



REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

**Selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías
con trazas de vapor bajo criterios técnicos y económicos**

Amauris Gilbert Hernández

MOA, 2012

“AÑO 54 DE LA REVOLUCIÓN”



REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

Selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías con trazas de vapor bajo criterios técnicos y económicos

Autor: Amauris Gilbert Hernández

**Tutores: Prof. Aux., Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso, Ms. C.
Prof. Aux., Ing. Yoalbys Retirado Mediaceja, Ms. C.
Inst., Ing. Olga Pérez Maliuk**

MOA, 2012

“AÑO 54 DE LA REVOLUCIÓN”



REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

**Selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías
con trazas de vapor bajo criterios técnicos y económicos**

Autor: Amauris Gilbert Hernández

Tutores: Ms. C. Héctor Luis Laurencio Alfonso

Ms. C. Yoalbys Retirado Mediaceja

Ing. Olga Pérez Maliuk

MOA, 2012

“AÑO 54 DE LA REVOLUCIÓN”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo Amauris Gilbert Hernández:

Autor de este trabajo de diploma así como los tutores Héctor Luis Laurencio Alfonso, Yoalbys Retirado Mediaceja y Olga Pérez Maliuk; declaramos la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Amauris Gilbert Hernández

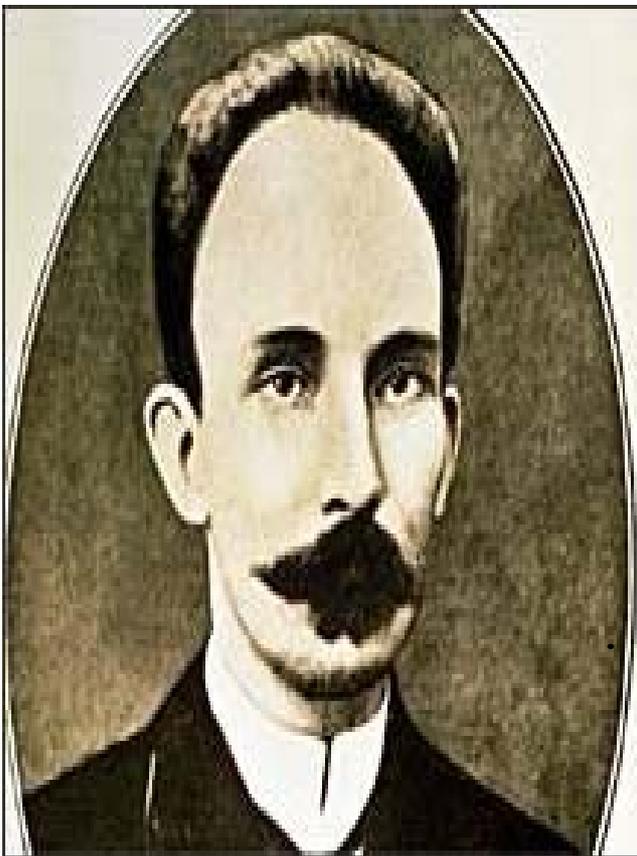
Tutor: Héctor Luis Laurencio Alfonso

Tutor: Yoalbys Retirado Mediaceja

Tutora: Olga Pérez Maliuk

Pensamientos

...el primer deber de un hombre de estos días, es ser un hombre de su tiempo.



La educación empieza con la vida y no acaba sino con la muerte.

Que cada hombre aprenda a hacer algo de lo que necesiten los demás.

Dedicatoria

A mi madre, centro de toda mi estabilidad.

A mi padre, dueño de todas mis incomodidades y coautor de mis logros.

A mi familia, puntal de mis esperanzas.

A ti que ofreces mucho a cambio de muy poco.

Agradecimientos

A mi Dios por ser parte de su creación y sus bendiciones.

A mi madre por tantas horas de comprensión y por disminuirme las tareas domésticas.

A mis tutores por esas horas de paciencia con este cabezota.

A mis tíos Luis Ángel y Javier por apoyarme incondicionalmente.

A mis compañeros de trabajo por su apoyo y aliento.

A mis compañeros de estudio Oscar, Gilberto, Fidel, Lupe y Clavijo por ser más que eso durante estos cinco años.

A todos los que contribuyeron a mi formación como profesional y ser humano, y por motivos de espacio y memoria no están reflejados en el papel, simplemente gracias:

De su

Amauris.

Resumen

En el presente trabajo se determinó el espesor de aislamiento térmico adecuado para sistemas de transporte de combustible por tuberías con traza de vapor, lo cual permite disminuir los elevados consumos energéticos por concepto de pérdidas de calor. El análisis bibliográfico estuvo dirigido fundamentalmente hacia las propiedades del combustible trasegado (CM-650) y sus características en diferentes condiciones de explotación; y la forma de eficiente de seleccionar aislamiento térmico teniendo en cuenta parámetros racionales de operación y aspectos económicos. Se emplearon dos métodos para la selección del espesor de aislante, el primero parte de un balance de energía, estableciendo un procedimiento de cálculo que permitió determinar el espesor de aislamiento que redujera las pérdidas; el segundo tiene en cuenta aspectos económicos y establece como espesor a aquel cuyo costo total es mínimo. La aplicación de estos métodos brinda la posibilidad de tener en cuenta las propiedades reológicas del combustible, lo cual no se registró en ninguna de las bibliografías consultadas. Con la incorporación de la traza de vapor a la línea de trasiego del combustible se logra una efectividad térmica del 79,5 %, y variaciones de temperatura en el oleoducto alrededor de los 7 grados, lo cual permite un valor estable de viscosidad y favorece las condiciones de trasiego. La disminución de las pérdidas energéticas está en el orden de los 19,1 W/m lo que representa un ahorro de 25 610 CUP al año.

Summary

In this paper it was determined the thickness of appropriate thermal isolation for systems of transport of fuel by pipes with appearance of vapor, which allows to diminish the high energy consumptions for concept of losses of heat. The bibliographical analysis was directed fundamentally toward the properties of the (CM-650) decanted fuel and its characteristics under different conditions of exploitation; and the form of efficient of selecting thermal isolation having in bill rational parameters of operation and economic aspects. Two methods were used for the selection of the thickness of insulating, the first one starts with an energy balance, a calculation procedure that allowed to determine the isolation thickness that reduced the losses settling down; the second one takes into consideration economic aspects and it settles down as thickness to that one whose total cost is minimum. The application of these methods offers the possibility to take into account the reological properties of fuel, which didn't register in none of the consulted bibliographies. The incorporation of the appearance of vapor to the fuel transport line shows a thermal effectiveness of 79,5%, exposing that the variations of temperature in the pipeline would not surpass the 7 grades, that allows a stable value of viscosity and it favors the transport conditions. The decrease of the energy losses is in the order of the 19,1 W/m what represents a saving from 25 610 CUP per year.

ÍNDICE

Contenido	Páginas
Introducción	1
Capítulo 1 MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL RELACIONADO CON LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES POR TUBERÍAS	
1.1- Introducción	4
1.2- Descripción del flujo tecnológico	4
1.2.1- Importancia de la instalación	5
1.3- Características principales de los sistemas de transporte por oleoductos	6
1.3.1- Clasificación de los oleoductos	7
1.4- Transporte de petróleo pesado por tuberías	8
1.4.1- Ventajas del transporte por sistemas de tuberías	8
1.5- Análisis de los trabajos precedentes	10
1.6- Características y propiedades generales del petróleo crudo cubano	16
1.6.1- Clases de combustibles cubanos	16
1.7- Materiales aislantes y su aplicación en el transporte de combustible	18
1.7.1- Criterios de selección	20
1.8- Conclusiones del capítulo	22
Capítulo 2 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS CON TRAZA DE VAPOR	
2.1- Introducción	23
2.2- Espesor técnico racional de aislamiento	24
2.2.1- Pérdida de calor	24
2.2.2- Calor recibido	25

2.2.3- Espesor de aislamiento	26
2.2.4- Temperatura del aire en la cavidad	29
2.2.5- Efectividad de la traza de vapor	31
2.2.6- Flujo de vapor	32
2.3- Espesor óptimo económico de aislamiento	32
2.4- Conclusiones del capítulo	35
Capítulo 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS CON TRAZA DE VAPOR	
3.1- Introducción	36
3.2- Obtención y empleo del espesor técnico racional de aislamiento	37
3.2.1- Análisis de la influencia de la temperatura en las pérdidas energéticas	39
3.2.2- Simulación de la caída de temperatura del combustible en el oleoducto	41
3.3- Obtención y empleo del espesor óptimo económico de aislamiento	43
3.3.1- Tiempo de recuperación de la inversión	46
3.4- Impacto ambiental	46
3.5- Impacto económico	47
3.6- Conclusiones del capítulo	49
CONCLUSIONES GENERALES	50
RECOMENDACIONES	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	57

INTRODUCCIÓN

El transporte de petróleo en la industria moderna es de vital importancia. Europa Occidental importa el 97 % y Japón el 100 % de sus necesidades, principalmente de África y Oriente Medio. Pero los países que se autoabastecen en mayor o menor medida están apenas mejor dotados, porque los yacimientos más importantes se encuentran a miles de kilómetros de los centros de consumo como en EE.UU, Rusia, Canadá y parte de América Latina (Charles, 1965).

En el mundo del petróleo los oleoductos son los medios por excelencia para el transporte del crudo en tierra. Y es el paso inmediato luego del descubrimiento y explotación de un yacimiento hacia los centros de refinación o los puertos de embarque con destino a exportación.

El oleoducto es el complemento indispensable y a veces el competidor del navío de alta mar, en efecto, conduce el petróleo del yacimiento situado a una distancia más o menos grande desde tierra adentro, al puerto de embarque del yacimiento submarino a la costa más cercana; del yacimiento directamente a la refinería o finalmente, del puerto de desembarco a la refinería.

En suma, el transporte de petróleo tiene dos momentos netamente definidos, el primero es el traslado de la materia prima desde los yacimientos hasta la refinería donde finalmente será procesada para obtener los productos derivados; el siguiente momento es el de la distribución propiamente dicha, cuando los subproductos llegan hasta los centros de consumo.

Dado que los combustibles fósiles son fundamentales en la economía mundial, puesto que aproximadamente más del 60 % de la energía que se consume en el planeta se obtiene de ellos, el proceso de distribución cuenta con el desarrollo de una extensa red logística para llevar los combustibles desde la refinería hasta los centros de consumo, con la indispensable utilización de los oleoductos.

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

de combustibles pesados, parámetros de calidad que se quieren lograr en la instalación estudiada.

Problemática:

La ineficiencia en el transporte de petróleo entre las empresas Puerto Moa y Comandante Ernesto Che Guevara, provocada por los problemas operacionales que afectan a la instalación.

Al existir calentamiento del combustible solo a su ingreso a la instalación y siendo considerable la distancia a recorrer (5 100 m), existe una disminución de la temperatura del mismo y por su naturaleza pseudoplástica un incremento de la viscosidad lo cual desmejora las características del transporte, incorpora mayor carga a las máquinas de flujo aumentando los consumos energéticos y los costos asociados al mantenimiento y adquisición de insumos.

Problema:

Las elevadas pérdidas de calor que se producen en el trasiego de petróleo y vapor por tubería entre las empresas “Raúl Díaz Argüelles” y “Comandante Ernesto Che Guevara”, lo que provoca altos consumos energéticos en la instalación.

Objeto de estudio:

La instalación utilizada para el trasiego de petróleo por tubería entre las empresas “Raúl Díaz Argüelles” (Puerto Moa) y “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Campo de acción:

Las pérdidas de calor durante el transporte de petróleo por tubería.

Objetivo general:

Determinar el espesor de aislante que permita mantener un régimen de explotación adecuado, minimizando las pérdidas de calor que se producen durante el trasiego de combustible por tubería, en la instalación estudiada.

Objetivos específicos:

- Determinar las limitaciones de las investigaciones y los procedimientos de cálculos precedentes, al ser aplicados a la instalación investigada.
- Particularizar los procedimientos generales, establecidos en las investigaciones precedentes, a las condiciones específicas del objeto de estudio.

- Evaluar los fenómenos de intercambio de calor durante el transporte de petróleo por tubería, para las condiciones de explotación de la instalación.

Hipótesis:

El aprovechamiento del suministro de calor adicional que se podría incorporar a la tubería de transporte de petróleo utilizando la instalación de trasiego de vapor como traza, permitirá mejorar los parámetros de operación y aumentar la eficiencia de la instalación de transporte del hidrocarburo entre las empresas “Raúl Díaz Argüelles” y “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Tareas:

- Actualización del estado del arte en relación con el transporte de fluidos por tubería, haciendo énfasis en el trasiego de los fluidos pseudoplásticos.
- Establecimiento de un sistema de conocimiento actualizado sobre las características del petróleo transportado en la instalación.
- Adecuación de los procedimientos para el cálculo de las pérdidas de calor, en la instalación objeto de estudio.
- Cálculo de los flujos de calor que se producen en la instalación investigada.
- Valoración de la incidencia de las pérdidas de calor en los consumos energéticos del sistema de bombeo.
- Valoración económica y ambiental asociada al proceso de transporte del petróleo en las condiciones de explotación de la instalación.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL RELACIONADO CON LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES POR TUBERÍAS

1.1 Introducción

El desarrollo tecnológico logrado por la humanidad en las últimas décadas se debe en gran parte al descubrimiento y explotación de los combustibles fósiles. De ahí que, la importancia de los hidrocarburos en la sociedad actual sea primordial, especialmente el petróleo. Motivo por el cual se exploran áreas del conocimiento en aras del descubrimiento, extracción y transporte de este combustible.

El dimensionado óptimo de instalaciones de trasiego de petróleo, así como la búsqueda de parámetros de operación más racionales, no es solo la superación y avance de un grupo de trabajo, sino; la forma de desarrollar un país, convirtiéndolo eficiente desde la forma en que operan sus industrias.

Al respecto Laurencio, 2012 plantea que: El papel que desempeñan los sistemas de transporte en las industrias petrolíferas es considerable en los tiempos actuales. La instalación de un nuevo oleoducto requiere de estudios previos significativos, en los cuales, se tienen en cuenta todas las variantes que pudieran acortar o beneficiar el proceso de transporte.

Por los elementos anteriormente mencionados relacionados con el transporte de petróleo por sistemas de tuberías, se declara como **objetivo** del capítulo:

Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionada con las propiedades y características de los fluidos transportados por tuberías.

1.2 Descripción del flujo tecnológico

La función principal de la base de combustible de la empresa Raúl Díaz Arguelles es, trasegar la cantidad de petróleo necesario para mantener el flujo productivo en las empresas productoras de níquel del municipio de Moa. Empleando el oleoducto como medio de transporte eficaz para este fin.

La planta antes mencionada posee como medio de almacenamiento seis tanques, de los cuales cinco se emplean para acumular Fuel oil y uno para el suministro del crudo nacional CM-650. En los tanques el combustible es excitado a través de calentadores en forma de serpentín, con el objetivo de suministrarle temperatura,

disminuir su viscosidad e incrementar su fluidez, lo cual se logra debido a la naturaleza reológica del hidrocarburo.

El proceso de calentamiento del petróleo se realiza utilizando vapor, el cual es suministrado desde los generadores de la Empresa Che Guevara a través de la tubería que se extiende por unos 6400 m. La cantidad de vapor, así como su contenido energético definen la temperatura del combustible y las condiciones del trasiego.

Con el objetivo de suministrarle mayor temperatura al combustible en días donde las variables climatológicas tienen una incidencia negativa en el proceso, y para facilitar su transporte por el oleoducto, el petróleo pasa por un intercambiador de calor de tubo y coraza que está diseñado para recalentar el combustible que se bombea hasta una temperatura de 70 °C (343°K).

El combustible ingresa en el oleoducto de longitud 5100 m y viaja en sentido contrario al vapor que es suministrado para su calentamiento, dicha tubería está insulated para evitar mayores pérdidas de calor al medio. Se utilizan cinco bombas para el transporte del fluido de las cuales cuatro son de tornillo, modelo 216.180 y son las más empleadas debido a la viscosidad del combustible; la instalación también posee una bomba centrífuga del tipo HK 210/200 S2. TB2, la cual es usada para temperaturas favorables de trasiego. La totalidad de las bombas anteriormente mencionadas están acopladas a motores eléctricos con potencia de 20 kW.

De forma resumida se puede plantear que, la instalación de trasiego de petróleo hacia la Empresa Ernesto Che Guevara tiene su génesis en la base de combustible de la Empresa Puerto Moa, donde el hidrocarburo es calentado en los tanques de almacenaje con vapor suministrado desde la caldera ubicada en la empresa productora de níquel, aquí el petróleo alcanza una temperatura promedio de unos 50 °C (323 °K) y luego es llevado a un intercambiador de tubo y coraza en el cual se le incrementa la temperatura a la que es enviado mediante la utilización de bombas.

1.2.1 Importancia de la instalación

El transporte de petróleo desde la Empresa Puerto Moa hacia la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara a través de la tubería de trasiego, garantiza el suministro de combustible capaz de mantener la energía necesaria para la puesta en marcha de forma ininterrumpida de todos los procesos asociados con la energía.

Este combustible es el mayor portador energético en esta industria del níquel, y esta última constituye uno de los renglones fundamentales en la economía cubana, motivo por el cual debe mantenerse bajo un régimen adecuado de explotación.

A través de la instalación se trasiegan durante ocho horas diarias alrededor de 1 000 toneladas de Fuel oil y 500 toneladas de crudo cubano CM-650.

El buen funcionamiento de la instalación, así como las mejoras que se le puedan incorporar es vital, ya que mediante esta se abastece el 100 % de dicho carburante a la red que proveen los servicios de la fábrica enclavada en el municipio moense.

1.3 Características principales de los sistemas de transporte por oleoductos

Para cada oleoducto se requiere un determinado tipo o clase de tubería. Generalmente, las dos características más comunes de un oleoducto son el diámetro externo y la longitud. Sin embargo, durante el proceso de diseño se toma en cuenta una variedad de factores que corresponden al funcionamiento eficaz y buen comportamiento físico del oleoducto, como por ejemplo:

- El tipo o calidad de acero de los tubos. Ya que se utiliza el acero debido a la capacidad de este material para resistir la deformación bajo la acción de fuerzas.
- La competencia de la tubería es muy importante debido a que el flujo del petróleo por ella se logra por presión a lo largo del oleoducto. Por tanto, la tubería debe resistir también presiones internas porque de lo contrario estallaría.
- En el caso de transportar crudos ácidos cuyo contenido de sulfuro de hidrógeno es significativo se opta por emplear tuberías y materiales de plástico o fibra de vidrio reforzado, que pueden operar a temperaturas de 110 °C (383 °K) y presiones de hasta 25 atmósferas (2535,5 kPa).
- Las juntas entre cada tubo también resultan importantes ya que deben ser lo suficientemente fuertes para resistir el flujo de los fluidos y evitar filtraciones. Algunos tubos se unen por rosca, empacaduras, soldadura de impacto, etc.

Los oleoductos varían en diámetro dependiendo de la capacidad requerida. Las líneas de tuberías algunas veces varían de tamaño, aumentando en diámetro hacia el extremo de más baja presión. Las especificaciones API, requieren que los tramos no sean menores de 4,80 m ni mayores a 12 m. Solamente cuando existe una considerable diferencia de elevación entre los extremos de un ducto y hay más o

menos un declive descendente continuo, puede el crudo fluir por él sin ayuda. Generalmente se debe aplicar la presión de bomba en el extremo corriente arriba, creando así una presión diferencial entre los extremos de toma y descarga de la línea que provoque el flujo a la velocidad deseada. Si la línea es larga se deben colocar bombas adicionales a intervalos para restituir la presión del crudo (Charles, 1965).

1.3.1 Clasificación de los oleoductos

Se denomina oleoducto a la tubería e instalaciones conexas utilizadas para el transporte a grandes distancias de petróleo, sus derivados y biobutanol. La excepción es el gas natural, el cual a pesar de ser derivado del petróleo, se le denominan gasoductos a sus tuberías por estar en estado gaseoso a temperatura ambiente.

Los oleoductos son la manera más económica de transportar grandes cantidades de petróleo en tierra. Comparados con los ferrocarriles, tienen un coste menor por unidad y también mayor capacidad. A pesar de que se pueden construir oleoductos bajo el mar, el proceso es tecnológicamente complicado y económicamente costoso; en consecuencia, la mayoría del transporte marítimo se hace por medio de buques petroleros.

Donde sea posible, se construyen sobre la superficie. Sin embargo, en áreas que sean más desarrolladas, urbanas o con flora sensible, se entierran a una profundidad típica de 1 metro (Charles, 1965).

En relación con lo citado Gilbert, 2012 brinda la siguiente clasificación:

Según su ubicación

- En tierra
 - ✓ Soterrado
 - ✓ De superficie

- En mar

Según su importancia

- Troncales o primarios
- Secundarios

Según la interacción térmica

- Con aislamiento térmico
 - ✓ Sin traza de vapor
 - ✓ Con 1 traza
 - ✓ Con 2 trazas
 - ✓ Con 4 trazas
- Sin aislamiento térmico

1.4 Transporte de petróleo pesado por tuberías

En el mundo del petróleo los oleoductos y los buques tanqueros son los medios por excelencia para el transporte del crudo. El transporte de petróleo tiene dos momentos netamente definidos, el primero es el traslado de la materia prima desde los yacimientos hasta la refinería donde finalmente será procesada para obtener los productos derivados, el siguiente momento es el de la distribución propiamente dicha, cuando los subproductos llegan hasta los centros de consumo.

Los oleoductos troncales o principales son tuberías de acero cuyo diámetro puede medir hasta más de 40 pulgadas (1,016 m) y que se extienden a través de grandes distancias, desde los yacimientos hasta las refinerías o los puertos de embarque. Están generalmente enterrados y protegidos contra la corrosión mediante revestimientos especiales.

El petróleo es impulsado a través de los oleoductos por estaciones de bombeo, controlados por medios electrónicos desde una estación central, que hacen que el petróleo avance continuamente a una velocidad promedio de 1,5 m/s.

La instalación de oleoductos requiere gran cantidad de estudios previos, en los cuales se tiene en cuenta todo lo que puede acortar o beneficiar el proceso de transporte.

Por caso, la construcción de un oleoducto o gasoducto que puede tener que cruzar montañas, ríos o desiertos, constituye una gran tarea de ingeniería. Hoy por hoy, el sistema de transporte de hidrocarburos por tuberías resulta tan eficiente y económico que existen miles de kilómetros de ellas, según Azcona (s.a).

1.4.1 Ventajas del transporte por sistemas de tuberías

El transporte por tuberías, consiste en el traslado de un fluido, gas o partículas del mineral suspendas en un flujo a través de una tubería; este tiene una gran aplicación en la industria, en el laboreo de minas, además en la industria metalúrgica tiene efectividad para la transportación de concentrados de materiales no ferrosos, carbón, petróleo, gas, materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos. En la actualidad en las industrias cubanas se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge este tipo de transporte debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte (Saldás, 2008).

La efectividad de este tipo de transporte crece principalmente debido a la imposibilidad de cambio por otro tipo, la posibilidad de simplificar la longitud de la vía de transporte por tuberías en comparación con el ferroviario y el automotor, debido, al relieve del lugar ante gastos no elevados en la preparación y homogenización de los materiales con una productividad anual de la instalación superior.

El transporte por tuberías de materiales líquidos, sólidos y gases en comparación con el transporte ferroviario, los transportadores y la vía automotriz está determinado por las significativas ventajas que éste presenta sobre los demás tipos de transporte:

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

La desventaja principal de este tipo de transporte, pertenece a la necesidad de tener suficiente energía para el dispositivo encargado del calentamiento del combustible y la dependencia de la capacidad de tráfico de la tubería, gastos de energía, deposición de asfaltenos y sólidos en la tubería; sin embargo estas desventajas son compensadas con las ventajas y en el caso de transportar petróleos y emulsiones la mayoría de estas desventajas no interviene en el proceso.

1.5 Análisis de los trabajos precedentes

Se consultaron varios trabajos, la diversidad recoge libros, publicaciones, catálogos, guías, manuales, monografías, tesis y estudios. La exploración bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: la información relacionada desde el punto de

vista teórico metodológico, y los trabajos sobre el tema de trasiego de petróleo según sus características y formas de mejoras de las condiciones de transporte.

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

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

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

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

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

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

viscosidad del fluido cuando el gradiente de velocidad tiende desde cero hasta infinito.

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

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

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

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

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

Mechetti y Zapana (2000a); Mechetti y Zapana (2000b); Mechetti et al. (2000), presentan resultados de estudios del comportamiento reológico de petróleos crudos

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

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

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

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

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

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

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

En Díaz y Falcón (2004), se exponen los resultados del estudio reológico de un petróleo crudo cubano y sus emulsiones; se brinda información de las investigaciones llevadas a cabo en este campo así como se obtienen experimentalmente las curvas de flujo en viscosímetros rotacionales para el petróleo crudo cubano y 17 emulsiones elaboradas. De forma similar Manals y Falcón (2005) analizan la influencia que presentan los productos de pirólisis y los agentes emulsionantes sobre la tensión superficial y las propiedades del petróleo crudo cubano.

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

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

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

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

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

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

Paul (1978); Pelaez y Stachenco (1999) plantean que por debajo del punto de enturbiamiento ciertos crudos tienen un rápido aumento de viscosidad debido a la precipitación de parafina y debilitamiento de enlace entre componentes. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de líquidos se representa mediante la ecuación 1.1 (Reid y Sherwood, 1966a; Laurencio y Delgado, 2008b; Andrade et al., 2009; Vandresen et al., 2009; Trapeznikov, 2011):

$$\mu = C \cdot e^{B \cdot t} \tag{1.1}$$

Donde: $\mu \Rightarrow$ Coeficiente dinámico de viscosidad; [Pa·s].

$t \Rightarrow$ Temperatura; [°C].

C y B \Rightarrow Constantes, cuyos valores dependen de la relación de μ y de t .

De acuerdo con la ecuación 1.1, la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura. En la práctica, la aplicación del efecto de la temperatura para la disminución de la viscosidad del combustible es el método de mayor aplicabilidad, prevaleciendo la dificultad de que la temperatura de transporte se selecciona de manera irracional (Laurencio y Delgado, 2008; Nikolaev, 2011).

Monteagudo et al. (1998) propone una metodología de cálculo que permite determinar el espesor del aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor. En la misma se parte de un balance de calor, el cual considera que el calor proveniente de la tubería acompañante de vapor se disipa en el calentamiento de la tubería principal y en las pérdidas de calor al medio exterior. Dicha metodología no tiene en cuenta la resistencia térmica que presupone el espesor de la tubería de trasiego, además los coeficientes de transferencia de calor por convección son determinados de forma aproximada mediante el empleo de tablas.

IDAE (2007) brinda la forma de establecer aquel espesor que minimice el costo total de la instalación teniendo en cuenta su período de explotación. Ya que es evidente que a mayor espesor de aislamiento mayor costo de inversión se tendrá y menor flujo de calor intercambiará el elemento, por lo que será menor el costo de energía asociado a su explotación. Por lo cual plantea que teniendo en cuenta ambos costos deberá existir un espesor que minimice el costo total. De forma tal que para obtener el espesor económico se expresen todos los costos en función del metro de superficie de aislamiento. El costo de inversión en aislamiento se puede poner en función de dos términos, uno dependiente de la cantidad de material utilizado y otro del coste de instalación.

La determinación de un espesor de aislamiento adecuado obedece en algunos casos a condiciones exclusivamente técnicas. Pero la mayor parte de las inversiones en aislamiento tienen un carácter económico, como es limitar las pérdidas de calor en recintos a temperaturas muy diferentes a las ambientales. Por ello es necesario introducir conceptos económicos en la elección adecuada del aislamiento,

generalmente en la determinación del espesor, según ISOVER (2004). Este último brinda de forma muy acertada el modo de determinar el espesor óptimo económico, lo cual es un modesto aporte ya que no se contaba en la bibliografía; de forma tal que permitiera incluir los aspectos económicos en la determinación del espesor del aislamiento térmico.

Gilbert (2012) determina las pérdidas de calor en la instalación objeto de estudio y brinda el espesor del aislamiento necesario a utilizar, pero el procedimiento empleado no recoge ningún parámetro que involucre los costos del elemento aislante, motivo por el cual se empleará en el presente trabajo una metodología enriquecida que permita determinar el espesor óptimo desde el punto de vista técnico económico.

1.6 Características y propiedades generales del petróleo crudo cubano

Las características físico químicas del petróleo crudo cubano, son las de un petróleo pesado, con elevado contenido de azufre de 6,19 % o sea, altamente sulfuroso, tendencia a formar abundante carbón, elevados contenidos de aromáticos y asfaltenos, y altas viscosidades a diferentes temperaturas. El contenido de asfaltenos representa casi la quinta parte del compuesto, lo que crea graves problemas en la producción, transporte y refinación del mismo. Por esta razón, el proceso de desasfaltenización debe ser el inicio de cualquier variante tecnológica para su procedimiento. A diferencia del resto de los índices de físico – químicos, el contenido de metales tiene valores relativamente bajos en este tipo de petróleo, el cual generalmente posee un alto contenido de metales (Noguera, 2008).

1.6.1 Clases de combustibles cubanos

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

Estas clases son:

1. FC-900: está compuesto por 55 % de crudo cubano mezclado con 45 % fuel oil de alto contenido de vanadio, más un dispersante de asfaltenos a 100 p.p.m. (este combustible comenzó a producirse en el año 1996).

2. Crudo mejorado 650 (CM-650).
3. Crudo mejorado 1100 (CM-1100).
4. Crudo mejorado 1400 (CM-1400).

Los crudos mejorados CM-650, CM-1100 y CM-1400 se obtienen al mezclar petróleo crudo con nafta y un dispersante de asfaltenos a 100 p.p.m. (estos combustibles comienzan a elaborarse a partir del año 1997). Los números que representan a cada uno de los combustibles definen la viscosidad en centistokes (cSt) a 50 °C (Prieto, 2008).

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

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

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

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

1.7 Materiales aislantes y su aplicación en el transporte de combustible

Los aislamientos térmicos son cuerpos de composición heterogénea y de apariencia fibrosa, porosa, celular, granular u hojaldrada, que contienen numerosas celdillas de aire aprisionadas entre los elementos sólidos que lo constituyen o forman.

El papel esencial de un material aislante, es evidentemente, ofrecer una buena resistencia térmica a la transmisión del calor, pero también se le exigen una serie de complementos o cualidades que van en función de los imperativos de empleo.

A continuación se enumeran los más sobresalientes:

- Buena resistencia mecánica.
- Sin modificación de su estructura en función de las temperaturas de empleo.
- Sin envejecimiento en el tiempo.
- Ausencia de acción corrosiva sobre materiales que van a estar en contacto con él.
- Ausencia de reacciones químicas con los materiales en que se va a encontrar en contacto.
- Resistencia a los diferentes agentes de destrucción (imputrescibilidad, resistencia a los roedores y parásitos, etc.).
- Para ciertas aplicaciones, ininflamables o auto extingüibles.
- Buen comportamiento sónico.

Clasificación

Los materiales aislantes se pueden clasificar partiendo de:

- | | |
|---------------|--|
| | ● Aislantes de origen animal o vegetal |
| Su origen | ● Aislantes de origen mineral |
| | ● Productos de síntesis |
| | ● Aislantes pulverulentos |
| Su estructura | ● Aislantes fibrosos |
| | ✓ de origen animal |
| | ● Espumas |
| | ✓ sintéticas |
| | ✓ aglomeradas |
| | ● Aislantes refractarios |

- Su temperatura
- Aislantes semirrefractarios
 - Aislantes ordinarios

Los aislantes de origen mineral son obtenidos bien directamente o por operaciones industriales, como las fibras de amianto, fibras de cristal o de vidrio, fibras de roca, vidrio expandido, sílices fósiles, micas exfoliadas (Pozo, 1987).

Lana de roca

Es un material aislante térmico, incombustible e imputrescible. Este material se diferencia de otros aislantes en que es un material resistente al fuego, con un punto de fusión superior a los 1 200 °C.

Las principales aplicaciones son el aislamiento de cubierta, tanto inclinada como plana, fachadas ventiladas, fachadas monocapa, fachadas por el interior, particiones interiores, suelos acústicos y aislamiento de forjados. Cuando se tiene un techo de teja con machihembrado, se utiliza un fieltro sin revestimiento o bien otro con un papel kraft en una cara, lo que favorece la colocación. Además, se utiliza para la protección pasiva tanto de estructuras, como de instalaciones y penetraciones.

La lana de roca se comercializa en paneles rígidos o semirrígidos, fieltros, mantas armadas y coquillas. También es un excelente material para aislamiento acústico en construcción liviana, para suelos, techos y paredes interiores.

Características

- Densidad: 30-160 kg/m³
- Coeficiente de conductividad térmica: 0,034 a 0,041 W/m·K
- Calor específico aproximadamente 840 J/kg·K

Según: Schild et al; (sa).

1.7.1 Criterios de selección

Definir el espesor de aislante en una determinada instalación puede ser función de varios criterios técnicos. A continuación se irán definiendo los mismos e indicando la forma de estimar el espesor de aislamiento (IDAE, 2007).

Para intercambiar un flujo de calor dado

Es el caso más sencillo, y el valor asignado a la densidad de flujo de calor suele ser fijado por la experiencia. Es una práctica habitual, aunque sus resultados pueden ser muy alejados de valores óptimos de diseño.

Un caso práctico es asignar un valor de pérdidas en paredes de cámaras frigoríficas en función de la temperatura interior de la misma. Para el caso de tuberías y esferas, señalar que no se suele utilizar este criterio.

Finalmente, especificar que en el caso de tuberías y esferas el procedimiento es necesariamente iterativo, ya que el radio exterior aparece en los términos de la correspondiente ecuación (resistencia de su capa y resistencia convectiva-radiativa exterior).

Para perder parte de calor respecto al elemento no aislado

Es quizás uno de los criterios más acertados, pues es una forma relativa de establecer la bondad del sistema. No obstante, hay que destacar que en tuberías cambian los coeficientes de convección exteriores, y esto para tuberías pequeñas es crítico. Por lo tanto, este criterio puede parecer acertado para paredes y para tuberías con un diámetro superior a 10 cm.

El proceso de cálculo es idéntico al anterior, no obstante, el cálculo se debe realizar dos veces, uno sin la existencia de aislamiento, y otro partiendo del flujo de calor que finalmente se desea intercambiar, el cual se obtiene del flujo de calor anterior, y el porcentaje asignado. Partiendo de este valor se obtiene el espesor de aislamiento.

Para mantener una temperatura superficial exterior

En general se trata de imponer como máximo una temperatura de protección, de forma que contactos involuntarios no produzcan lesiones. Como ejemplo, en el reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, se impone que ninguna superficie expuesta a contactos accidentales pueda estar a más de 60 °C (333 K).

En la práctica se trata de tuberías que transportan fluidos calientes, o depósitos que los contienen con geometría cilíndrica en las paredes y plana en las superficies superior e inferior.

La estimación del necesario aislamiento se realiza igualando el flujo de calor total transferido al correspondiente entre la superficie que se quiere proteger (la exterior) y el ambiente exterior.

Para evitar condensaciones superficiales

Este caso es semejante al anterior, simplemente se trata de imponer una temperatura superficial que sea igual o superior a la temperatura de rocío del ambiente, y con ello que no se produzcan condensaciones superficiales.

La posibilidad de condensación superficial siempre se da en el lado caliente, es decir, en paredes en la parte más caliente, y en tuberías, únicamente si por ellas circula un fluido a temperatura inferior a la de rocío del aire que la circunda exteriormente.

En tuberías por las que circula un fluido a temperatura inferior a la de rocío del ambiente, la capa exterior siempre debe ser impermeable al paso de vapor de agua, por lo que la presencia de dicha capa imposibilita el paso de vapor y por tanto las posibles condensaciones dentro de la misma.

En función de un tiempo de congelación para tuberías

En tuberías, es interesante conocer el tiempo que tardará en congelarse el agua de su interior partiendo de una determinada temperatura inicial, o planteado de forma alternativa, qué espesor de aislamiento debemos utilizar para que se congele un determinado porcentaje de agua en un determinado tiempo sin movimiento del fluido y en unas condiciones dadas de temperatura exterior.

Supuesta toda la tubería a una misma temperatura, podemos afirmar que el calor intercambiado se utilizará en disminuir su temperatura o en congelar el agua interior.

En función de presentar una diferencia de temperaturas a lo largo de una tubería o conducto

El calor intercambiado a lo largo de una tubería (o conducto) será utilizado por el fluido interior en modificar su temperatura. Si limitamos la máxima diferencia de temperatura del fluido estaremos limitando el máximo flujo de calor intercambiado, y con ello el espesor de aislamiento a imponer.

En función del espesor económico

En este supuesto se trata de determinar aquel espesor que minimice el coste total de la instalación teniendo en cuenta su periodo de explotación o vida de la instalación.

Es evidente que a mayor espesor de aislamiento más coste de inversión se tendrá y menor flujo de calor intercambiará el elemento, por lo que será menor el coste de energía asociado a su explotación. Teniendo en cuenta ambos costes deberá existir un espesor que minimice el coste total.

Para obtener el espesor económico expresamos todos los costes en función del metro de superficie de aislamiento. El coste de inversión en aislamiento se puede poner en función de dos términos, uno dependiente de la cantidad de material utilizado y otro del coste de instalación.

1.8 Conclusiones del capítulo

- En la bibliografía se exponen las principales propiedades de los combustibles utilizados a nivel internacional y en Cuba, las cuales son de necesario conocimiento para su transporte. Sin embargo, no existe información suficiente que permita realizar un diseño eficiente desde el punto de vista térmico, del trasiego por oleoducto de estos tipos de combustibles.
- En la literatura científica no se reflejan los parámetros específicos de transporte para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento, atendiendo a las propiedades físicas y reológicas de los crudos cubanos y en particular del crudo nacional CM-650.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS CON TRAZA DE VAPOR

2.1 Introducción

Existen casos en los cuales un aislamiento térmico convencional no es suficiente para mantener el régimen térmico necesario del objeto aislado. En tales circunstancias, además del aislamiento térmico, se utiliza un calentamiento complementario de dicho objeto. Este calentamiento se utiliza fundamentalmente en tuberías para el transporte a distancias considerables de una sustancia con temperatura dada o con una viscosidad tal que luego de interrumpida la circulación ésta se incrementa considerablemente. La problemática actual para mantener un nivel de temperatura, y por lo tanto de viscosidad, para garantizar un bombeo adecuado del petróleo crudo y en especial luego de las paradas de las instalaciones, puede ser resuelta a partir de este tipo de construcción aislante para la tubería principal, la cual consiste en suministrar un calentamiento adicional con la ayuda de una tubería acompañante de vapor dispuesta a lo largo de toda la tubería y forradas ambas con el material aislante, de manera que forme una cavidad termoaislada. El sistema formado, desde el punto de vista de intercambio de calor, presenta sus particularidades y no puede ser tratado adecuadamente por el método tradicional para la determinación del espesor de aislamiento (Monteagudo et al; 1998).

Se define como **objetivo** del capítulo:

Establecer el procedimiento de cálculo apropiado para la determinación del espesor del aislante térmico en los sistemas donde se trasiega petróleo con trazas de vapor.

Procedimiento de cálculo

El procedimiento de cálculo que a continuación se expone ha sido elaborado tomando como base el trabajo realizado por Monteagudo et al (1998) y lo propuesto en el manual de aislamiento en la industria (2004). Ambos procedimientos se han combinado, conjugando los aspectos más relevantes en el cálculo de espesor de aislamiento; formando uno más compacto y con mayor argumento técnico y económico, ya que se han empleado con éxito en el cálculo de instalaciones similares a la estudiada en el presente trabajo.

2.2 Espesor técnico racional de aislamiento

La determinación de un espesor de aislamiento capaz de mantener una temperatura estable del fluido trasegado, responde mayormente a parámetros técnicos. Para mantener esa estabilidad del transporte, debe establecerse un flujo constante de calor que garantice el intercambio térmico; para lo cual se torna imprescindible establecer el espesor correcto del aislamiento. A continuación se relacionan los parámetros que permiten su determinación:

2.2.1 Pérdida de calor

En una instalación común con un sistema de tuberías radiales, las pérdidas de calor se producirían por toda el área de la superficie aislada, sin diferencias considerables de flujo entre una y otra dirección. No siendo de esta manera para sistemas con acompañamiento de vapor aislado térmicamente; aquí el mayor flujo de calor que se expulsa al medio se genera desde la zona aislada que se dispone sobre el oleoducto, este calor disipado se puede determinar por la siguiente expresión:

$$q^P = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{R_p} \quad (2.1)$$

Siendo:

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (2.2)$$

Donde:

$q^P \Rightarrow$ Pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior por unidad de longitud; [W/m].

$\theta \Rightarrow$ Ángulo formado por la parte de la tubería sobre la cual se dispone el aislamiento (Tabla 2.1); [grados sexagesimales].

$t_p \Rightarrow$ Temperatura a la cual debe transportarse el petróleo en la tubería principal; [K].

$t_o \Rightarrow$ Temperatura ambiente a la que se realiza el cálculo; [K].

$R_p \Rightarrow$ Resistencia térmica desde el combustible hasta el aire ambiente; [m·K/W].

$R_1 \Rightarrow$ Resistencia térmica por convección desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal; [m·K/W].

$R_2 \Rightarrow$ Resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería principal; [m·K/W].

$R_3 \Rightarrow$ Resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de aislamiento;
[m·K/W].

$R_4 \Rightarrow$ Resistencia térmica por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente; [m·K/W].

Tabla 2.1 Ángulos de cálculo

β	θ
$\cos \beta = \frac{2r_2 - 2r_A - 0,02}{2r_2 + 2r_A}$	$\theta = 360 - \beta$

La tubería principal debe aislarse en conjunto con la tubería acompañante, de forma tal que se cree una cavidad termoaislada donde se produzca la zona de intercambio térmico entre ambas tuberías.

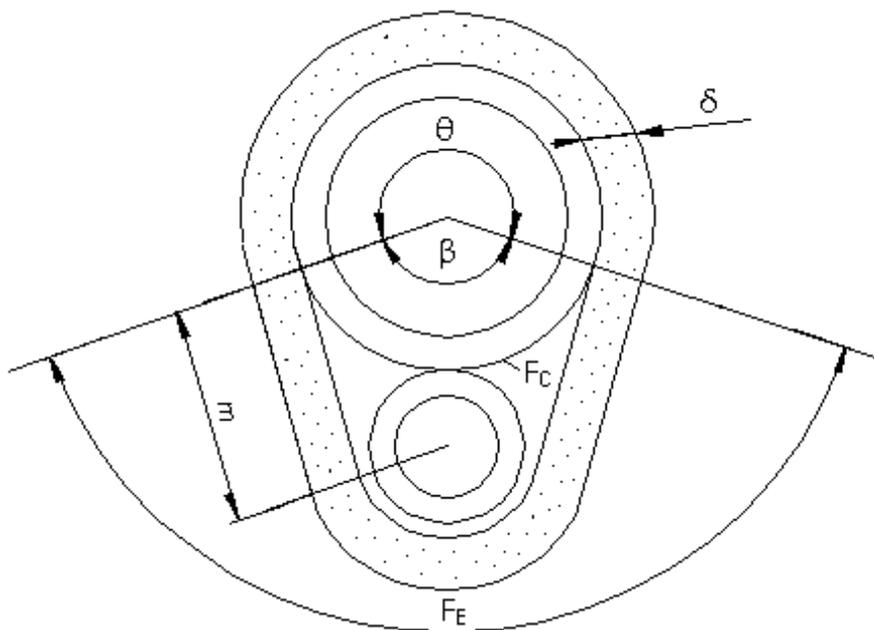


Figura 2.1 Vista frontal de una tubería con traza de vapor

2.2.2 Calor recibido

Desde la tubería acompañante se genera un flujo de calor que queda atrapado en la cavidad termoaislada, este por diferencia de densidad se eleva a la parte no aislada de la tubería principal denominada área de calentamiento, ya que es por esta zona donde se transmite el calor a la tubería calentada.

$$q^c = \frac{\beta}{360} \cdot h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p) \quad (2.3)$$

Donde:

$q^C \Rightarrow$ Calor que recibe la tubería principal desde el aire en el interior de la cavidad por unidad de longitud; [W/m].

$\beta \Rightarrow$ Ángulo de incidencia del calor en la tubería principal desde el aire en la cavidad termoaislada (Tabla 2.1); [grados sexagesimales].

$r_2 \Rightarrow$ Radio exterior de la tubería principal; [m].

$t_C \Rightarrow$ Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada; [K].

$h_3 \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el aire en el interior de la cavidad a la tubería principal (Tabla 2.2); [W/m²·K].

Los coeficientes de transferencia del calor en el interior de la cavidad termoaislada serán tomados de tablas que permiten escoger su valor a partir de la temperatura del vapor. Estos coeficientes pueden determinarse por expresiones ya establecidas, pero la aplicación al caso de estudio se restringe por ser incógnitas algunas magnitudes como temperatura en diferentes puntos de la cavidad, velocidad del aire en su interior y geometría de la misma, por solo citar algunos ejemplos.

Tabla 2.2 Coeficiente de transferencia de calor h_3

Temperatura del vapor	K	411	424	437	450	463	476
	°C	138	151	164	177	190	203
Coeficiente h_3		13,5	14	14,5	15	15,5	16

2.2.3 Espesor de aislamiento

Asumiendo que el flujo de calor es constante, pues se desprecia el calor almacenado. Se igualan las expresiones que lo definen en la tubería principal; equilibrando el flujo a la entrada y salida, es decir $q^P = q^C$ por lo que se puede plantear:

$$\frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{R_p} = \frac{\beta}{360} \cdot h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_C - t_p) \quad (2.4)$$

Despejando la resistencia térmica total en la tubería principal se obtiene:

$$R_p = \frac{\theta}{\beta} \cdot \frac{t_p - t_o}{h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_C - t_p)} \quad (2.5)$$

Sustituyendo las resistencias térmicas por sus expresiones matemáticas (2.6 - 2.9):

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} \quad (2.6)$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} \quad (2.7)$$

$$R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} \quad (2.8)$$

$$R_4 = \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \quad (2.9)$$

Sustituyendo 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 en 2.5 e introduciendo un coeficiente para considerar las pérdidas por sujeción y anclaje igual a 1,25 se despeja y obtiene:

$$\ln \frac{r_3}{r_2} = \left[\frac{\theta}{\beta} \cdot \frac{1,25(t_p - t_o)}{h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p)} - \left(\frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3'} \right) \right] 2\pi \cdot k_A \quad (2.10)$$

Donde:

$r_3 \Rightarrow$ Radio exterior del aislamiento colocado en la tubería principal; [m].

$r_1 \Rightarrow$ Radio interior de la tubería principal; [m].

$k_p \Rightarrow$ Conductividad térmica del material de la tubería principal (Anexo I, Tabla 2); [W/m·K].

$k_A \Rightarrow$ Conductividad térmica del material aislante (Anexo II, Figura 1); [W/m·K].

$h_1 \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal; [W/m²·K].

$h_2 \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente; [W/m²·K].

El coeficiente de convección para el combustible se determina por la expresión propuesta por Laurencio (2012), obtenida a partir de las recomendaciones propuestas por Incropera y De Witt, (2003).

$$h_1 = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \cdot \frac{k_C}{D_i} \quad (2.11)$$

Siendo:

$$Re = \frac{v \cdot D_i \cdot \rho}{\mu} \quad (2.12)$$

Donde:

$Pr \Rightarrow$ Número de Prandt (Anexo I, Tabla 1); [adimensional].

$D_i \Rightarrow$ Diámetro interior de la tubería; [m].

$k_c \Rightarrow$ Conductividad térmica del petróleo (Anexo I, Tabla 1); [W/m·K].

$Re \Rightarrow$ Número de Reynolds; [adimensional].

$v \Rightarrow$ Velocidad de trasiego; [m/s].

$\rho \Rightarrow$ Densidad del fluido (Anexo I, Tabla 1); [kg/m³].

$\mu \Rightarrow$ Viscosidad aparente (Anexo I, Tabla 1); [Pa·s].

Para el aire, el coeficiente de convección se determina por la expresión 2.13, obtenida a partir de las recomendaciones propuestas por Incropera y De Witt, (2003).

$$h_2 = 0,245 \cdot Re^{0.6} \cdot \frac{k}{D} \quad (2.13)$$

Donde:

$D \Rightarrow$ Diámetro exterior del conducto; [m].

$k \Rightarrow$ Conductividad térmica del aire (Anexo I, Tabla 3); [W/m·K].

En la ecuación 2.10 aparece la magnitud r_3 , la misma es esencial para encontrar la incógnita del cálculo. Para su determinación se debe proceder a realizar cálculos iterativos, asumiendo un valor inicial de aislamiento tomando como referencia la expresión:

$$r_3' = r_2 + \delta \quad (2.14)$$

Donde:

$r_3' \Rightarrow$ Radio exterior del aislamiento tomado como referencia para el cálculo; [m].

$\delta \Rightarrow$ Espesor del aislamiento a emplear; [m].

Teniendo en cuenta que el valor obtenido del radio exterior se obtuvo de un valor asumido, debe cumplir que:

$$\frac{r_3' - r_3}{r_3} \cdot 100 \leq 1 \% \quad (2.15)$$

2.2.4 Temperatura del aire en la cavidad

Para determinar el valor de la temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada, se procede a realizar un balance de energía. En el mismo se parte del principio que todo el calor disipado por la tubería acompañante se destina a calentar la tubería principal más las pérdidas al medio ambiente.

Calor disipado desde la tubería acompañante

$$q^A = \frac{F_A}{R_A} \cdot (t_V - t_C) \quad (2.16)$$

Siendo:

$$R_A = \frac{1}{h_4 \cdot 2\pi \cdot r_A} \quad (2.17)$$

Donde:

$q^A \Rightarrow$ Calor disipado desde la tubería acompañante por unidad de longitud; [W/m].

$F_A \Rightarrow$ Superficie de la tubería acompañante por unidad de longitud (Tabla 2.4); [m²/m].

$t_V \Rightarrow$ Temperatura del vapor acompañante; [K].

$R_A \Rightarrow$ Resistencia térmica desde la tubería acompañante al aire en la cavidad termoaislada; [m²·K/W].

$r_A \Rightarrow$ Radio exterior de la tubería acompañante; [m].

$h_4 \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la tubería acompañante hasta el aire en la cavidad (Tabla 2.3); [W/m²·K].

Tabla 2.3 Coeficiente de transferencia de calor h_4

Temperatura del vapor		Diámetro de la tubería acompañante [mm]				
		25	50	75	100	150
K	°C					
411	138	20	18,38	16,76	15,14	11,9
424	151	21	19,22	17,44	15,66	12,1
437	164	22	20,44	18,88	17,32	14,2
450	177	23	21,41	19,82	18,23	15,05
463	190	24	22,44	20,88	19,32	16,2
476	203	25	23,47	21,94	20,41	17,35

Calor que absorbe la tubería principal

$$q^C = \frac{F_C}{R_C} \cdot (t_C - t_P) \quad (2.18)$$

Siendo:

$$R_C = \frac{1}{h_3} \quad (2.19)$$

Donde:

$F_C \Rightarrow$ Superficie de cálculo de la tubería principal por unidad de longitud (Tabla 2.4); [m²/m].

$R_C \Rightarrow$ Resistencia térmica por convección desde el aire en la cavidad termoaislada a la tubería principal; [m²·K/W].

Al ser la superficie de cálculo, de radio de pequeña curvatura y por la forma que se transfiere el calor. La resistencia R_C se determina según la expresión de resistencia térmica establecida para superficies planas.

Calor que se pierde al medio

$$q^E = 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_C - t_O) \quad (2.20)$$

Siendo:

$$R_E = \frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2} \quad (2.21)$$

Donde:

$q^E \Rightarrow$ Calor que se pierde al medio desde la cavidad por unidad de longitud; [W/m].

$F_E \Rightarrow$ Área superficial del aislamiento que no incluye la porción que se dispone sobre la tubería principal, por unidad de longitud (Tabla 2.4); [m²/m].

$R_E \Rightarrow$ Resistencia térmica desde el aire en la cavidad termoaislada al exterior; [m²·K/W].

$h_5 \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el aire en la cavidad a la superficie interior del aislamiento; [W/m²·K].

El caso de la resistencia R_E se determina según las expresiones establecidas para una pared plana en la cual se asume un valor aproximado de espesor, el cual es

corregido luego de ser calculado su valor real mediante la expresión 2.10. En cuanto al coeficiente de transferencia de calor h_5 , la bibliografía consultada (Monteagudo et al, 1998 e ISOVER, 2004) recomienda asumir un valor de $12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ sin que se introduzca un error que influya significativamente en el resultado final.

Tabla 2.4 Áreas de cálculo

m [m ² /m]	F_A [m ² /m]	F_C [m ² /m]	F_E [m ² /m]
$\sqrt{(2r_2 - 0,01) \cdot (2r_A + 0,01)}$	$\pi \cdot 2r_A$	$\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot 2r_2$	$\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m$

El calor disipado por la tubería acompañante, es numéricamente igual a la suma del calor absorbido por la tubería principal y el que se pierde al medio $q^A = q^C + q^E$, expresado según sus ecuaciones matemáticas quedaría planteado de la siguiente forma:

$$\frac{F_A}{R_A} \cdot (t_V - t_C) = \frac{F_C}{R_C} \cdot (t_C - t_P) + 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_C - t_O) \quad (2.22)$$

Al despejar t_C se obtiene:

$$t_C = \frac{\frac{F_A}{R_A} \cdot t_V + \frac{F_C}{R_C} \cdot t_P + 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot t_O}{\frac{F_A}{R_A} + \frac{F_C}{R_C} + 1,25 \frac{F_E}{R_E}} \quad (2.23)$$

2.2.5 Efectividad de la traza de vapor

Emplear las tuberías que transportan vapor, como trazas; permiten el aprovechamiento de ese calor adicional que en situaciones normales es expulsado al medio ambiente. La función que desempeña el par traza - aislamiento, es medible y brinda la posibilidad de conocer en qué medida se puede hacer uso más racional del calor respecto a una instalación de características similares pero con las tuberías dispuestas de forma independiente, lo antes expuesto se puede determinar según la expresión 2.24:

$$\eta = \frac{q^T}{q^S} \cdot 100 \quad (2.24)$$

Siendo:

$$q^T = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_P - t_O}{R_P} + 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_C - t_O) \quad (2.25)$$

$$q^S = \frac{t_P - t_O}{R_P} + \frac{t_V - t_O}{R_V} \quad (2.26)$$

Donde:

$\eta \Rightarrow$ Efectividad de la traza de vapor; [%].

$q^T \Rightarrow$ Calor perdido usando traza de vapor; [W/m].

$q^S \Rightarrow$ Calor que se perdería si no se usara traza de vapor; [W/m].

$R_V \Rightarrow$ Resistencia térmica desde el vapor hasta el aire ambiente; [m·K/W].

Para la determinación de R_V se procede de forma similar a R_P empleando las ecuaciones 2.6; 2.7; 2.8; 2.9 y adecuándolas según sus características propias.

2.2.6 Flujo de vapor

Conocido el espesor necesario de aislamiento para mantener un calentamiento eficaz del combustible, se torna imprescindible saber el flujo de calor que se requiere para mantener el intercambio térmico desde la tubería acompañante a la tubería principal. Lo anterior puede ser expresado mediante la ecuación 2.27:

$$\dot{m} = \frac{h_4 \cdot (t_V - t_C) \cdot F_A \cdot L}{0,2 \cdot r} \quad (2.27)$$

Donde:

$\dot{m} \Rightarrow$ Flujo de vapor necesario para el calentamiento de la tubería; [kg/h].

$r \Rightarrow$ Calor de cambio de fase; [kJ/kg].

Tomando como base la expresión 2.20 se puede aislar la magnitud L y de esta forma conocer la máxima longitud a la cual tiene lugar la condensación total, para un flujo de vapor dado. Quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$L = \frac{0,2 \cdot r \cdot \dot{m}}{h_4 \cdot (t_V - t_C) \cdot F_A} \quad (2.28)$$

2.3 Espesor óptimo económico de aislamiento

Otro criterio que permite seleccionar el espesor de aislamiento, es aquel basado en cálculos económicos. Estos últimos se introducen con el objetivo de minimizar los gastos por conceptos de inversión y pérdidas energéticas, estableciendo un balance entre los mismos y logrando determinar el valor más racional. El espesor óptimo económico puede diferir en cierto modo de aquel determinado para cierta aplicación

industrial, motivo por el cual el interesado puede escoger según su necesidad de aplicación.

La determinación de un espesor de aislamiento adecuado obedece en algunos casos a condiciones exclusivamente técnicas, como puede ser limitar la caída de temperatura de un fluido. Pero, la mayor parte de las inversiones en aislamiento tienen un carácter económico; limitar las pérdidas de calor en recintos a temperaturas diferentes a las ambientales. Por ello es necesario introducir conceptos económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor, ya que el costo total será mínimo precisamente para el espesor óptimo económico, según ISORVER (2004).

Espesores de aislamiento

El procedimiento consiste en determinar para cada inversión en aislamiento, el valor actualizado neto de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión.

Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento

En la instalación las pérdidas de calor al medio q^T están identificadas ya que el mismo se disipa a través de la parte aislada de la tubería principal y por la cavidad, para su cálculo se procede por la expresión 2.25.

Valor de las pérdidas energéticas

$$V = q^T \cdot E \cdot Z \cdot 10^{-3} \quad (2.29)$$

Donde:

$V \Rightarrow$ Valor de las pérdidas energéticas; [CUP/m·año].

$E \Rightarrow$ Costo de la energía eléctrica; [CUP/kW·h].

$Z \Rightarrow$ Tiempo de funcionamiento de la instalación al año; [h/año].

Valor actualizado de las pérdidas

$$V_A = V \cdot C_A \quad (2.30)$$

Siendo:

$$C_A = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1} \quad (2.31)$$

$$t = \frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \quad (2.32)$$

Donde:

$V_A \Rightarrow$ Valor actualizado de las pérdidas; [CUP/m].

$C_A \Rightarrow$ Coeficiente de actualización; [adimensional].

$b \Rightarrow$ Aumento previsible del costo de la energía; [%].

$r \Rightarrow$ Tasa de actualización neta; equivalente al interés bancario deducido los impuestos y la tasa de inflación; [%].

$n \Rightarrow$ Numero de años para los que se efectúa el estudio.

Incremento de ahorro

$$A = V_{A(\delta)} + V_{A(\delta+1)} \quad (2.33)$$

Donde:

$A \Rightarrow$ Incremento de ahorro entre dos espesores consecutivos; [CUP/m].

$\delta \Rightarrow$ Espesor de referencia para el cálculo; [m].

$\delta + 1 \Rightarrow$ Espesor consecutivo; [m].

Incremento de la inversión del aislamiento

$$I_A = I_{\delta+1} - I_{\delta} \quad (2.34)$$

Siendo:

$$I_{\delta+1} = 2,246 + 151,3 \cdot (\delta + 1) \quad (2.35)$$

$$I_{\delta} = 2,246 + 151,3 \cdot \delta \quad (2.36)$$

Donde:

$I_A \Rightarrow$ Incremento de la inversión del aislamiento entre dos espesores consecutivos; [CUP/m].

Espesor óptimo económico

El espesor óptimo económico se corresponde a aquel que brinda el valor que tiende a cero, estableciendo la diferencia entre el incremento del ahorro y el incremento de inversiones. Esta selección permite equilibrar ambos costos, empleando como espesor de aislamiento el que minimiza el costo total.

Período de recuperación

Se define como el número esperado de años necesarios para que se recupere una inversión original. La cantidad total requerida para recuperar el monto original invertido, incluye también la fracción de un año en caso que sea apropiado.

$$P_R = A_A + \frac{C_N}{F_R} \quad (2.37)$$

Donde:

P_R \Rightarrow Período de recuperación; [años].

A_A \Rightarrow Año anterior a la recuperación total; [año].

C_N \Rightarrow Costo no recuperado al principio del año; [CUP].

F_R \Rightarrow Flujo de efectivo durante el año; [CUP].

2.4 Conclusiones del capítulo

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo que permite determinar los parámetros fundamentales que caracterizan el calentamiento de petróleo con trazas de vapor en tuberías aisladas térmicamente, donde se exponen los criterios de selección en función del usuario.
- La incorporación de aislamiento térmico a las tuberías destinadas al transporte de petróleo crudo con trazas de vapor, permiten mejorar las condiciones de trasiego, ya que existe un mayor aprovechamiento del calor suministrado a la instalación.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS CON TRAZA DE VAPOR

3.1 Introducción

El petróleo crudo de alta viscosidad presenta muchas dificultades para su transporte y manejo, lo que requiere de técnicas especiales para la mejora de sus propiedades de transporte. Lo anterior conlleva a que se estudien vías a través de las cuales puedan manejarse crudos más pesados y viscosos donde se utilizan fracciones más ligeras, lo cual se consigue por calentamiento o dilución con petróleos ligeros o diesel, obteniendo una mezcla de menor viscosidad y peso.

En todo proceso tecnológico estos productos son tratados en diferentes equipos y aparatos, y transportados a través de conductos. El cálculo de los equipos y conductos depende del comportamiento reológico de los diferentes materiales; y dicho comportamiento está grandemente relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas. Es por ello que en la actualidad, el conocimiento acerca de la influencia de la temperatura en tuberías, al transportar estos fluidos contribuye sustancialmente a la solución de una gran variedad de problemas de ineficiencia energética en la industria.

La industria minero metalúrgica de la región utiliza diversas formas de transportación, cobrando importancia primaria el transporte por sistemas de tuberías. Estos sistemas de transporte son difundidos y empleados mundialmente. Cuando operan bajo parámetros eficientes son de gran efectividad económica y medioambiental con respecto a los demás sistemas de transporte.

La evaluación final de un proyecto es de primordial importancia para establecer en que medida esta ha contribuido al desarrollo. El correcto análisis, permite afirmar las bases para futuros trabajos que se desarrollen sobre la temática, de ahí su significativa relación con la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Por lo anteriormente expuesto se define como **objetivo** del capítulo: exponer los principales resultados de la investigación, realizando además una breve valoración económica y ambiental del proceso estudiado.

3.2 Obtención y empleo del espesor técnico racional de aislamiento

En la tabla 3.1 se muestran los principales parámetros que caracterizan al espesor técnico racional de aislamiento, los mismos se obtuvieron a partir del procedimiento planteado en el acápite 2.2 del capítulo anterior. Los resultados mostrados se determinaron con gran precisión, estableciendo un error menor del 1 % en el cálculo del espesor.

Tabla 3.1 Resultados del cálculo preliminar de espesor

Magnitud	Símbolo	Valor
Ángulo sobre el cual se dispone el aislamiento	θ	282°
Ángulo de calentamiento de la tubería principal	β	78°
Superficie de la tubería acompañante	F_A	0,540 m ² /m
Superficie de cálculo de la tubería principal	F_C	0,190 m ² /m
Área superficial del aislamiento que no incluye la porción que se dispone sobre la tubería principal	F_E	0,601 m ² /m
Conductividad térmica media del material aislante	k_A	0,036 W/m·K
Resistencia térmica desde la tubería acompañante a la cavidad termoaislada	R_A	0,155 m ² ·K/W
Resistencia térmica desde la cavidad termoaislada a la tubería principal	R_C	0,074 m ² ·K/W
Resistencia térmica desde la cavidad termoaislada al exterior	R_E	0,703 m ² ·K/W
Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada	t_C	369,878 K
Resistencia térmica desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal	R_1	0,013 m·K/W
Resistencia térmica que presupone el espesor de la tubería principal	R_2	0,0002 m·K/W
Resistencia térmica que presupone el espesor de aislamiento	R_3	0,590 m·K/W
Resistencia térmica desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente	R_4	0,063 m·K/W
Pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior	q^P	49,186 W/m
Calor que recibe la tubería principal desde el aire en el interior de la cavidad	q^C	69,123 W/m
Calor que se pierde al medio desde la cavidad	q^E	73,612 W/m
Calor perdido usando traza de vapor	q^T	122,798 W/m
Calor que se perdería si no se usara traza de vapor	q^S	156,601 W/m
Efectividad de la traza de vapor	η	78,4 %
Espesor del aislamiento a emplear	δ	0,02 m

Luego de determinado el espesor técnico racional se establece la disyuntiva, pues el valor arrojado no está establecido en los catálogos ISOVER para manta de lana de roca spintex 322-G-70, aislamiento empleado para el cálculo; motivo por el cual el

valor obtenido se normalizó acercándolo al valor más próximo dentro de los establecidos por el fabricante.

El aislamiento ya normalizado correspondió a aquel cuyo espesor poseía 0,04 m; para el mismo se procedió a determinar en la instalación los parámetros característicos para este espesor de aislante en específico, los mismos están expuestos en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados del cálculo para espesor normalizado

Magnitud	Símbolo	Valor
Ángulo sobre el cual se dispone el aislamiento	θ	282°
Angulo de calentamiento de la tubería principal	β	78°
Superficie de la tubería acompañante	F_A	0,540 m ² /m
Superficie de cálculo de la tubería principal	F_C	0,190 m ² /m
Área superficial del aislamiento que no incluye la porción que se dispone sobre la tubería principal	F_E	0,628 m ² /m
Conductividad térmica media del material aislante	k_A	0,036 W/m·K
Resistencia térmica desde la tubería acompañante a la cavidad termoaislada	R_A	0,155 m ² ·K/W
Resistencia térmica desde la cavidad termoaislada a la tubería principal	R_C	0,074 m ² ·K/W
Resistencia térmica desde la cavidad termoaislada al exterior	R_E	1,261 m ² ·K/W
Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada	t_C	374,484 K
Resistencia térmica desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal	R_1	0,013 m·K/W
Resistencia térmica que presupone el espesor de la tubería principal	R_2	0,0002 m·K/W
Resistencia térmica que presupone el espesor de aislamiento	R_3	1,112 m·K/W
Resistencia térmica desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente	R_4	0,059 m·K/W
Pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior	q^P	27,774 W/m
Calor que recibe la tubería principal desde el aire en el interior de la cavidad	q^C	80,996 W/m
Calor que se pierde al medio desde la cavidad	q^E	45,783 W/m
Calor perdido usando traza de vapor	q^T	73,557 W/m
Calor que se perdería si no se usara traza de vapor	q^S	92,665 W/m
Efectividad de la traza de vapor	η	79,5 %
Espesor del aislamiento a emplear	δ	0,04 m

El empleo de aislamiento térmico es el modo utilizado por excelencia cuando se trasiegan fluidos a temperaturas que difieren de las ambientales, he aquí la importancia de una correcta selección. La eficacia está en dejar escapar al medio la

menor cantidad de calor posible, disminuyendo las pérdidas energéticas y logrando establecer el régimen térmico deseado.

Con el empleo de la traza de vapor y manta de lana de roca de espesor 0,04 m las pérdidas energéticas mostró una disminución de 19,01 W por cada metro de tubería, lo cual representa una pérdida de 97,45 kW en toda la instalación.

3.2.1 Análisis de la influencia de la temperatura en las pérdidas energéticas

Al aumentar la temperatura ambiente en el posible rango de operación, se observó una disminución de los valores de las pérdidas energéticas (figura 3.1), lo cual refleja la marcada incidencia de los parámetros climáticos en el proceso de transporte de crudo por sistemas que emplean trazas de vapor aislados térmicamente, acentuándose la temperatura ambiental.

Para espesor $\delta = 0,04$ m

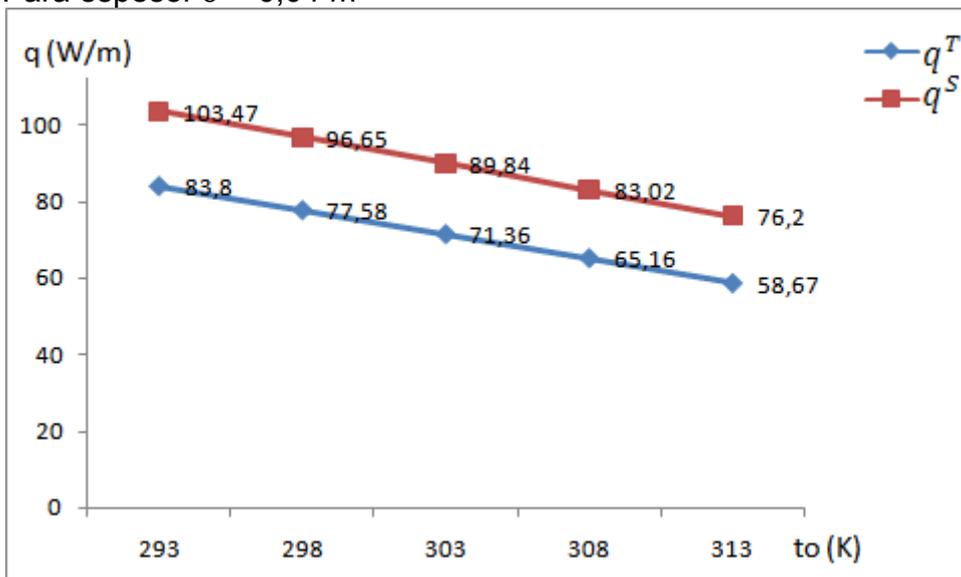


Figura 3.1 Influencia de la temperatura ambiente en las pérdidas energéticas

Realizando el ajuste del comportamiento de las pérdidas energéticas a una tendencia lineal, se obtuvieron las expresiones en función de la temperatura ambiente (ecuación 3.1 y 3.2) con un coeficiente de correlación múltiple en ambos casos de 0,99. El resultado obtenido a partir de las ecuaciones ya descritas permitió establecer el comportamiento de las pérdidas energéticas, a partir de las variaciones de la temperatura ambiente.

$$q^T = 451,1 - 1,253 \cdot t_o \quad (3.1)$$

$$q^S = 502,9 - 1,363 \cdot t_o \quad (3.2)$$

La funciones obtenidas (ecuación 3.1 y 3.2) posibilitan simular el comportamiento de las pérdidas energéticas al variar la temperatura t_o , las mismas se recomiendan emplear sólo para las condiciones experimentales para las que fueron ajustadas.

Similar análisis se realizó para determinar la influencia de la temperatura del vapor en las pérdidas energéticas, mostrando un aumento de las mismas al incrementar la temperatura del vapor calefactor (figura 3.2), lo cual enmarca otra variable con incidencia significativa en el proceso.

Para espesor $\delta = 0,04$ m

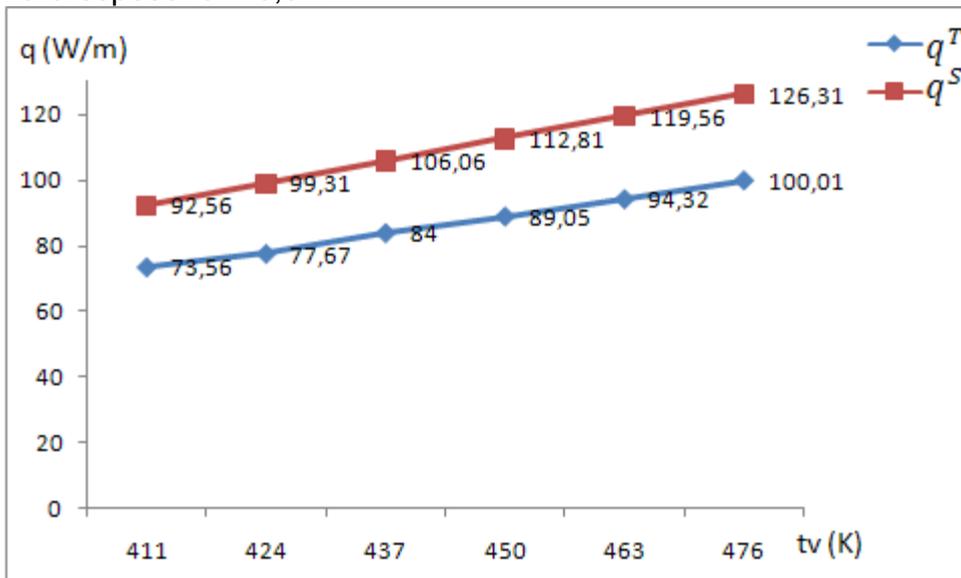


Figura 3.2 Influencia de la temperatura del vapor en las pérdidas energéticas

A partir de los resultados mostrados en la figura 3.2, se correlacionó el comportamiento de las pérdidas energéticas en función de la temperatura del vapor, determinándose las ecuaciones 3.3 y 3.4, obtenidas con un coeficiente de correlación múltiple de 0,99; lo que satisface los resultados esperados mediante el análisis de la adecuación del modelo.

$$q^T = 0,411 \cdot t_v - 96,08 \quad (3.3)$$

$$q^S = 0,519 \cdot t_v - 120,8 \quad (3.4)$$

Finalmente se simuló realizando variaciones en la temperatura del combustible, para un rango inferior a los 70 °C (343 K) según las especificaciones de CUPET. Lo cual mostró al igual que la temperatura del vapor, un incremento de las pérdidas energéticas con el aumento de la temperatura del combustible (figura 3.3).

Para espesor $\delta = 0,04$ m

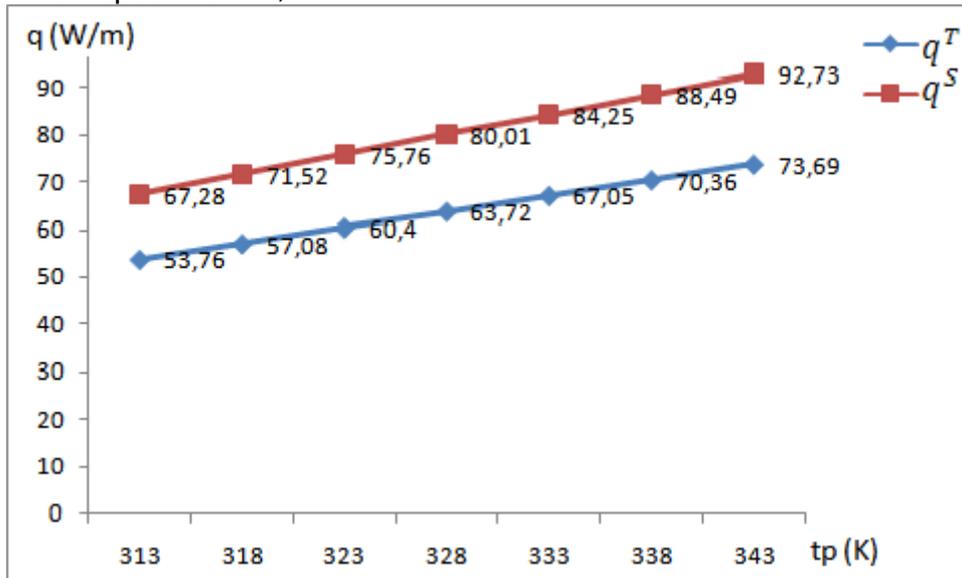


Figura 3.3 Influencia de la temperatura del combustible en las pérdidas energéticas

Para los valores simulados de temperatura del combustible se observó una tendencia lineal, para la cual se obtienen la ecuaciones 3.5 y 3.6 con un coeficiente de correlación múltiple de 0,99; considerándose satisfactorios los resultados de predicción.

$$q^T = 0,664 \cdot t_p - 154,1 \quad (3.5)$$

$$q^S = 0,848 \cdot t_p - 198,2 \quad (3.6)$$

3.2.2 Simulación de la caída de temperatura del combustible en el oleoducto

Para determinar las variaciones de temperatura en las tuberías, según el modelo propuesto por Laurencio (2012), se tuvo en cuenta la temperatura inicial de trasiego y la temperatura ambiental promedio, así como el espesor del aislante térmico, definidos en la tabla 3.2. Se determinó el coeficiente de convección de el aire y del combustible para las condiciones del transporte, también se consideró la conductividad térmica de la tubería principal y del aislante; donde se obtuvo como resultado la relación de variación de temperatura del combustible; tanto en el oleoducto con traza y sin traza de vapor, observando la ganancia de calor que se obtiene en el primero de estos.

Se obtuvieron los resultados del gradiente de temperatura para tres valores de temperatura inicial del trasiego (figura 3.4 a), estableciendo un patrón que se adapta al rango de operación de la planta.

Para espesor $\delta = 0,04$ m

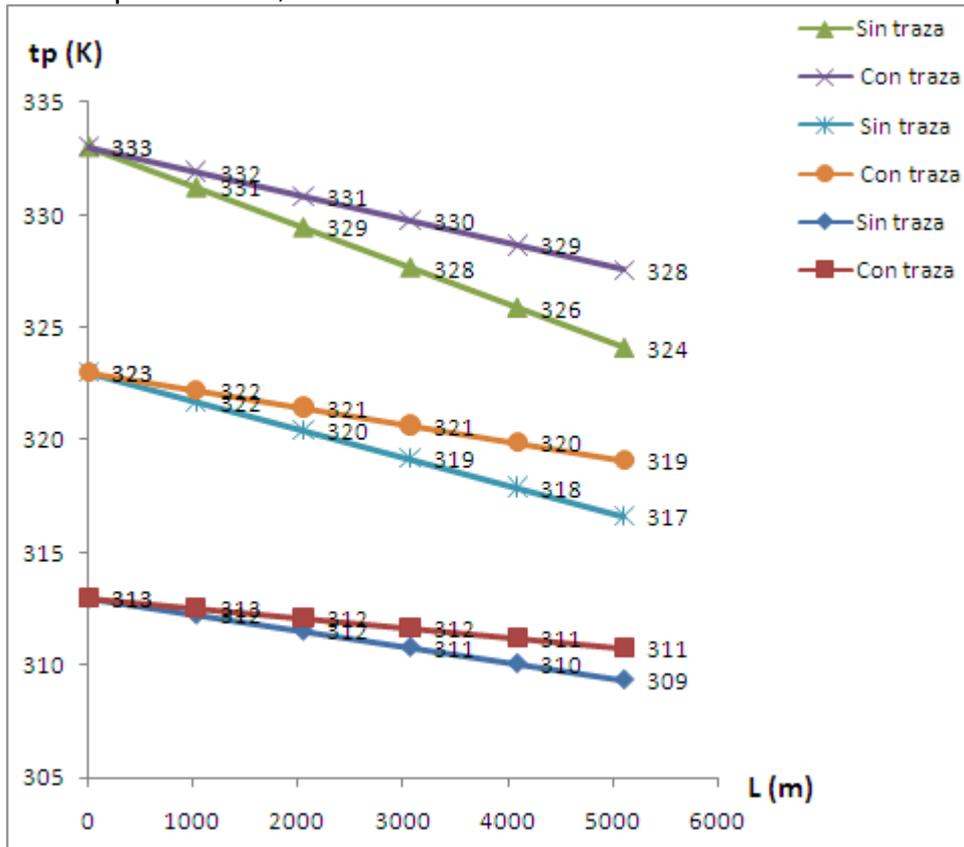


Figura 3.4a Distribución de la temperatura del combustible en el oleoducto

En la figura 3.4 b se expone el comportamiento de la temperatura del combustible en el oleoducto, para una temperatura inicial de trasiego de 343 K (70 °C) la cual se establece como la máxima a la que debe transportarse el combustible y la más empleada para operar. Dicha figura demuestra como existe una disminución de la caída de temperatura con el empleo de la traza de vapor aislada térmicamente, reduciendo de forma significativa la variación de la temperatura del combustible desde su ingreso en el oleoducto hasta su descarga, lo cual permite mantener un nivel estable de operación, factor necesario cuando se transportan fluidos con altas viscosidades como es el caso del crudo mejorado 650. Por su importancia práctica se correlacionaron los valores de temperatura en función de la longitud del oleoducto, para obtener modelos simples que describan el fenómeno descrito, los mismos mostraron una tendencia lineal para una buena adecuación del modelo alcanzando el coeficiente de correlación múltiple valores de 0,99 en ambos casos.

$$t_{P \text{ con traza}} = 343 - 0,001 \cdot L \quad (3.7)$$

$$t_{P \text{ sin traza}} = 343 - 0,002 \cdot L \quad (3.8)$$

Para espesor $\delta = 0,04$ m

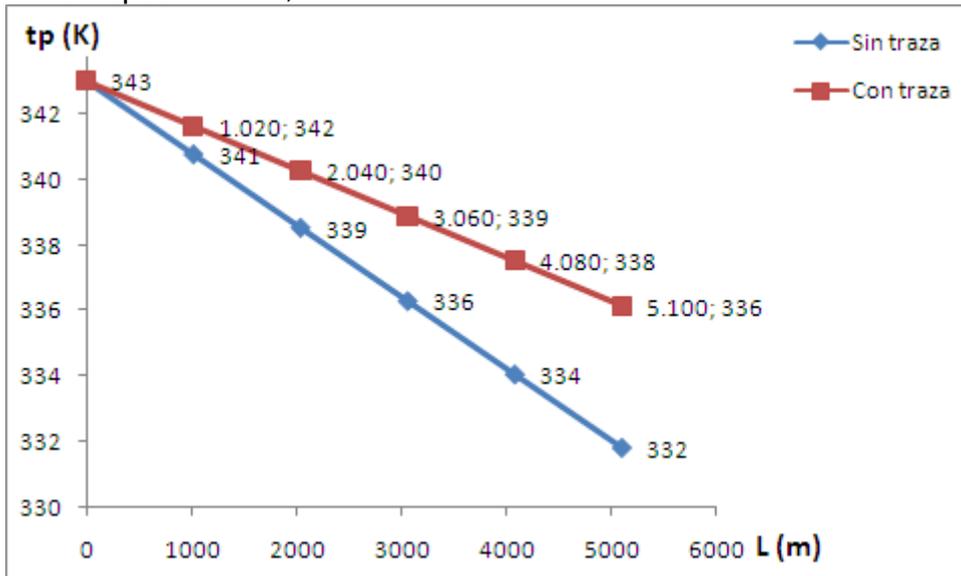


Figura 3.4b Distribución de la temperatura del combustible en el oleoducto

3.3 Obtención y empleo del espesor óptimo económico de aislamiento

Siguiendo el procedimiento planteado en el acápite 2.3 del capítulo 2, se evaluaron los datos que a continuación se relacionan; para los cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.3, los mismos permiten estimar cual es el que más se ajusta al espesor económico de aislamiento.

- Temperatura interior promedio = 373 K (100 °C)
- Temperatura ambiente = 301 K (28 °C)
- Coeficiente de conductividad térmica entre 301 y 373 K, $k = 0,036$ W/m · K
- Tiempo de funcionamiento de la instalación, $Z = 8.000$ h/año
- Costo de la energía: 0,09 CUP/kW · h
- Número de años del estudio, $n = 10$ años
- Incremento del coste de la energía en el período, $b = 3$ % anual
- Interés anual del dinero deducidos impuestos, 5 %
- Tasa de inflación anual prevista, 1 %
- Inversión en aislamiento:

Para 0,04 m de espesor 8,24 CUP/m

0,05 m de espesor 10 CUP/m

0,06 m de espesor 11,13 CUP/m

0,07 m de espesor 12,89 CUP/m

0,08 m de espesor 14,36 CUP/m

0,1 m de espesor 18,09 CUP/m

Tabla 3.3 Parámetros obtenidos en el cálculo del espesor óptimo económico

δ [m]	q^T [W/m]	V [CUP/m·año]	V_A [CUP/m]	A [CUP/m]	I_A [CUP/m]	$A - I_A$ [CUP/m]
0,04	70,534	18,536	175,838			
0,05	58,925	15,485	146,898	28,940	1,76	27,180
0,06	50,924	13,383	126,953	19,945	1,13	18,815
0,07	45,073	11,845	112,366	14,586	1,76	12,826
0,08	40,606	10,671	101,229	11,136	1,47	9,666
0,1	34,231	8,995	85,336	15,893	3,73	12,163

Los valores arrojados en la tabla 3.3 muestran que; el resultado más cercano no cumple la condición de establecer una diferencia próxima o igual a cero entre el incremento de ahorro y el incremento de las inversiones.

Pero, no son estos los únicos aspectos que hay que considerar para determinar el espesor óptimo económico de aislamiento, a fin de conseguir las condiciones de explotación más racionales, así como el ahorro energético que esto lleva consigo. En este sentido hay que considerar dos hechos evidentes; a medida que el espesor de aislamiento aumenta las pérdidas caloríficas y los gastos de explotación disminuyen; sin embargo e inversamente a lo anterior, el precio del aislamiento aumenta en función del espesor.

El costo total de la instalación lo constituyen los gastos correspondientes a las pérdidas de calor y el gasto de inversión de aislamiento. Por lo tanto, si se representan como se indica en la figura 3.6, la curva que decrece corresponde a los gastos por pérdidas de calor, la que crece a los costos por inversión de aislamiento, y la superior es la suma de ambas, cuyo valor mínimo corresponde al espesor óptimo económico de aislamiento, el cual en este caso se corresponde a 0,06 m.

El espesor óptimo económico queda establecido para aquel espesor con el cual el costo total alcanza su valor mínimo. El procedimiento para la búsqueda del valor mínimo queda representado por el diagrama de la figura 3.5, para encontrar el punto mínimo usando el método de búsqueda exhaustiva.

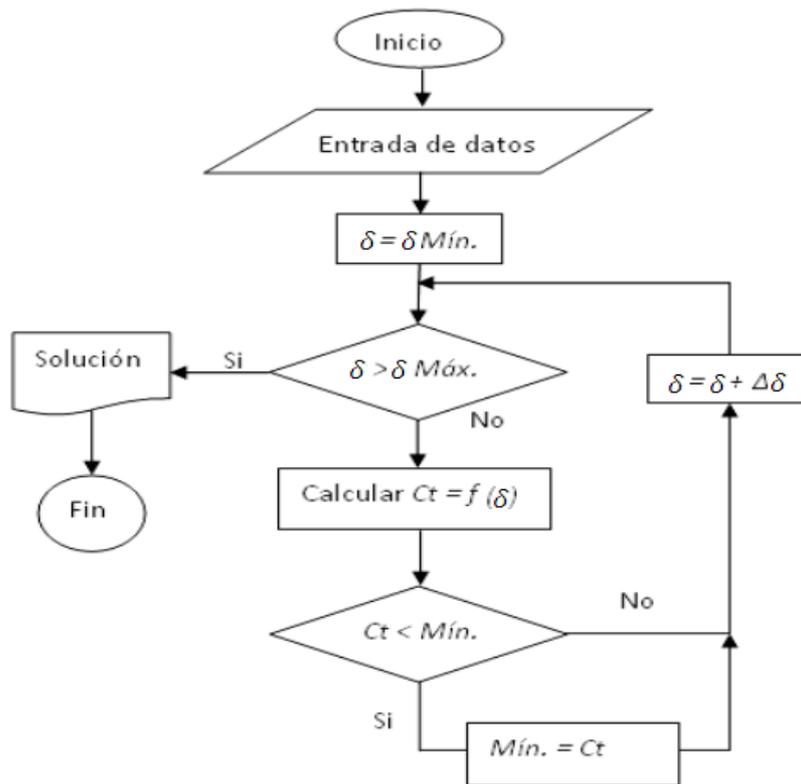


Figura 3.5 Diagrama para la obtención del espesor óptimo económico

Si se eligiera un espesor menor, las pérdidas de calor serían mayores y el gasto de combustible también aumentaría. Si por el contrario, se fija un espesor mayor, el ahorro de la energía no compensaría el mayor costo de aislamiento.

Espesor óptimo económico = 0,06 m; Costo total = 24,513 CUP/m

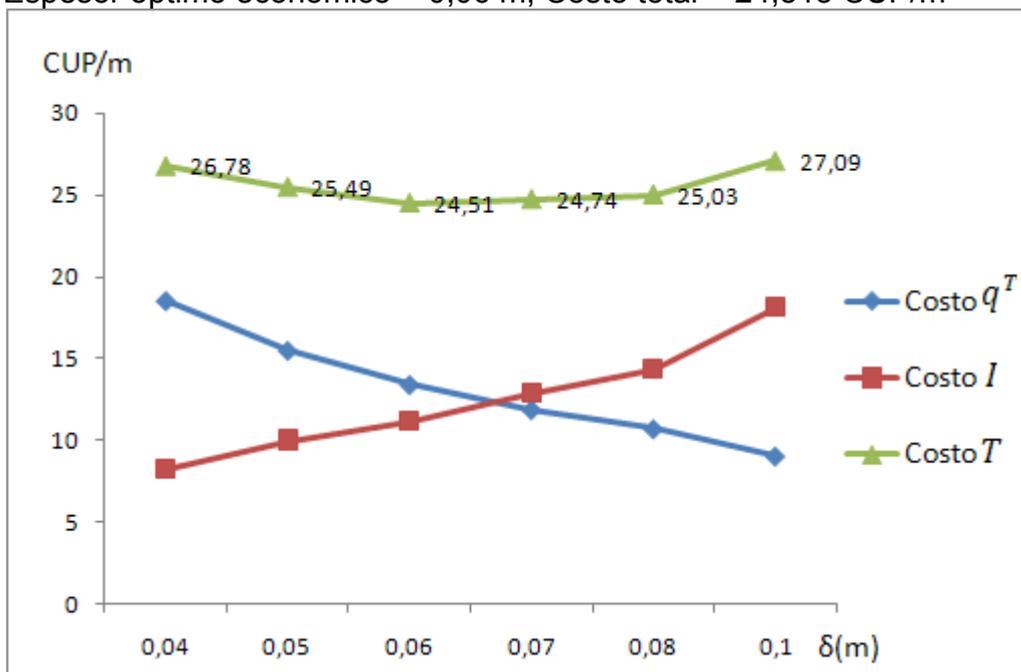


Figura 3.6 Costo total en función del aislamiento

3.3.1 Tiempo de recuperación de la inversión

Evaluar la rentabilidad financiera de un proyecto es de gran importancia práctica, el método empleado por excelencia es el de recuperación de la inversión, determinando el tiempo que tarda un inversionista para recuperar el capital invertido, ya sea por los ingresos que produce el proyecto o por los beneficios resultantes de aplicar alguna medida de ahorro de energía.

El número de años en que se amortiza la inversión de cada espesor de aislamiento analizado aparece reflejado en la tabla 3.4, para la misma se tuvieron en cuenta los flujos netos de efectivo esperados, esto en función de las pérdidas energéticas.

Tabla 3.4 Períodos de recuperación de la inversión de aislamiento

Flujos netos de efectivo esperados						
Año	$\delta = 0,04$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,06$	$\delta = 0,07$	$\delta = 0,08$	$\delta = 0,1$
0	52736	64000	71232	82496	91904	115776
1	199301	199304	199306	199308	199309	199311
2	199301	199304	199306	199308	199309	199311
3	199301	199304	199306	199308	199309	199311

Esesor $\delta = 0,06$

0 1 2 3

-71232 199306 199306 199306

Períodos de recuperación						
	0,26	0,32	0,36	0,41	0,46	0,58

Tomando todos los costos en términos nominales y sin considerar el valor del dinero en el tiempo. El proyecto proporciona innumerables ventajas económicas y tan solo un período de recuperación de la inversión de 0,36 años para el espesor óptimo económico de aislamiento.

3.4 Impacto ambiental

El comportamiento eficiente del transporte de combustible por tuberías, está orientado hacia la prevención de accidentes que afecten directamente al medio circundante. En tabla 3.5 se han identificados los posibles efectos negativos asociados al trasiego del crudo cubano en la empresa Raúl Díaz Arguelles (Empresa Puerto Moa).

Tabla 3.5 Impactos ambientales asociados al transporte de combustible por tuberías

Accidente que provoca	Factor	Impactos ambientales
Escape de vapores	Aire	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la calidad del aire • Incremento local de la temperatura
Escape de vapores	Hombre	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de enfermedades respiratorias • Quemaduras y malestares
Escape de vapores	Económico	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas económicas
Derrame de combustible	Económico	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas económicas
Derrame de combustible	Suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación del suelo • Pérdida del ecosistema endémico
Derrame de combustible	Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación de las aguas • Inutilización del agua para fines comunes

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de suma importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta en el análisis desarrollado (Somoza y García 2002), determinando como repercute sobre el medio cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el proceso de transporte de combustible pesados por tuberías (Laurencio, 2008).

La identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones se torna necesaria (tabla 3.6), pues anuncia los posible cambios y brinda la posibilidad de prepararse para ello.

Tabla 3.6 Factores ambientales susceptibles a afectaciones

Medio	Medio socioeconómico
Suelo	Hombre, Aspectos sociales, Aspectos económicos
Agua	Hombre, Aspectos sociales, Aspectos económicos
Aire	Hombre, Aspectos sociales, Aspectos económicos

Los impactos ambientales expuestos en la tabla 3.5 producen efectos indirectos y negativos como incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo sanguíneo, la contracción de los capilares de la piel y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental del hombre, expuestos también a enfermedades respiratorias. (Laurencio, 2012).

3.5 Impacto económico

El aumento del precio de los hidrocarburos en la última década ha conllevado a que los países desarrollen nuevas formas de energía y promuevan el uso racional de la de la misma.

Tras la modernización de las instalaciones de bombeo y centrales termoeléctricas, varios millones de dólares se han dejado de gastar en el país durante los últimos años debido al empleo del combustible crudo nacional, lo cual muestra por sí solo la trascendencia del cambio, pese a los inconvenientes que ocasiona operar con un combustible denso y con elevada cantidad de azufre, entre ellos la reducción del ciclo de mantenimiento de las plantas y el consiguiente aumento de las paradas técnicas previstas, lo que aumenta el costo de mantenimiento en un 7,3 %, según Laurencio (2012).

La utilización del combustible crudo mejorado 650 en el sector industrial cubano, constituye un impacto positivo desde el punto de vista tecnológico y económico. El establecimiento del espesor de aislamiento, contribuye significativamente al ahorro del consumo energético y al aumento del rendimiento de las instalaciones de transporte por sistemas de tuberías. Mediante la implementación de los resultados de simulación, se comprobó la posibilidad de ahorro de energía en la instalación estudiada.

En el análisis económico referente a los espesores de aislamiento tuvieron en cuenta dos aspectos fundamentales, procediendo de la siguiente manera; en el primero se realiza la comparación de los costos de las pérdidas energéticas con y sin el empleo de traza de vapor. Para el espesor óptimo económico también se realiza el análisis de costo de las pérdidas y para ambos el costo de inversión. Los valores de dicho análisis se exponen en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Comportamiento de los costos para espesores de aislamiento

Espesor técnico racional de aislamiento			
Costos: [CUP]* [CUP/año]**	Con traza	Sin traza	Ahorro
**Costo por pérdidas energéticas	98 586	124 197	25 611
*Costo por inversión	42 024		
Espesor óptimo económico de aislamiento			
**Costo por pérdidas energéticas	68 354		
*Costo por inversión	56 763		

La implementación de los resultados contribuirá significativamente al ahorro del consumo energético en las instalaciones de transporte del combustible crudo mejorado 650.

3.6 Conclusiones del capítulo

- Se confirmó la efectividad de implementar la tubería de trasiego de vapor como traza, por cuanto las pérdidas energéticas en la instalación disminuyeron en 97,45 kW, lo que conlleva a un ahorro de capital de 25 610 CUP al año; invirtiendo solo 42 024 CUP para un periodo de amortización de 0,26 años. (Espesor técnico racional de aislamiento).
- Se demostró que para la instalación analizada el espesor óptimo económico de aislamiento es 0,06 m; garantizando condiciones favorables de explotación y mejorando las existentes.

CONCLUSIONES GENERALES

- La bibliografía analizada expone las principales propiedades de los combustibles empleados en Cuba. Sin embargo, es limitada la información para establecer un diseño eficiente de los sistemas de transporte desde el punto de vista térmico, mediante el empleo de aislamiento, bajo criterios técnicos y económicos.
- Se estableció el procedimiento de cálculo que permite determinar los parámetros fundamentales que caracterizan el calentamiento de petróleo con trazas de vapor en tuberías aisladas térmicamente; el mismo permite cuantificar las mejoras en las condiciones de trasiego, ya que existe un mayor aprovechamiento del calor suministrado a la instalación 283 657 kW/año.
- La implementación de la tubería de trasiego de vapor como traza, permitió elevar la efectividad de este sistema hasta 79,5 % y disminuyó las pérdidas energéticas en 19,1W/m. Lo anterior posibilita un uso más racional del calor y por consiguiente se traduce en ahorros económicos importantes.

RECOMENDACIONES

- Investigar el comportamiento térmico del sistema, para otros tipos de aislamientos y condiciones distintas de explotación.
- Utilizar el informe como guía para la incorporación de mejoras a la instalación objeto de estudio.
- Disponer de algún elemento separador de preferencia un no metal, que mantenga una holgura de 1 cm por debajo de la tubería acompañante para aumentar la efectividad del calentamiento.
- Perfeccionar el informe considerando criterios no valorados en los procedimientos descritos.
- Ampliar el método de empleo para otros tipos de combustible y fluidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, R., Torres, R. y Montes, E., "Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpas orgánicas". *Revista de la Facultad de Agronomía*. 26(3) 599-612, 2009.
- Balagui, S., Mohammadifar, M. y Zargaraan, A., "Physicochemical and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of iranian astragalus". *Journal of Food Biophys*. 15(4) 59-71, 2010.
- Balan, C., Broboana, D., Gheorghiu, E. y Vékás, L. "Rheological characterization of crude oils and complex fluids in electro-magnetic fields". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 42(2) 92-103, 2008. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2009]
- Benítez, I., Álvarez R., escudero, I., Reyes, F. y Rodríguez, A., "Efecto de aditivos nacionales en las propiedades físicas del petróleo crudo cubano". *Tecnología Química*. 24(1) 43-61, 2004.
- Bourbon, A., Pinheiro, A., Ribeiro, C., Miranda, C., Maia, J., Teixeira, J. y Vicente, A., "Characterization of galactomannans extracted from seeds of gleditsia triacanthos and sophorajaponica through shear and extensional rheology". *Journal of Food Hydrocolloid*. 12(4) 184-192, 2010.
- Branco, I. y Gasparetto, C., "Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices". *Science and Alimentary Technologic*. 23(1) 166-171, 2003.
- Caldiño, V. y Salgado, M., "Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris", 7mo Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México, 2004.
- Cárdenas, J. y Fonseca E., "Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiado desde la relación viscosidad y temperatura". *EIA*. 12(2) 125-137, 2009.
- Chen, T., Mohammed, R., Bailey, A., Luckham, P., y Taylor, S., "Dewatwring of crude oil emulsions. Emulsion resolution by the application of an electric field, colloids and surfaces". *Physicochemical and Engineering Aspects*. 31(8) 273-284, 1994.

- Chenlo, F., Moreira, R. y Silva, C., "Rheological behavior of aqueous systems of tragacanth and guar gums with storage time". *Journal of Food Engineering*. 32(6) 107-113, 2010.
- Colby, R., "Structure and linear viscoelasticity of flexible polymer solutions: comparison of polyelectrolyte and neutral polymer solutions". *Journal of Rheological*. 24(9) 425-442, 2010.
- Da Silva, F., Guimaraes, D. y Gasparetto, C., "Rheology of acerola juice, effects of concentration and temperature". *Science and Alimentary Technologic*. 25(1) 121-126, 2005.
- Dak, M., Verma, R. y Jaaffrey, S., "Effect of temperatures and concentration on rheological properties of kesar". *Journal of Food Engineering*. 28(4) 1011-1015, 2007.
- 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.
- Díaz, A. y Falcón, J., "Estudio reológico de emulsiones de petróleo crudo en agua". *Tecnología Química*. 24(1) 32-55, 2004. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 9 de marzo de 2007]
- Díaz, A. y Falcón, J., "Estudio reológico de emulsiones del petróleo crudo cubano en agua". *Tecnología Química*. 24(2) 45-53, 2004. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 12 de marzo de 2007]
- Falcón, J., Brossard, L., Carbonell, J., Barreda, A. y Pacheco, P., Emulgente para la preparación de emulsiones agua-combustible, Oficina Cubana de la Propiedad Industrial, Patente de Invención, 45, 1995.
- Falcón, J., Serret, N. y Carbonell, J., "Effect of pyrolysis products on diesel-fuel oil blends". *Tecnología Química*. 26(3) 54-63, 2006.
- Ferro, A., Estudio de la sustitución de las pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente P. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000. 78p
- Ferro, A., Falcón, J. y Toledo, A., "Estudio de la posibilidad de sustitución de pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente p (Segunda Parte)". *Tecnología Química*. 24(1) 33-45, 2004.

- Garcell, L., Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica. Informe investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
- Harms, H., Oil tool and method for controlling paraffin deposits in flow lines and downhole Strings. Patent 20 32 005, 1991.
- Incropera, F. y De Witt, D., Fundamentals of heat and mass transfer, La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003.
- ISOVER. "Manual de aislamiento en la industria", 2004.
- Khatib, M., "The development of poiseuille flow of a pseudoplastic fluid". The Arabian Journal for Science and Engineering. 31(1) 102-117, 2006. www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de mayo de 2007]
- 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]
- 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]
- Laurencio, H., Método para la determinación de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2012. 116p
- Manals, M. y Falcón, J., "Estudio de la estabilidad de la mezcla diesel-fuel-oil con productos de pirólisis". Tecnología química. 25(2) 53-61, 2005.
- Maruska, P. y Rao, B., "Estudio reológico y dieléctricos a los petróleos parafínicos y asfálticos". Fuel Science and Technology. 2(5) 119-168, 1987.
- Mechetti, M. y Zapana L., "Estudio comparativo de actividad electrorreológica en petróleos argentinos", I Encuentro Internacional de Física aplicada a la Industria del Petróleo y IV Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada, Bucaramanga, Colombia, 2000.
- Mechetti, M. y Zapana, L., "Estudios electrorreológicos de fluidos basados en dispersiones de asfaltenos", Congreso Producción 2000 y III Workshop

- Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú, Misiones, Argentina, 2000.
- Mechetti, M., Fornés, A., Maturano, S. y Zapana, L., “Efecto electrorreológico en crudos argentinos”, Congreso Producción 2000 Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú, Argentina, 2000.
- Mechetti, M., Rodríguez L., Castañeda, M. y Pelaez, C., Efecto electrorreológico en crudos pesados, Informe ICP, Ecopetrol, Argentina, julio, 2001.
- Monteagudo, J., Perez, J. y Guerra, E., “Aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor”. Ingeniería química. 1998.
- Nikolaev, A., Opinión de experto. Alejandro Nikolaev. Especialidad: Ingeniería en Minas. Profesor Titular, Instituto de Minas de San Petersburgo. Rusia. Lunes, 2:10 p.m., 12 de septiembre de 2011.
- Ochoa, O., Procedimiento para el bombeo eficiente de petróleos pesados, Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2011. 85p
- Otero, L., Fenómenos de transporte en metalurgia extractiva, Editorial Alambra, Madrid, España, 1989.
- Paul, C., “Effect of chemical structure on the conduction and breakdown of paraffin oil”. Indian Journal Technological. 8(1) 64-78, 1978.
- Pelaez, C. y Stachenco, E., “Estudio del efecto del campo magnético en crudos parafínicos por cromatografía de gases de alta resolución”, Ecopetrol-ICP, 1999.
- Reid, C. y Sherwood, K., The properties of gases and liquids. Mc. Graw-Hillbook Company, New York, 1966.
- Risica, D., Barbeta, A., Vischetti, L., Cametti, C. y Dentini, M. “Rheological properties of guar and its methyl, hydroxypropyl and hydroxypropyl-methyl derivatives in semidilute and concentrated aqueous solutions”. Journal of Polymer. 15(1) 1972-1982, 2010.
- Romo, L., Emulsiones, Editorial Universitaria, Ecuador, 1993.
- Romo, L., Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua, Petroecuador-ESPE, convenio 96-058, 1998.

- Sánchez, C., Oria, R. y Sánchez, A., “Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés”, Simposio Poscosecha, Orihuela, Valencia, España, 2008.
- 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.
- Vandresen, S., Quadri, M., De Souza, J. y Hotza, D., “Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices”. Journal of Food Engineering. 29(3) 269-274, 2009.
- Vita, M., Alejandro, M., Arriola, M., Sánchez, M., Manzanares, E., Romo, C. y Yeri, R., “Nueva tecnología para la emulsificación de residuales del petróleo en agua”, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Boletín IIE, 131- 135, México, 2001.
- Wang, M., Permanent-magnet wax-proof device, PATENT 5 024 271, 1991.
- Wang, B. y Dong, L., Paraffin characteristics of waxy crude oils in China and the methods of paraffin removal and inhibition, SPE 29 954, 1995.

Anexo I: Propiedades termofísicas

Tabla 1. Propiedades termofísicas del crudo mejorado CM-650

t [K]	t [°C]	k [W/m·K]	Pr	C_p [J/kg·K]	μ [Pa·s]	ρ [kg/m ³]
313	40	1,439	5253,062	1825,4	4,933	983,890
314	41	1,4377	4976,166	1833,96	4,665	983,702
315	42	1,4364	4713,860	1842,52	4,412	983,518
316	43	1,4351	4465,374	1851,08	4,172	983,339
317	44	1,4338	4229,983	1859,64	3,945	983,164
318	45	1,4325	4006,995	1868,2	3,731	982,993
319	46	1,4312	3795,757	1876,76	3,529	982,825
320	47	1,4299	3595,651	1885,32	3,337	982,661
321	48	1,4286	3406,090	1893,88	3,156	982,501
322	49	1,4273	3226,519	1902,44	2,984	982,344
323	50	1,426	3056,412	1911	2,822	982,190
324	51	1,4247	2895,269	1919,56	2,669	982,039
325	52	1,4234	2742,619	1928,12	2,524	981,891
326	53	1,4221	2598,014	1936,68	2,387	981,746
327	54	1,4208	2461,031	1945,24	2,257	981,603
328	55	1,4195	2331,267	1953,8	2,135	981,464
329	56	1,4182	2208,344	1962,36	2,019	981,326
330	57	1,4169	2091,899	1970,92	1,909	981,191
331	58	1,4156	1981,592	1979,48	1,805	981,059
332	59	1,4143	1877,099	1988,04	1,707	980,929
333	60	1,413	1778,115	1996,6	1,615	980,801
334	61	1,4117	1684,348	2005,16	1,527	980,675
335	62	1,4104	1595,525	2013,72	1,444	980,551
336	63	1,4091	1511,383	2022,28	1,366	980,429
337	64	1,4078	1431,678	2030,84	1,291	980,309
338	65	1,4065	1356,174	2039,4	1,221	980,191
339	66	1,4052	1284,651	2047,96	1,155	980,074
340	67	1,4039	1216,898	2056,52	1,092	979,960
341	68	1,4026	1152,718	2065,08	1,033	979,847
342	69	1,4013	1091,921	2073,64	0,977	979,736
343	70	1,4	1034,3302	2082,2	0,924	979,626

* Las propiedades termofísicas del combustible CM-650 han sido obtenidas en función de la temperatura, los modelos que permiten su obtención están recogidos en la tesis doctoral Laurencio (2012).

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

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

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

t [K]	ρ [kg/m ³]	C_p [kJ/kg·K]	$\mu \cdot 10^{-7}$ [N · s/m ²]	$\nu \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	$k \cdot 10^{-3}$ [W/m·K]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	Pr
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

Anexo II: Conductividad térmica

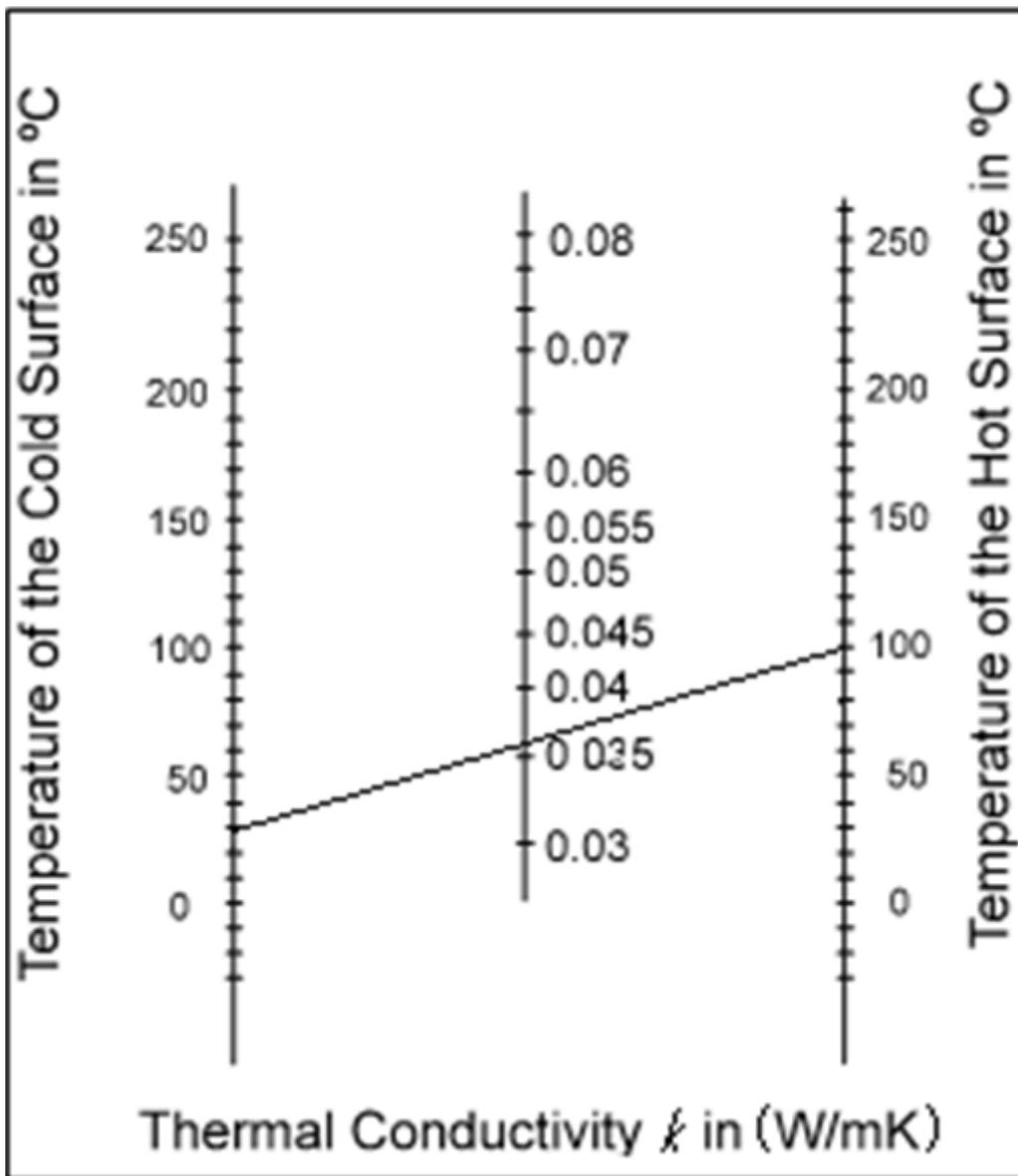


Figura 1. Conductividad térmica del aislamiento