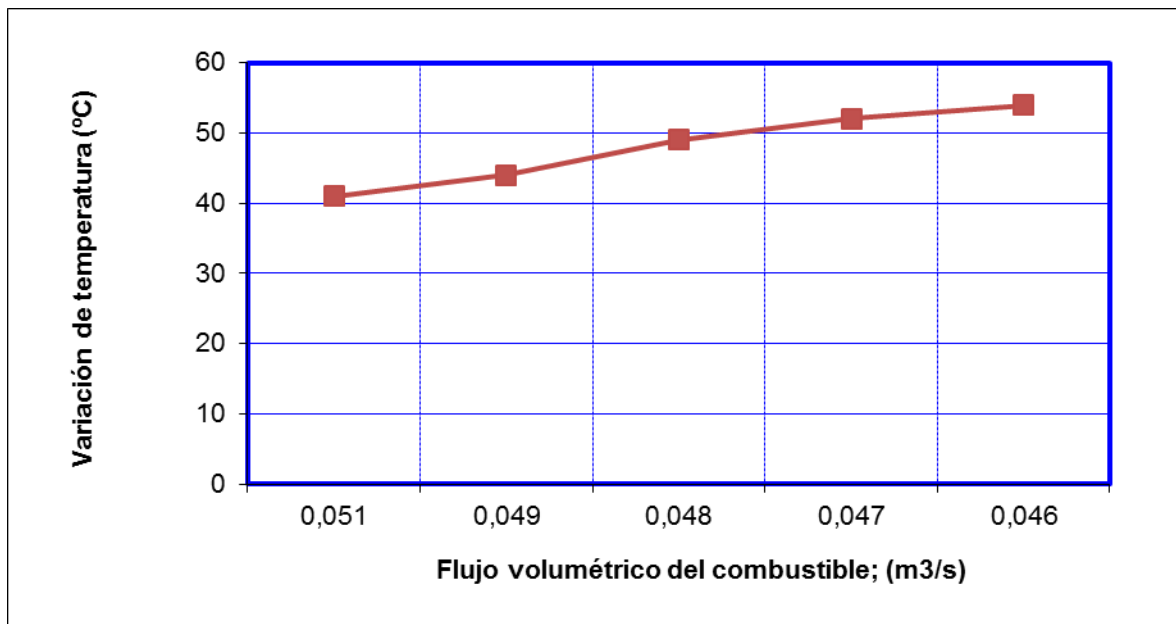


Figura 3.1. Comportamiento del flujo volumétrico con el incremento de la temperatura para el combustible.

En la gráfica 3.1 se observa un incremento en la variación de temperatura en la medida que aumenta el valor del flujo volumétrico.

Tabla 3.2. Resultados obtenidos en las propiedades termofísicas del aire.

Nº	Propiedades	Valores	Ecuaciones
1	Coeficiente de conductividad térmica del aire (k_a)	0,027 W/m.°C	2.9
2	Densidad del aire (ρ_a)	1,143 kg/m ³	2.10
3	Capacidad calorífica del aire a presión constante (c_{pa})	1,005·10 ³ J/kg.°C	2.11
4	Coeficiente dinámico de viscosidad del aire (μ_a)	1,884·10 ⁻⁵ Pa·s	2.12
5	Temperatura pelicular (t_p)	36 °C	2.13
6	Número de Prandtl portador de calor (Pr)	0,705	2.14
7	Coeficiente de convección del aire (h_a)	16,883	2.15
8	Reynolds para el aire Re_a	1, 517·10 ⁵	1.2

3.2 Análisis de la propuesta en la tubería con aislantes

Dados los resultados según se muestra en la tabla 3.3, se plantea la comparación para el oleoducto con la variante actual y la propuesta con aislamiento térmico, para la cual se presenta con mejor calidad energética, menores riesgos por óxido y una mayor vida útil, brindando una protección excepcional; estos recubrimientos térmicos no suponen ninguna amenaza para la gente o el ambiente, y al mismo tiempo ofrecen una extraordinaria protección temporal o permanente aún en condiciones extremas de agresividad ambiental.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos en la variación de temperatura del combustible en el oleoducto.

Nº	Propiedades	Valores	Ecuaciones
1	Calor transferido del interior al exterior del conducto con aislantes (q_A)	$1,58 \cdot 10^5 \text{ W}$	2.16
2	Calor transferido del interior al exterior del conducto sin aislantes (q_S)	$1,179 \cdot 10^6 \text{ W}$	2.17
3	Efectividad del aislamiento (η)	0,866	2.18
4	Variación de temperatura con aislantes Δt_A	$1,637 \text{ }^\circ\text{C}$	2.20
3	Variación de temperatura sin aislantes Δt_S	$12,215 \text{ }^\circ\text{C}$	2.21

Los resultados en la variación de la tubería sin aislantes con una proposición de tuberías con aislantes demuestran que el oleoducto tiene un ahorro significativo con un rendimiento de un 86,6 % con aislantes, resultados que se observan en la figura 3.2. Con motivo de conocer la variación de la temperatura del crudo pesado durante el flujo por el oleoducto, en la figura 3.2 se simula dicho comportamiento para la tubería terrestre y la submarina.

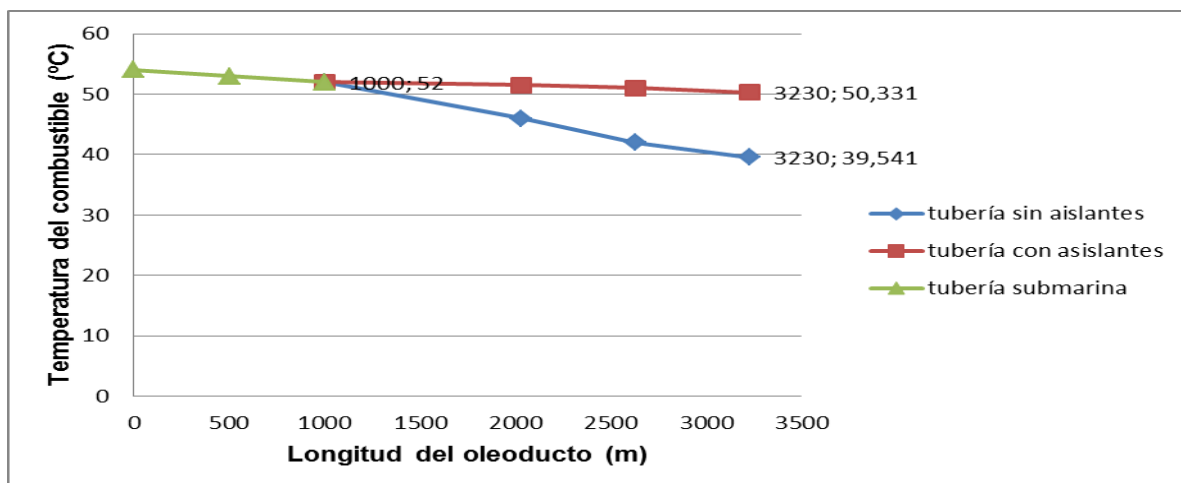


Figura 3.2. Comportamiento de la temperatura con aislantes y sin aislantes en el oleoducto desde la tubería submarina hasta los tanques de almacenamiento del crudo pesado.

Los valores que se muestran en la figura 3.2, demuestran que la proposición del aislamiento térmico tiene gran efectividad por lo que en la tubería con aislantes tiene una variación de temperatura de 1,637 °C, y en la tubería sin aislantes la variación de temperatura es de 12,215 °C, repercutiendo un ahorro en todos los procesos llevados a cabo en el campo de boya, desde el tiempo en que el barco se encuentra en el campo de boya hasta la recepción de crudo pesado a los tanques de almacenaje.

3.3 Punto de operación del sistema de bombeo

Para la realización de este apéndice se hace necesario conocer las curvas características de la bomba de tornillo instalada en el barco, encargada de trasladar el combustible hasta los tanques de almacenaje, los datos fueron tomados del pasaporte de las bombas.

En la tabla 3.5, se presenta los valores de la caída de presión a la que está sometido el oleoducto, esta disminuye a medida que se va alejando del barco registrando en la costa $2,9 \cdot 10^5$ Pa y $1,4 \cdot 10^5$ Pa en los tanques de almacenaje. (Ver anexo 3)

Tabla 3.4. Resultados obtenidos en la caída de presión.

Nº	Propiedades	Valores	Ecuaciones
1	Caída de presión (ΔP)	$4,634 \cdot 10^5$ Pa	2.23
2	Longitud equivalente en codos estándar ($L_{eq.codo}$)	3,542 m	2.24
4	Válvulas de globo	0	2.25

En los resultados obtenidos en las caídas de presión, muestran que estas disminuyen conjuntamente con la longitud de la tubería. Para la determinación de las caídas de presión en las válvulas de compuertas, se consideró que siempre se encuentran abiertas por lo que caída de presión es aproximadamente igual a cero determinando que la resistencia es despreciable.

En la siguiente figura 3.3, se representa el punto de operación de la bomba, que se debe obtener cuando la carga generada por la misma coincide con la que precisa el sistema, el que vendrá dado por la convergencia de la curva resistente del sistema con la curva característica de la bomba.

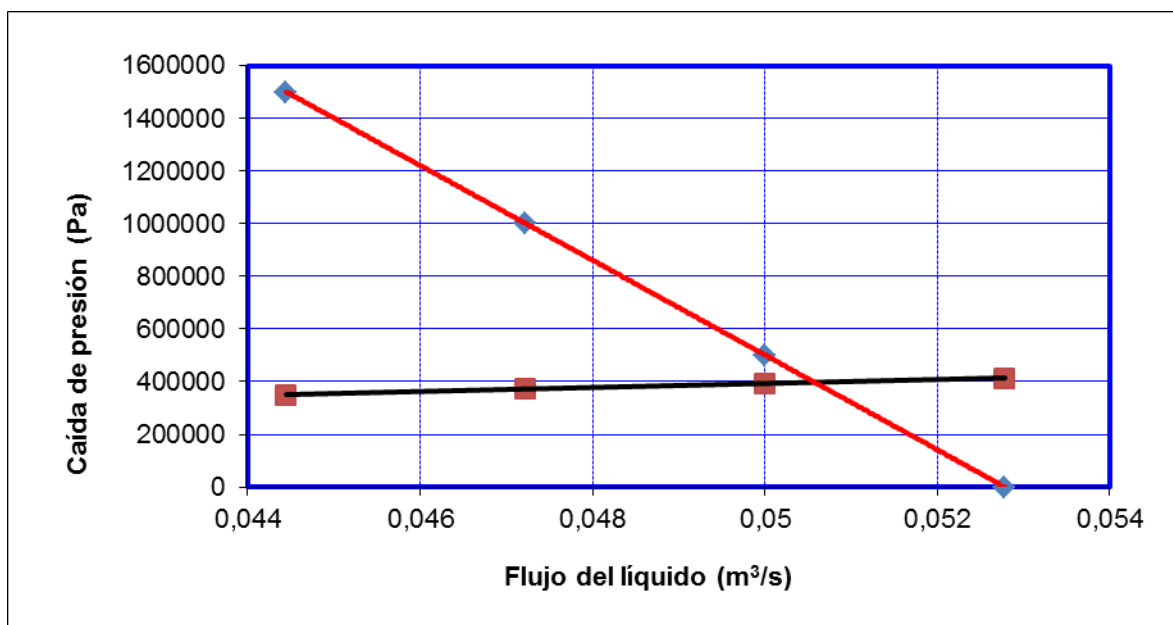


Figura 3.3. Comportamiento de las curvas del sistema a partir del punto de operación de la bomba.

A partir de la figura 3.3, se obtuvo el punto de trabajo de la bomba con el sistema, donde se determinó que el punto de operación de flujo del crudo pesado es de $0,051 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente a la presión de carga de $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Estos valores satisfacen las necesidades de flujo y carga del sistema.

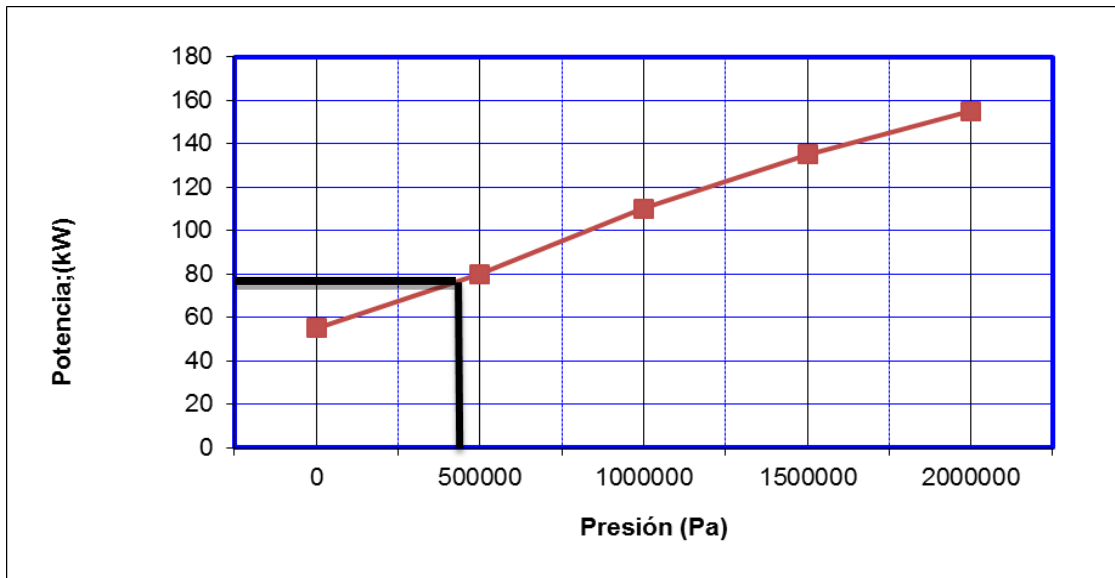


Figura 3.4. Comportamiento de la curva de potencia vs. presión.

Para la presión obtenida en el punto de sistema en la figura 3.3, se determinó que la potencia recibida es de 78 kW, determinando un alto consumo de energía.

3.4 Presión admisible y protección catódica en la de tubería submarina

Por medio de los resultados que aparecen en la siguiente tabla 3.5 se realiza la comparación de las tensiones que soporta la tubería. Para la tabla 3.6 se propone insertar de nuevo en la línea submarina la protección contra la corrosión evitando futuras averías.

Tabla 3.5. Resultados obtenidos de las tensiones provocadas por las temperaturas en las tuberías y la presión admisible en la tubería.

Nº	Propiedades	Valores	Ecuaciones
1	Tensiones a lo largo del radio provocadas por temperaturas (σ_r)	$1,017 \cdot 10^3$ Pa	2.26
2	Tensiones a lo largo del eje provocadas por la dilatación lineal (σ_z)	$-5,228 \cdot 10^3$ Pa	2.27
3	Presión admisible en la tubería (P)	$3,344 \cdot 10^5$ Pa	2.31

Para las tensiones a lo largo del radio provocadas por temperaturas ocurre un proceso de tracción en la tubería y para las tensiones a lo largo del eje provocadas por la dilatación lineal ocurre un proceso de compresión. Estableciendo que la presión admisible de la tubería es de $3,344 \cdot 10^5$ Pa, podemos determinar que el oleoducto soporta una ΔP de $4 \cdot 10^5$ Pa, lo que garantiza una reserva de seguridad de presión de 0,7 Pa que garantice que soporte la línea evitando averías.

En la tabla 3.6 se muestran los resultados de la protección catódica y anódica, donde se necesita rescatar el ánodo que se insertó por primera vez en 1998, desde entonces no se ha implantado la protección anódica que tanto necesita la línea submarina.

Tabla 3.6. Resultados obtenidos en la protección catódica y anódica en la tubería submarina

Nº	Propiedades	Valores	Ecuaciones
1	Área a proteger por el ánodo (A)	$1,885 \cdot 10^3 \text{ m}^2$	2.34
2	Vida efectiva del ánodo (V)	10,07 A· año	2.35
3	Resistencia del ánodo (R)	$1,066 \cdot 10^{-4} \text{ Ohm}$	2.36
4	Radio equivalente (r)	2,41 m	2.37
5	Intensidad de corriente (I)	$7,502 \cdot 10^5 \text{ A}$	2.38

Podemos determinar que la vida efectiva del ánodo es de 10 años, este tiempo perdurará mientras existan buenas condiciones eléctricas y una revisión periódica en la línea submarina.

3.5 Valoración económica de la propuesta de mejora del sistema

Para la estimación de los costos, como se observa en la tabla 3.7, el comportamiento de los gastos a emplear que muestra el costo de materiales y la fuerza de trabajo por concepto en el oleoducto para insertar aislantes térmicos, se consultó como referencia bibliográfica Process Plant Construction Standards (Manual de la edición 1998). Richardson Engineering Services Inc. Manuales de precios de la construcción de Cuba. Precons, (1999).

Tabla 3.7. Costos de los materiales

Costos Directos	Materiales		Fuerza de trabajo		Total	
	CUC	CUP	CUC	CUP	CUC	CUP
Tuberías (1m)	69,187	1504,65	2,67	11,07	71,86	1515,7
Lana de Vidrio (Kg)	13,15	45,6	2,05	16,8	15,2	62,4
Plancha de Aluminio (m ²)	30,85	875,25	1,5	8,95	32,35	884,2
Total	113,187	2425,5	6,22	36,82	119,41	2462,3

La reparación y mantenimiento de líneas de tuberías en el puerto de Moa está estipulada a realizarse cada 4 años, por lo que una reparación capital en el oleoducto traería consigo un gasto de \$ 11 514 464,51 entre moneda nacional y CUC, con la implantación del aislamiento térmico y la protección catódica.

Tabla 3.8. Resultados obtenidos en los costos de transporte en el oleoducto

Nº	Propiedades	Valores	Ecuaciones
1	Costo de bombeo de la instalación	53 740 CUC/año	2.32
2	Costo fijo de la red de tuberías	2 398 CUC/año·m	2.33

Para el análisis de la valoración económica del transporte del CM-650 en la instalación analizada, se determinó el costo de bombeo de la instalación de presión en el tubería con un valor de 53 740 CUC/año y para el costo fijo de la red de tuberías es de $2,398 \cdot 10^3$ CUC/año·m.

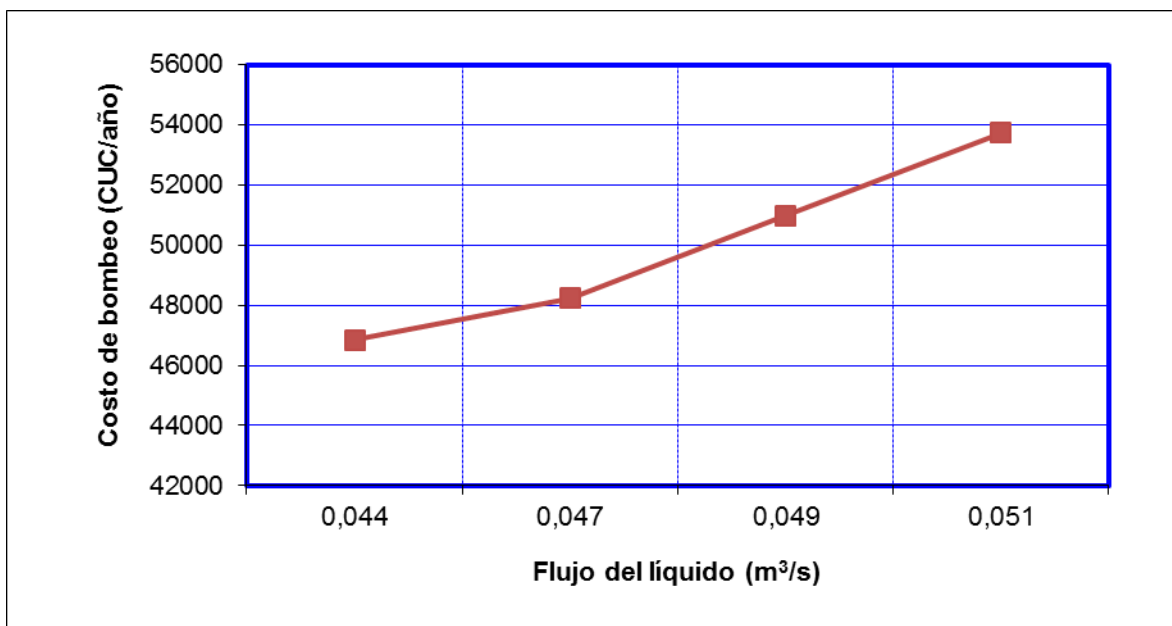


Figura 3.5. Relación del costo de bombeo en función del flujo del crudo pesado.

Según la figura 3.5 muestra que el costo de bombeo de la instalación aumenta con el flujo del petróleo, alcanzando un valor medio de 53 735,81 CUC/año.

3.6 Impacto Ambiental

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

En el campo de boya según estudios realizados a lo largo de estos años se han encontrados diferentes problemas ambientales que tienen efectos negativos en el ecosistema marino y perjudican directamente al hombre. Esto se debe de tratar con mucha importancia por el derrame ocurrido en marzo del 2012 por desperfectos técnicos a la hora de bombear el crudo pesado que trajo como consecuencias (Fernández, 2012):

- Se producen lodos con metales pesados y tóxicos como el cadmio, cobre, arsénico, mercurio y plomo los cuales perjudican a las especies marinas existentes.
- Transporta contaminación a otros lugares lejanos de la fuente de origen de la misma, en este ecosistema acuático.

- Contaminación marítima, muerte de especies por asfixia, envenenamiento de la vida acuática, cambio en los patrones de vida de peces, alteración del flujo de agua dulce hacia los manglares y de las mareas y alteración de la vegetación y en general del área, acumulación de residuos tóxicos en crustáceos (camarones, chacalines etc.) y moluscos (caracoles, pulpos etc.) Contaminación de la cadena trófica (cadena alimenticia.). Las alteraciones del suelo puede producir cambios en el pH del suelo y del agua que podría causar un deterioro crónico de la calidad de los manglares. Por otro lado los derrames del crudo en estas áreas ha provocado extensos árboles muertos ya que no existe ningún tipo de limpieza para llevar a cabo esta labor, lo que indica que el crudo permanece por varios años en los sedimentos marinos.

En el presente Informe resume los resultados de la Auditoria Ambiental realizada en el campo de boya por CESIGMA S.A. a la Empresa Puerto de Moa (EPM), perteneciente al Grupo Empresarial CUBANIQUEL.

El pH de las aguas marinas fluctuó entre 6.8 hasta 7.95 y el valor más alto, se detectó en el punto TC, producto de la contaminación del agua de mar con residuales del beneficio y tratamiento de cienos carbonatados. Es de señalar que en las mediciones efectuadas en la estación situada en el campo de boyas la capa superficial (5 primeros metros de la columna de agua) se encontraron pH menores debido a las plumas de aguas ácidas vertidas por el río Moa.

Existe un precipitado blanco en suspensión en estas aguas, que provoca un cambio de su coloración y transparencia natural. Esta afectación se debe, a que el campo de boyas está en el radio de influencia de la “pluma ácida”, provocada por la descarga de efluentes ácidos (WL) desde la Planta de níquel “Pedro Soto Alba”, de la MNSA, a través del río Moa.

Se observó una alta concentración de elementos flotantes e hidrocarburos. Los valores de hidrocarburos y grasas y aceites medidos en las aguas marinas en el campo de boyas, sobrepasan ampliamente los valores máximos admisibles para vertido de efluentes industriales y domésticos al medio marino, tanto con respecto a las normativas del Banco Mundial, la NC XX 2001, la NC TS 360 2004 y la NOM-001-ECOL-1996 (México).

El pH de las aguas marinas en el campo de boyas también se encuentra fuera de los límites admisibles por las referidas normas de vertido del Banco Mundial y las Normas Cubanas (NC XX 2001 y NC TS 360 2004), que en este caso coinciden en situar este límite entre 6 y 9 unidades de pH.

En las aguas marinas de la entrada de la Dársena, los valores de concentraciones de hidrocarburos, grasas y aceites y SS, están por debajo de los valores registrados en el campo de boyas, pero aún superan los valores máximos admisibles dados por las normas referidas.

Los sedimentos del fondo marino también muestran concentraciones muy altas de hidrocarburos y grasas y aceites y se consideran como contaminados. En esta categoría se incluyen los sedimentos colectados en el fondo marino del campo de boyas de la EPM.

El país tiene legislado para el cuidado, la conservación y restauración del Medio ambiente 2 instrumentos regulatorios que a continuación relacionamos:

La Ley No. 81 del medio ambiente.

Por cuanto: La Ley No. 81 de 11 de julio de 1997, Ley del Medio Ambiente, incluye entre los recursos marinos la zona costera y su zona de protección, las bahías, los estuarios y las playas, la plataforma insular, los fondos marinos y los recursos naturales vivos y no vivos contenidos en las aguas marítimas y sus zonas emergidas y establece los principios generales para su conservación y mejora conforme a la política integral de desarrollo sostenible del país y los principios enunciados en el capítulo 17 del Programa 21, adoptado en la Conferencia de Naciones Unidas, sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro, Brasil, en junio de 1992.

El DL- 212 gestiones de la zona costera.

Artículo 16: Se prohíbe en la zona costera, sin perjuicio de otras prohibiciones específicas:

- El estacionamiento y la circulación de vehículos terrestres, salvo equipos especializados de seguridad, limpieza, vigilancia, salvamento, los de mantenimiento y los relacionados con la actividad de ayuda a la navegación, hidrografía y de investigaciones científicas. Se exceptúan los casos de embarcaciones en arribada

“forzosa” y los vehículos para realizar actividades forestales, que estén debidamente autorizadas;

- La creación de nuevos áreas residenciales o de alojamiento y la ampliación de los ya existentes hacia esas áreas;
- La circulación de vehículos acuáticos y motorizados en áreas donde haya sido prohibida o limitada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en coordinación con el Ministerio del Turismo;
- La disposición final de los desechos sólidos y líquidos provenientes de cualquier actividad, cuando no cumplan con las normas de vertimientos establecidas;

3.7 Conclusiones del capítulo

1. La propuesta para el aislamiento térmico en el oleoducto es substancial por lo que los resultados demuestran una variación de temperatura de 1,637 °C con respecto a la tubería actual.
2. El costo de bombeo de la instalación es de 53 740 CUC/año, debido a las dimensiones de la línea, trayendo esto consigo una mayor potencia consumida por el motor y un aumento en el costo de energía eléctrica.
3. Dadas las tensiones de tracción y compresión que influyen en la línea se determinó que la presión admisible que soporta la línea es de $3,344 \cdot 10^5$ Pa.

Conclusiones Generales

1. Para los cálculos realizados se determinó que estamos en presencia del régimen laminar, se determinó que el punto de operación de flujo del crudo pesado es de $0,051 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente a la presión de carga de $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Para la presión obtenida en el punto de sistema se determinó que la potencia recibida es de 78 kW , determinando un alto consumo de energía.
2. Dadas las tensiones de tracción y compresión que influyen en la línea podemos determinar que la presión admisible que soporta la línea es de $3,344 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, con una reserva de seguridad de $0,7 \text{ Pa}$, garantizando el margen de seguridad contra averías.
3. A partir del análisis de operación de la instalación actual, se constató que el gasto del costo de bombeo de la instalación es de $53\,740 \text{ CUC/año}$, lo que justifica en gran medida incrementar el aislamiento térmico en el oleoducto, debido al alto consumo energético que evidencia la instalación, lo que justifica la inversión analizada con un monto total de $\$ 11\,514\,464,51 \text{ CUC} + \text{CUP}$.

Bibliografía

1. Adhikari B., Jindal V.K. Artificial Neural: A New Tool for Prediction of Pressure Drop of Non-Newtonian Fluid Foods Through Tubes. Journal of Food Engineering: 46, 43-51, 2000.
2. Banerjee T.P., M.Das y S.K. Das. Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves. Canadian Journal of Chemical Engineering: 72 (Abril), 207-211 (1994).
3. Columbie M. O., Estudio del transporte de fuel oil desde Mazut hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa "Ernesto Che Guevara, Tesis en Opción al título de ingeniero mecánico. ISMM, Moa, 2006. p.54.
4. Costa N. E., Fenómenos de transporte, Editorial Alambra S.A., Madrid, 1984.
5. Darby R., Laminar and Turbulent Pipe Flows of Non Newtonian Fluids, in Flow Dynamics and Transport Phenomena.
6. De la Paz, N., "Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida". Revista Cubana de Farmacia. 36(1) 21-27, 2002.
7. Díaz, A., Manual de hidráulica aplicada. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1989.
8. Falcón H. José; Brossard P. Luis; Carbonell M. José L.; Barreda T. Angel; Pacheco B. Pedro, Emulgente para la preparación de emulsiones aguacombustible. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial Certificado de Autor de Invención (45), 1995.
9. Fernández, O., "Opinión de experto". Osvaldo Fernández Morgado: Técnico de Mecánica. Especialista en medio ambiente, puerto de Moa. Moa. Cuba. Miércoles, 14 de febrero de 2007, 01:43 P.M.
10. Garcell, L., Comportamiento reológico de la pulpa laterítica. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad Ingeniería Química, 1993.
11. Garcell, L., Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
12. García E.J. y. Steffe J.F., Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newton Fluids in Pipe Flow. Journal of Food Process Engineering: 9, 93-120, 1987.

13. Guillarte, R., “Opinión de experto”. Raúl Guillarte Garrido. Especialidad: Ingeniería Mecánica. Jefe de Operaciones, puerto de Moa. Moa. Cuba. Miércoles, 14 de febrero de 2007, 01:43 P.M.
14. Ibarz A., J. Vélez y G. Barbosa. Transporte de Alimentos Fluidos a Traves de Tuberías. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
15. Laurencio A. H., Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de emulsiones de petróleo pesado, Artículo para publicación, ISMM, Moa 2007.
16. Laurencio, H. y Delgado, Y, “Comportamiento reológico de emulsiones de petróleo pesado en agua”. Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. 16(2) 244-250, 2008. <http://redalyc.uaemex.mx>. [Consultada: 15 de diciembre de 2009]
17. Laurencio, H. y Delgado, Y, “Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado”. Minería y Geología. 24(2) 56-77, 2008. www.ismm.edu.cu/revistamg. [Consultada: 15 de diciembre de 2009]
18. Liu S. y Masliyah J.H., On Non-Newtonian Fluid Flow in Ducts and Porous Media, Chemical Engineering Science: 53 (6), 1175-1201, 1998.
19. Martínez D., Egúez F., Estudio Reologico y de flujo para emulsiones de petróleo pesado en agua, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de PETROECUADOR, Facultad de Ingeniería Química EPN, 2001.
20. Martínez D, Leonel; JÁUREGUI, José. Mecánica de los fluidos y máquinas de flujo. Texto básico para la maestría en eficiencia energética. 2007
21. Maruska H.P. y RAO, B., Fuel Science and Technology N°5, V2, 119-168, 1987.
22. Mijeeva y Mijeev, Fundamentos de termotransferencia, 1956.
23. Montero Laurencio, R. y otros, Diagnósticos Energéticos y su influencia en La Gestión Empresarial en Hoteles. III Convención “Entorno Agrario 2005”
24. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada. Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980). Om N., Loginapaulo V. y Cavado A.,

- Composición de los petróleos pesados cubanos, CEINPET, Oil & Gas Journal Latinoamérica, Volumen 10, número 1, enero / febrero, 2004.
25. Incropera, F. y De Witt, D., Fundamentals of heat and mass transfer, La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003.
26. Placencia A. y Martínez D., Formulación de Emulsiones de Petróleo Pesado en Agua a Nivel Piloto y Estudio de las Pérdidas Friccionales en Tubería, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico PETROECUADOR. Quito – Ecuador, 2000.
- 27.18. Perry J.H., Chemical engineers handbook. 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1984.
28. Perona P., An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. Journal of Food Engineering: 60, 137-145, 2003.
29. Reid, R. C. y Sherwood T. K., The properties of gases and liquids. 2da. edición, editorial Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1966.
30. Richardson Engineering Services Inc. Manuales de precios de la construcción de Cuba. Precons, (1999).
31. Sablani S.S. y Shayya W.H., Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids: 57, 327-335, 2003.
32. Skelland, A.H., Non-Newtonian Flow and Heat Transfer. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
33. Steffe J.M. y R.G. Morgan., Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods. Food Technology. Dic. 78-85, 1986.
34. Tejeda H.D., Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
35. Trapeznikov, S., Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente. Tesis de Doctorado, Instituto de Minas de San Petersburgos, Rusia, 2011. 95p.



36. Turro B. A., Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002. p.154.
37. Vélez J., Apuntes de Ingeniería de Alimentos I. Universidad de las Américas, Puebla, México. Inéditos, 2003.
38. Vennard, John K.; Street, Robert L. Elementos de mecánica de fluidos.
Versión SI. La Habana, Cuba: Instituto Cubano del Libro, Editorial Pueblo y Educación, 1986.



Recomendaciones

1. Insertar el revestimiento térmico en las tuberías de la línea terrestre, con el fin de obtener un mayor ahorro de energía,
2. Instalar la protección catódica y anódica en la línea submarina para evitar averías que llevan consigo derramamiento del combustible hacia el mar, dañando ambientalmente el ecosistema marino, y a la población en general.
3. Se debe implantar ventosas en la línea de entrada a la intersección con la cota 737 m y 2205 m de longitud garantizando que quedará siempre llena de agua evitando la corrosión interna.

Anexo 1

Esquema del termopar instalado en el oleoducto

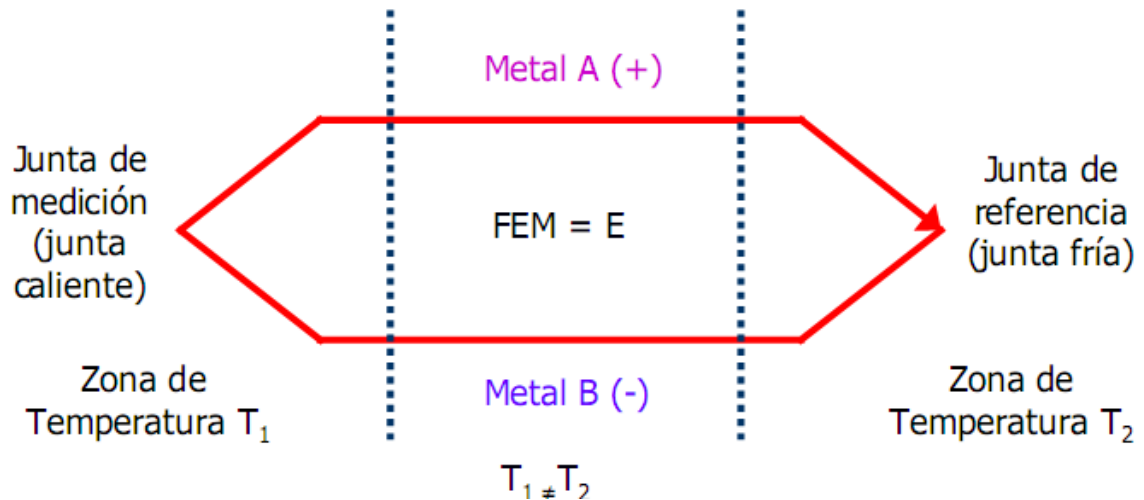


Fig. 1.5 diagrama general de un termopar.

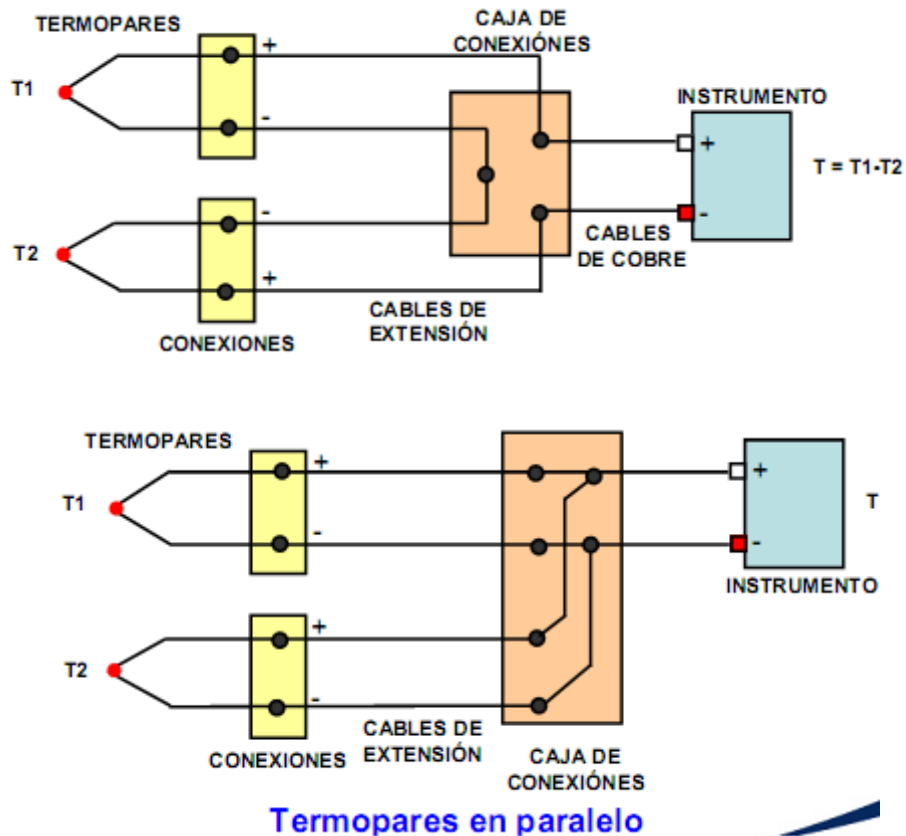
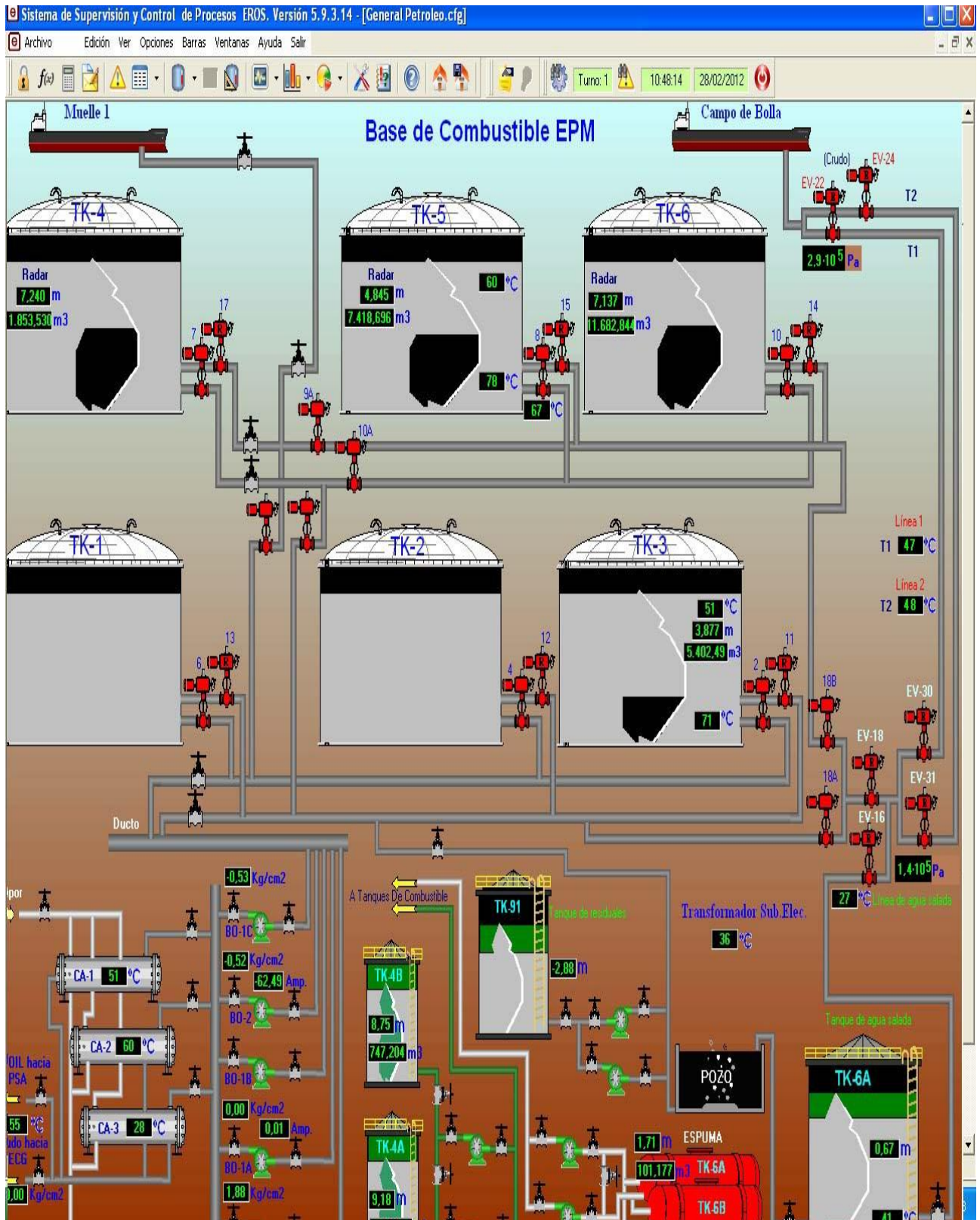


Fig. 1.6 Formas de conexión de termopares.

Anexo 2



Anexo 4**Cálculo de las propiedades para el intercambio de calor durante el transporte del combustible por tuberías****Índice de consistencia**

$$K = 59,86 \cdot e^{-0,056 \cdot t_c}$$

$$K = 3,254 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Densidad del combustible

$$\rho_c = -7,62 \cdot \ln t_c + 1012$$

$$\rho_c = 981,892 \text{ kg/m}^3$$

Coefficiente de conductividad térmica

$$K_c = (-0,13 \cdot t_c + 149,1) \cdot 10^{-3}$$

$$K_c = 0,142 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

Número de Prandtl

$$\text{Pr}_c = \frac{(0,856 \cdot t_c + 1483)}{(-0,13 \cdot t_c + 149,1) \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{59,86}{e^{0,056 \cdot t_c}} \cdot \frac{8,16 \cdot v^{-0,075}}{D}$$

$$\text{Pr}_c = 2,702 \cdot 10^4$$

Coefficiente de convección

$$h_c = 0,023 \cdot \text{Re}_c^{0,8} \cdot \text{Pr}_c^{0,3} \cdot \frac{K_c}{D}$$

$$h_c = 27,423$$

Propiedades termofísicas para el cálculo del aire**Coefficiente de conductibilidad térmica**

$$K_a = 0,00244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot t_p$$

$$K_a = 0,027 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

Coefficiente dinámico de viscosidad

$$\mu_c = \frac{59,86}{e^{-0,056 \cdot t_c}} \cdot \frac{8,16 \cdot v^{-0,075}}{D}$$

$$\mu_c = 2,517 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Capacidad calorífica del combustible

$$C_{pc} = 8,56 \cdot t_c + 1483$$

$$C_{pc} = 1,928 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

Número generalizado de Reynolds

$$\text{Re}_c = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho_c}{K} \cdot \frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1}^n$$

$$\text{Re}_c = 733,991$$

Densidad en función del aire

$$\rho_c = \frac{353,44}{t_p + 273,15}$$

$$\rho_c = 1,143 \text{ kg/m}^3$$

Capacidad calorífica a presión constante

$$C_{pa} = 999,2 + 0,1434 \cdot t_p \cdot 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot t_p - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot t_p^3$$

$$C_{pa} = 1,005 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

Coeficiente de convección

$$h_a = 0,0245 \cdot \text{Re}_a^{0,6} \cdot \frac{K_a}{D}$$

$$h_a = 16,883$$

Coeficiente dinámico de viscosidad

$$\mu_a = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot t_p$$

$$\mu_a = 1,884 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Temperatura pelicular

$$t_p = \frac{t_s + t_a}{2}$$

$$t_p = 36 ^\circ\text{C}$$

Cálculo de la variación de temperatura del crudo pesado en la tubería**Calor transferido del interior al exterior del conducto con aislante**

$$q_A = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{fi} - t_{ea})}{\frac{1}{r_o \cdot h_c} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln \cdot \frac{r_1}{r_o} + \frac{1}{K_B} \cdot \ln \cdot \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{K_B} \cdot \ln \cdot \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{r_3 \cdot h_a}}$$

$$q_A = 1,58 \cdot 10^5 \text{ W}$$

Calor transferido del interior al exterior del conducto sin aislante

$$q_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{fi} - t_{ea})}{\frac{1}{r_o \cdot h_c} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln \cdot \frac{r_1}{r_o} + \frac{1}{r_3 \cdot h_a}}$$

$$q_S = 1,179 \cdot 10^6 \text{ W}$$

Efectividad del asilamiento

$$n = \frac{q_S + q_A}{q_S}$$

$$n = 86,6 \%$$

Variación de temperatura con aislantes

$$\Delta T_A = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{fi} - t_{ea})}{Q \cdot \rho_c \cdot C_{pc} \left(\frac{1}{0,023 \cdot Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,3} \cdot \frac{K_c}{D}} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln \cdot \frac{r_1}{r_o} + \frac{1}{K_B} \cdot \ln \cdot \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{K_B} \cdot \ln \cdot \frac{r_3}{r_2} \dots + \frac{1}{0,0245 \cdot Re_a^{0,6} \cdot \frac{K_a}{D}} \right)}$$

$$\Delta T_A = 1,637 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Variación de temperatura sin aislantes

$$\Delta T_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{fi} - t_{ea})}{Q \cdot \rho_c \cdot C_{pc} \left(\frac{1}{0,023 \cdot Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,3} \cdot \frac{K_c}{D}} + \frac{1}{K_A} \cdot \ln \cdot \frac{r_1}{r_o} + \frac{1}{0,0245 \cdot Re_a^{0,6} \cdot \frac{K_a}{D}} \right)}$$

$$\Delta T_S = 12,215 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculos para la caída de presión**Densidad final**

$$\rho_f = -7,62 \cdot \ln t_f + 1012$$

$$\rho_f = 983,987 \text{ kg/m}^3$$

Densidad media

$$\rho_m = -7,62 \cdot \ln t_m + 1012$$

$$\rho_m = 982,826 \text{ kg/m}^3$$

Número generalizado de Reynolds

$$Re_m = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho_m}{K_m} \cdot \frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1}^n$$

$$Re_m = 525,026$$

Densidad inicial

$$\rho_i = -7,62 \cdot \ln t_i + 1012$$

$$\rho_i = 981,604 \text{ kg/m}^3$$

Índice de consistencia

$$K = 59,86 \cdot e^{-0,056 \cdot tc}$$

$$K = 3,254 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Caída de presión

$$\Delta P = 2 \cdot K_m \cdot L_T \cdot \frac{16,32^{0,925}}{\pi \cdot D^2} \cdot \frac{2^{1,925}}{D} \cdot Q^{0,925} + \frac{1,12 \cdot L_T \cdot \rho_m \cdot Q^2}{\pi \cdot D^5 \cdot Re_m^{0,2}} + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot \rho_f - \rho_i + \rho_m \cdot g \cdot \Delta Z$$

$$\Delta P = 4,634 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Longitud equivalente en codos estándar

$$L_{eq} = \frac{n}{3 \cdot n + 1} \cdot \frac{D^{n+1}}{2} \cdot \frac{850}{Re_c} + \frac{0,199}{D^{0,22}} \cdot \frac{\rho_a}{4 \cdot K} \cdot v^{2-n}$$

$$L_{eq} = 3,542 \text{ m}$$

Válvulas de globo

$$\Delta P_{loc} = 8,26 \cdot \rho_a \cdot v^2 \cdot Re_c^{-0,61 \cdot \theta - 0,0797}$$

$$\Delta P_{loc} = 0$$

Cálculos de las Tensiones provocadas por las temperaturas en las tuberías**Tensiones a lo largo del radio provocadas por las temperaturas**

$$\sigma_r = \frac{\alpha \cdot E \cdot t_{in} - t_{ext}}{2 \cdot (1 - \nu) \cdot \ln \frac{r_1}{r_o}} \cdot \frac{r_1^2}{r_o^2 - r_1^2} \cdot \frac{r_o^2}{r_m^2} - 1 \cdot \ln \cdot \frac{r_o}{r_1} - \ln \cdot \frac{r_o}{r_m}$$

$$\sigma_r = 1,017 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

Tensiones a lo largo del eje provocadas por la dilatación lineal

$$\sigma_z = \frac{\alpha \cdot E \cdot t_{in} - t_{ext}}{2 \cdot (1 - \nu) \cdot \ln \frac{r_1}{r_o}} \cdot 1 - \frac{r_1^2}{r_o^2 - r_1^2} \cdot \frac{r_o^2}{r_m^2} - 1 \cdot \ln \cdot \frac{r_o}{r_1} - 2 \cdot \ln \cdot \frac{r_o}{r_m}$$

$$\sigma_z = -5,228 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

Presión admisible en la tubería

$$P = \frac{\sigma_z \cdot 2 \cdot t}{r}$$

$$P = 3,344 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Cálculo de los costos de transporte en el oleoducto**Costo de bombeo de la instalación**

$$C_{\text{Bom}} = \frac{t_{\text{el}} \cdot t_t}{n_m} \cdot N_{\text{Bom}}$$

$$C_{\text{Bom}} = 5,374 \cdot 10^4 \text{ CUC/año}$$

Costo fijo de la red de tuberías

$$C_F = \frac{C_{\text{tub}} \cdot C_{\text{mant}}}{V_U}$$

$$C_F = 2,398 \cdot 10^3 \text{ CUC/año} \cdot \text{m}$$

Cálculo de la protección catódica y anódica en la de tubería submarina**Área a proteger por el ánodo**

$$A = \pi \cdot D \cdot L_S$$

$$A = 1,885 \cdot 10^3 \text{ m}^2$$

Vida de un ánodo

$$V = \frac{C \cdot P \cdot r \cdot F_{\text{ua}}}{I}$$

$$V = 10,07 \text{ A} \cdot \text{año}$$

Resistencia del ánodo

$$R = \frac{R_m}{2 \cdot \pi \cdot L_s}$$

$$R = 1,066 \cdot 10^{-4} \text{ Ohm}$$

Radio equivalente

$$r = \frac{s}{\pi} \cdot 0,6$$

$$r = 2,41 \text{ m}$$

Intensidad de la corriente

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = 7,502 \cdot 10^5 \text{ A}$$