

REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

Tesis presentada en opción al título de  
Ingeniero Mecánico

## **SELECCIÓN DEL ESPESOR ÓPTIMO ECONÓMICO DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN EL OLEODUCTO PUERTO MOA**

**Autor:** Yosbani Columbie Garrido

**Tutores:** Prof. Asist., Ing. Amauris Gilbert Hernández, Ms.C.  
Prof. Aux., Ing. Yoalbys Retirado Mediaceja, Dr. C.

**MOA, 2018**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA .....</b>	<b>4</b>
1.1. Introducción.....	4
1.2. Análisis de los trabajos precedentes.....	4
1.2.1. Trabajos relacionados con la selección de espesor de aislamiento térmico .....	4
1.2.2. Trabajos relacionados con el transporte de petróleos pesados .....	8
1.2.3. Tuberías con trazas de vapor .....	12
1.3. Materiales aislantes .....	13
1.3.1. Funciones básicas del aislamiento térmico.....	13
1.3.2. Normativas de materiales aislantes .....	14
1.4. Aspectos de interés sobre los materiales aislantes.....	15
1.4.1. Clasificación de los materiales aislantes.....	15
1.4.2. Características de los termoaislantes .....	16
1.5. Criterios de selección del espesor de aislante .....	18
1.6. Mecanismos de transferencia de calor empleados en la selección del espesor de aislamiento térmico .....	20
1.7. Clasificación de los hidrocarburos.....	22
1.7.1. Clases de combustibles cubanos.....	23
1.7.2. Efecto de la temperatura.....	25
1.8. Aplicación del transporte de combustibles por tuberías .....	26
1.9. Conclusiones del capítulo .....	27
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
2.1. Introducción.....	28

2.2. Espesores de aislamiento .....	29
2.3. Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento .....	30
2.4. Valor de las pérdidas energéticas .....	36
2.5. Valor actualizado de las pérdidas .....	36
2.6. Incremento del ahorro .....	37
2.7. Incremento de la inversión del aislamiento .....	38
2.8. Espesor óptimo económico .....	38
2.9. Caracterización de la instalación donde se aplicó el procedimiento .....	39
2.10. Conclusiones del capítulo .....	39
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>40</b>
3.1. Introducción.....	40
3.2. Propiedades termofísicas del Crudo mejorado 650 .....	40
3.3. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura del vapor.....	42
3.4. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura del petróleo.....	43
3.5. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura ambiente.....	45
3.6. Estimación del espesor óptimo económico de aislamiento .....	46
3.7. Impacto económico .....	50
3.8. Análisis ambiental .....	50
3.9. Conclusiones del capítulo .....	52
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>53</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>

## **Declaración de Autor**

Yo: Yosbani Columbie Garrido

Autor de este Trabajo de Diploma y los tutores Amauris Gilbert Hernández y Yoalbys Retirado Mediaceja certificamos la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, hacer uso del mismo en la finalidad que estime conveniente.

---

Diplomante: Yosbani Columbie Garrido

---

Tutor: Ms.C. Amauris Gilbert Hernández

---

Tutor: Dr.C. Yoalbys Retirado Mediaceja

## **Síntesis**

En el trabajo se seleccionó el espesor óptimo económico de aislamiento, que garantice un adecuado régimen térmico en el oleoducto ubicado entre las empresas Puerto Moa “Comandante Raúl Díaz Arguelles” y la productora de níquel y cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para lo cual se realizó una revisión bibliográfica, que estuvo dirigida a la determinación de las restricciones de las investigaciones precedentes, relacionadas con la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías, al ser aplicadas a los sistemas de transporte de combustible con trazas de vapor. Se empleó el criterio desarrollado por ISOVER para la selección del espesor óptimo económico aislamiento. Se determinó que en la instalación analizada el espesor adecuado para lana de roca *TECH Wired Mat MT 6.1* es de 0,1 m, evidenciándose que para este espesor existe un aumento de la pérdida total de calor al incrementarse la temperatura del vapor y temperatura del petróleo, comportamiento opuesto al mostrado por la temperatura ambiente.

## **Summary**

In the work, the optimum economic insulation thickness was selected, which guarantees an adequate thermal regime in the pipeline located between the companies Puerto Moa "Commandant Raúl Díaz Arguelles" and the producer of nickel and cobalt "Commandant Ernesto Che Guevara". For which a bibliographic review was carried out, which was directed to the determination of the restrictions of the previous investigations, related to the selection of the thickness of thermal insulation in pipes, when applied to the systems of transport of fuel with traces of steam. The criterion developed by ISOVER was used to select the optimal economic insulation thickness. It was determined that in the analyzed installation the adequate thickness for TECH Wired Mat MT 6.1 rock wool is 0,1 m, evidencing that for this thickness there is an increase of the total heat loss when increasing the temperature of the steam and oil temperature, behavior opposite to that shown by the ambient temperature.

## **INTRODUCCIÓN**

El oleoducto es el medio por excelencia para el transporte de combustible en tierra, constituyendo la vía más rápida y económica de trasegar cantidades considerables de combustible (Gilbert *et al.*, 2014). Sin embargo la utilización y quema del combustible cubano CM-650, formulado a partir de mezclas de petróleo crudo cubano de alta viscosidad, presenta numerosas dificultades para su transporte, requiriéndose de técnicas especiales para la mejora de sus propiedades. Lo anterior conlleva a que se estudien vías a través de las cuales pueda mejorarse la fluidez del combustible pesado. El calentamiento del combustible a una temperatura adecuada para el bombeo, constituye la alternativa más usual y viable aplicada en la actualidad (Laurencio, 2012).

Sin embargo cuando las distancias de transporte son considerables el calentamiento inicial del combustible no es suficiente, producto del calor que se cede a lo largo de la tubería, lo que conlleva a un aumento de la viscosidad. En estos casos resulta de gran ayuda el empleo de un calentamiento complementario de la tubería, con la utilización de trazas de vapor, las cuales deben quedar aisladas térmicamente en conjunto con la línea de combustible. No obstante aunque por esta vía se logra disminuir el gradiente de temperatura del combustible producto del calor aportado por la traza de vapor, solo para el espesor apropiado de aislamiento se logra garantizar un adecuado régimen térmico, capaz de mantener una temperatura estable en el oleoducto, o disminuir considerablemente las diferencias entre las temperaturas de ingreso y salida a la instalación, con respecto a una instalación similar sin este complemento térmico.

Pese a lo planteado, el proceso de selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor ha sido escasamente estudiado, debido fundamentalmente a la complejidad de estos tipos de sistemas. De ahí que la selección se realice generalmente por los procedimientos desarrollados para sistemas radiales, que poseen otra geometría y por ende un análisis diferente. A esto se suma la generalización de los procedimientos existentes al no tratar las cualidades de los líquidos transportados.

### **Situación problemática**

Al existir calentamiento del combustible solo a su ingreso a la instalación y siendo considerable la distancia a recorrer, existe una disminución de la temperatura del mismo

y por su naturaleza un incremento de la viscosidad lo cual desmejora las características del transporte, incorpora mayor carga a las máquinas de flujo aumentando los consumos energéticos, los costos asociados al mantenimiento y adquisición de insumos.

### **Problema de investigación**

El inadecuado régimen térmico en el transporte de petróleo en el oleoducto, que provoca una baja eficiencia en el trasiego.

### **Objeto de estudio**

Oleoducto ubicado entre las empresas Puerto Moa “Comandante Raúl Díaz Arguelles” y la productora de níquel y cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”.

### **Campo de acción**

La selección de espesores de aislamiento térmico en tuberías.

### **Objetivo general**

Seleccionar el espesor óptimo económico de aislamiento, que garantice un adecuado régimen térmico en el oleoducto objeto de estudio.

### **Hipótesis**

La incorporación de las propiedades termofísicas del combustible trasegado, y las particularidades geométricas de los sistemas de transporte con traza de vapor; permitirán la selección del espesor de aislamiento térmico, basado en criterios económicos óptimos.

### **Objetivos específicos**

- Analizar las investigaciones precedentes relacionadas con la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías.
- Establecer un procedimiento que relacione las propiedades termofísicas del combustible, con las particularidades geométricas del oleoducto.
- Calcular los parámetros que posibiliten la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico.



## **Tareas**

- Fundamentación del estado del arte en relación con las teorías y los modelos del espesor de aislamiento térmico.
- Exposición un sistema de conocimiento actualizado sobre los criterios de selección del espesor de material aislante.
- Establecimiento de las ecuaciones para el cálculo de la pérdida total de calor y espesor de aislamiento.
- Caracterización de sistemas de transporte de combustible.
- Valoración de los impactos técnicos, económicos y ambientales asociados a la selección del espesor de aislamiento térmico.

## **1. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA**

### **1.1. Introducción**

La adecuada selección de espesor de aislamiento térmico en instalaciones de transporte de combustible de extensa longitud, resulta una tarea difícil si se requiere mantener un régimen térmico adecuado, situación que se complejiza cuando la configuración de la instalación no posee la forma estándar, como lo constituyen las tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor. Es por ello que se torna indispensable el estudio de las teorías de selección de aislamiento térmico, la transferencia de calor y las características de los combustibles trasegados, así como la indagación de los trabajos precedentes relacionados con el tema, de forma que puedan contribuir en el análisis y la solución del problema investigado.

El objetivo del presente capítulo es: exponer los fundamentos teóricos de la selección de espesor de aislamiento térmico.

### **1.2. Análisis de los trabajos precedentes**

#### **1.2.1. Trabajos relacionados con la selección de espesor de aislamiento térmico**

Desde los años 60 las aplicaciones más comunes de los materiales aislantes se dan en elementos de construcción e instalaciones, en los cuales pueden combinarse capas de diferentes materiales a fin de proporcionar rigidez y resistencia, con un peso y espesor mínimo (Hummel y Fisher, 1966).

Del Pozo (1982), asevera que la traza de vapor constituye una vía adecuada para el recalentamiento de tuberías y muestra varias de las configuraciones que puede asumir la traza en conjunto con la tubería principal, para garantizar el calentamiento de la misma; sin embargo el trabajo se limita a mostrar algunas de las disposiciones posibles y no refleja la vía de obtener el espesor de aislamiento para lograr el régimen térmico deseado.

Monteagudo *et al.* (1998), proponen 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 térmico, 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 las resistencias térmicas que presupone el espesor de la tubería de trasiego, la resistencia desde el fluido al interior del conducto, y la variación de las propiedades termofísicas, al considerarse homogénea la temperatura del combustible trasogado en el interior del conducto.

Campo (2001) plantea que la estimación precisa del espesor de aislamiento en tuberías que transportan fluidos calientes, puede ser determinada con cierta facilidad articulando conocimientos de los métodos numéricos y la transferencia de calor. La demostración de lo planteado se basa en la solución algebraica de un sistema de almacenamiento de energía, resuelto a través de una ecuación algebraica no lineal, permitiendo estimar el espesor del aislamiento para tuberías encargadas del trasiego de fluidos calientes en régimen laminar o turbulento.

Para determinar el espesor óptimo económico de aislamiento en tuberías, ISOVER (2004) propone un procedimiento que se basa fundamentalmente en la actualización de los ahorros energéticos aportados entre dos espesores consecutivos, para un periodo evaluado y la comparación de este parámetro con el incremento del ahorro, estableciendo como espesor del material aislante aquel que muestra un costo total mínimo. Aunque el procedimiento incorpora elementos novedosos desde punto de vista económico se ve limitado por la configuración de los sistemas de transporte utilizados, al no considerar sistema con trazas de vapor. Según ISOVER (2004) el espesor mínimo de aislamiento térmico en tuberías que transportan fluidos calientes, puede ser seleccionado de manera sencilla, conociendo la temperatura del fluido y el diámetro exterior de la tubería. Aunque el trabajo muestra una primera aproximación del espesor de aislamiento, posee la limitación de estar desarrollado para materiales aislantes de conductividad térmica igual a  $0,040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  a  $20^\circ\text{C}$  y asumir espesores constantes para diámetros mayores de  $0,14 \text{ m}$ .

Según el instituto para la diversificación y ahorro de la energía, aquel espesor que minimice el costo total teniendo en cuenta su período de explotación, se corresponde con el espesor óptimo económico. Evidenciándose que a mayor espesor de aislamiento, será mayor costo de inversión y menor flujo de calor intercambiará el elemento,

disminuyendo el costo de energía asociado a su explotación. De forma tal que para obtener el espesor económico se expresen todos los costos en función del metro de superficie de aislamiento (IDAE, 2007).

Massó (2008) propone dos procedimientos para el cálculo del espesor de aislamiento térmico de tuberías, un procedimiento simplificado y otro alternativo, ambos en función de la potencia térmica nominal instalada, basado en el reglamento de instalaciones térmicas en los edificios.

Vega y Batista (2009), presentan un algoritmo para el cálculo térmico de oleoductos que transportan combustibles viscosos, con la utilización de trazas de vapor como medio de calentamiento. El método empleado vincula el transporte de fluidos y el calentamiento de combustible en el interior de tuberías. No obstante, el trabajo está orientado al diseño de este tipo de instalaciones y no realiza un análisis riguroso en la estimación del espesor de aislante térmico.

El aislamiento de las tuberías es un factor crucial durante la fase de diseño, debido a las elevadas pérdidas térmicas de la red y su impacto en la eficiencia global del sistema. Los materiales aislantes se caracterizan por su conductividad térmica, que varía en función de la densidad y la temperatura. El aislamiento necesario en la red debe ser suficiente para garantizar pérdidas inferiores al 15 y 20 %, condición alcanzable según el espesor del material aislante. En relación al tema plantean Tejela y San Martín (2010) que cuanto mayor es la temperatura de transporte de una instalación, mayor aislamiento térmico debe emplearse; sin embargo, al considerar que esto no es viable por razones económicas y de ocupación de espacio, se han producido una serie de materiales que, con un espesor mínimo garanticen estas condiciones.

La existencia de un espesor óptimo de aislamiento para los sistemas radiales, es explicada por la presencia de efectos inversos asociados con un incremento del espesor. Aunque en la conducción la resistencia aumenta con el espesor de aislamiento, la resistencia por convección decrece debido al área de la creciente superficie exterior. Por tanto el espesor óptimo de aislamiento es aquel que minimiza la pérdida de calor maximizando la resistencia térmica total (Bergman *et al.*, 2011). Aunque el trabajo de estos autores realiza un riguroso análisis térmico, ha sido poco

acogido por la comunidad científica, por no responder a criterios específicos en la selección del espesor de aislamiento térmico.

Son de relevante importancia los trabajos realizados por Laurencio y Delgado (2008) y Laurencio (2012). En estos la búsqueda de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650, los conllevó a determinar modelos para la obtención de las propiedades termofísicas, que describen las regularidades de este combustible en las condiciones de operación de las instalaciones de trasiego, se considera como principal limitación de estas investigaciones, restringir el estudio para un único espesor de aislamiento. En relación con estos trabajos Pérez (2013) determina, los parámetros técnicos económicos racionales para el transporte de petróleo por tuberías, considerando entre otros aspectos los espesores del material aislante.

Considerando la baja conductividad térmica de los polímeros, InfoTUB (2013) actualizó el procedimiento para la selección de espesor de aislamiento térmico de redes de tuberías plásticas, siguiendo los criterios indicados en la norma UNE-EN ISO 12241. Aunque los elementos expuestos pueden resultar interesantes, son muy limitadas las aplicaciones para el desarrollo del método.

Para determinar el espesor de aislante necesario que impida la condensación en las tuberías, Armacell (2013) ha desarrollado métodos gráficos y analíticos que permitan mantener esta condición, sin embargo el trabajo ha sido particularizado para aislamiento térmico flexible de espuma elastomérica.

Gilbert *et al.* (2014) desarrollaron un modelo matemático que permite seleccionar el espesor de aislamiento térmico para tuberías de trasiego de petróleo con traza de vapor, el cual incorpora características termofísicas y de flujo del combustible trasegado (CM-650). Utilizando como material aislante manta de lana de roca Spintex 322-G-70S, realizó un análisis comparativo entre una instalación con traza de vapor y otra con las tuberías dispuestas de forma independiente, evidenciándose en la primera un mejoramiento de las condiciones de flujo y una disminución del gradiente de temperatura del combustible.

El espesor óptimo económico de aislamiento térmico es determinado por Gilbert *et al.* (2014), en el cual se propone el modelo para calcular la pérdida total de calor en una instalación con trazas de vapor, lo cual constituye un modesto aporte en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, en instalaciones con este tipo de configuración.

Gilbert (2016) desarrolló un procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor. Para lo cual realizó una revisión bibliográfica, que estuvo dirigida a la determinación de las restricciones de las investigaciones precedentes, relacionadas con la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías, al ser aplicadas a los sistemas de transporte con trazas de vapor, lo cual permitió la obtención del modelo para el cálculo de la pérdida total de calor. El procedimiento desarrollado toma en cuenta criterios económicos en la selección del espesor y fija como el espesor óptimo, aquel que garantiza el costo total mínimo, al establecer un balance entre los costos de las pérdidas energéticas y los costos de inversión.

### **1.2.2. Trabajos relacionados con el transporte de petróleos pesados**

Para explicar el análisis evolutivo acerca del estudio de los fluidos no newtonianos y de forma específica de los petróleos crudos, Laurencio (2012) realizó un riguroso estudio de los factores que influyen, en el comportamiento reológico de estos combustibles y de su composición, aspectos que son seguidamente expuestos:

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 Poiseuille, 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-Venant, Venturi y Pitot entre otros (Ochoa, 2011).

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

conoce como ecuaciones de Navier-Stokes (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, varios 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 Caldiño y Salgado (2004), sin embargo se señala como principal limitación, no tener en cuenta el comportamiento 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 (Vandresen *et al.*, 2009; Trapeznikov, 2011).

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 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.*, 2001).

Harms (1991) a partir del estudio 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 herramienta previene la obstrucción de la tubería por sedimentos utilizando la caracterización a diferentes temperaturas.

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.

Mechetti *et al.* (2000), presentan resultados de estudios del comportamiento reológico de petróleos crudos asfálticos a diferentes temperaturas y bajo la acción del campo eléctrico. Investigaron el comportamiento viscosimétrico de un petróleo crudo argentino de baja viscosidad con 7 % de contenido de asfaltenos; donde encuentran una dilatancia atípica para un crudo de baja viscosidad relativa y también una anomalía termorreológica (mayor viscosidad para una mayor temperatura), resultados análogos a los planteados por. 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; analizando 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 anterior, Balan *et al.* (2008) caracterizan el comportamiento de un petróleo crudo al ser tratado mediante variaciones del campo eléctrico y magnético para diferentes temperaturas. Mediante este estudio demostró la relación de variaciones de la viscosidad para distintas temperaturas e intensidades del campo electromagnético.

Aunque la emulsión no es el método más empleado en el transporte de petróleos, destacan los resultados obtenidos con la Oriemulsión en Venezuela; se encuentran además los trabajos de 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 una décima parte 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, determina que el petróleo mantenía un comportamiento pseudoplástico a diferentes condiciones de temperatura de experimentación y logran 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.

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

Benítez *et al.* (2004) analizan la influencia de aditivos en las propiedades físicas del crudo cubano. Los resultados mostraron que existe influencia notable en el por ciento 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 por ciento 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 emulsiones elaboradas. Se 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 los resultados de un estudio llevado a cabo sobre la estabilidad de las mezclas de combustible. 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 a un petróleo crudo cubano y sus emulsiones; se determinó que tanto el petróleo como la emulsión presentaban comportamiento seudoplástico. Laurencio y Delgado (2008) incluyen la influencia de la temperatura en los modelos antes mencionados, obteniéndose un resultado de mayor aplicabilidad práctica.

### **1.2.3. Tuberías con trazas de vapor**

Los oleoductos con trazas de vapor han sido construidos en aras de garantizar una temperatura y viscosidad estable en el trasiego a distancias considerables (Monteagudo *et al.*, 1998). Al respecto Vega y Batista (2009), describen estos sistemas como una tubería central de combustible, sobre cuya superficie se unen finas tuberías de transporte de vapor. Ambas tuberías quedan aisladas térmicamente del medio exterior mediante un material aislante y en estas condiciones se establecen los procesos de intercambio térmico que garantizan el calentamiento del combustible, hasta la temperatura de operación que garantiza la viscosidad necesaria para la fluidez del combustible.

La traza de vapor constituye el punto central de emisión calórica, donde el calor total entregado por el vapor acompañante será la suma aritmética de la cantidad de calor absorbido por la tubería central de combustible, más la cantidad de calor que se pierde al medio exterior. La cantidad total de calor entregado por la traza de vapor se transmite por convección a todo el perímetro interior de ésta y por conducción a través del contacto directo con el oleoducto. Una vez que el calor alcanza la pared exterior de la traza se descompone en diferentes fracciones de emisiones calóricas, parte del calor se transmite por convección libre al interior de la cavidad termoaislada y de aquí por convección a la superficie exterior de la tubería de combustible y a la superficie interior del aislante térmico (Vega y Batista, 2009).

El calor absorbido por la pared interior del aislante es transmitido por conducción a través de este, para luego transmitirse por convección al medio exterior, una vez

alcanzada la pared exterior del aislamiento. El calor absorbido por convección a través de la pared exterior del ducto y proveniente de la cavidad termoaislada, es transmitido por conducción a través de la superficie metálica de la tubería y por convección al combustible circulante en el interior del ducto. Sin embargo, la mayor cantidad de calor absorbido por la tubería de combustible se realiza por convección, debido al área de transferencia térmica que forma la traza de vapor y el ducto (Vega y Batista, 2009).

### **1.3. Materiales aislantes**

Pardal (2009) planteó que el material aislante por excelencia es aquel formado por un conjunto de microceldillas, conteniendo aire en reposo. A la baja conductividad térmica del aire se le suma la resistencia a la transmisión del calor, que supone pasar de un medio transmisor a otro (aire – sólido). Del Pozo (1982) define los materiales aislantes como 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. Por regla son materiales con baja conductividad térmica, la formación de estas bolsas de aire favorece la obstrucción al paso del calor, ya que el aire presenta una conductividad térmica muy baja y se dispone de él con facilidad (CONAE *et al.*, 2008).

#### **1.3.1. Funciones básicas del aislamiento térmico**

El aislamiento térmico se emplea en la industria desde el propio inicio de la era industrial, aunque el desarrollo se produjo a partir de la segunda década del siglo XX. Señalan Jensen y Løppenthien (2008), que son dos las funciones básicas del aislamiento: la reducción de las ganancias térmicas del ambiente exterior y la limitación de condensación alrededor de la tubería, con el fin de reducir los riesgos de corrosión. De ahí que, en las normas internacionales EN 14114 y EN ISO 15758 se presenten los principios para minimizar acumulación de humedad en los materiales aislantes. Según ISOVER (2004) las razones para la utilización del aislamiento térmico son fundamentalmente:

- Necesidades de proceso, para evitarse transferencias térmicas que obstruyan las operaciones por diferencias de temperaturas no admisibles.

- Seguridad de las personas y bienes, al no existir el aislamiento térmico las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar lesiones y accidentes en las personas. En caso extremo se puede producir efectos de combustión e incendio en materiales inflamables próximos a estas superficies.
- Reducción de las pérdidas energéticas, mostrándose como el mejor método de ahorro de energía conocido, permitiendo la amortización del material aislante instalado en períodos de tiempo muy bajos.
- La reducción de la contaminación ambiental. La mayor parte de la energía que se utiliza en los procesos térmicos procede de la transformación de un combustible por reacción exotérmica del mismo con el oxígeno ambiental.
- Para mantener la temperatura del proceso. En la industria metalúrgica y química algunos procesos son sensibles a los cambios de temperatura y es necesario aislar las tuberías de flujo con el fin de mantener una temperatura estable en toda su extensión (CONUEE *et al.*, 2008).

### **1.3.2. Normativas de materiales aislantes**

El comportamiento de un producto en relación a como reacciona al fuego se refiere tanto a su aplicación final, como a las propiedades del material y el ataque térmico. Así que habrá de ensayarse el comportamiento del producto para reflejar su uso final. Un producto durante su aprovechamiento puede tener diferentes comportamientos y aplicaciones.

Son varias las normativas europeas (tabla 1.1) que especifican los métodos de ensayo de diferentes materiales, para la determinación de la inflamabilidad de los productos, mediante la aplicación de llama pequeña, radiación nula y utilizando muestras en posición vertical (González, 2005). Aunque gran parte de estos materiales son producidos y ensayados en Europa, su aplicación es universal y varios han sido empleados en Cuba en diversos sectores de la industria.

Tabla 1.1. Aislantes térmicos normalizados en Europa.

Material aislante	Norma
Lana mineral (lana de roca)	EN 13162
Poliestireno expandido	EN 13163
Poliestireno extruido	EN 13164
Espuma de poliuretano	EN 13165
Espuma de resina fenólica	EN 13166
Lana de vidrio	EN 13167
Losas de lana de madera	EN 13168
Placas de perlita expandida	EN 13169
Corcho expandido	EN 13170
Fibras de la madera	EN 13171

## 1.4. Aspectos de interés sobre los materiales aislantes

### 1.4.1. Clasificación de los materiales aislantes

El aislamiento térmico en forma de lodo, arcilla, paja, tejidos y trozos de madera, se usó por primera vez en el siglo XVIII sobre las máquinas de vapor, para impedir que los trabajadores sufrieran quemaduras producidas por las superficies calientes. Como resultado disminuyeron las temperaturas del cuarto de calderas y se observó una reducción del consumo de combustible. La mejora en el funcionamiento de la máquina y el ahorro de energía, estimularon la búsqueda de materiales con mejor eficiencia térmica (CONAE *et al.*, 2008).

Como es visible, desde el inicio fueron disimiles los materiales utilizados para realizar la tarea de aislar el calor, sin embargo el desarrollo alcanzado en este área del conocimiento, permite clasificar los materiales aislantes en tres grandes grupos considerando su origen, estructura y temperatura.

- 
- |           |   |
|-----------|---|
| Su origen | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislantes de origen animal o vegetal</li> <li>• Aislantes de origen mineral</li> <li>• Productos de síntesis</li> <li>• Aislantes pulverulentos</li> </ul> |
|-----------|---|

- Aislantes fibrosos
    - de origen animal
  - Espumas
    - sintéticas
    - aglomeradas
- Su estructura
- Su temperatura
- Aislantes refractarios
  - Aislantes semirrefractarios
  - Aislantes ordinarios

---

Fuente: Del Pozo, 1982.

#### 1.4.2. Características de los termoaislantes

Un material aislante se caracteriza por el valor de su conductividad térmica; su poder aislante es tanto más elevado cuanto más pequeña es su conductividad (ISOVER, 2004). La mayoría de los materiales que se emplean como aislantes (tabla 1.2) no son sustancias homogéneas o puras. Algunos materiales tienen conductividad no isótropa debido a su estructura fibrosa. En otros materiales sólo puede considerarse una conductividad térmica aparente, originada por su falta de homogeneidad, bien por su estructura porosa o por la variedad de sustancias integrantes. En cualquiera de estos casos la conductividad depende de la estructura, composición, porosidad y densidad (Tejela y San Martín, 2010).

Tabla 1.2. Materiales empleados como aislantes térmicos.

• Corcho	• Cañas
• Algodón	• Algas
• Arlita	• Paja
• Cáscaras de trigo, escanda	• Hierba
• Lino	• Lana natural de oveja
• Cáñamo	• Vidrio expandido
• Virutas de madera	• Poliestireno expandido
• Celulosa	• Espuma celulósica
• Fibra de madera	• Espuma de polietileno

• Lana de madera	• Film alveolar de polietileno
• Cocos	• Espuma de poliuretano
• Aerogel	• Espuma elastomérica
• Lana de roca	• Lana de vidrio

Independiente de la amplia variedad de materiales aislantes que existen, el uso práctico resulta más restringido, centrándose la atención en un grupo reducido, debido a la superioridad de sus propiedades y comodidad en cuanto a su instalación. En tal sentido CONAE *et al.* (2008) describen las características y propiedades de los principales materiales termoaislantes usados en las instalaciones industriales.

### ***Fibra de vidrio***

Es un termoaislante fabricado a partir del estado de fusión de una mezcla de arenas, con alto contenido de sílice. Según su proceso de manufactura, se presenta en dos formas:

Con aglutinantes orgánicos, presentando estructura propia y preforma. Se fabrica en forma de guata, coquillas, placas rígidas y semirrígidas. Su densidad comercial es comúnmente entre 16 y 96 kg/m<sup>3</sup>, variable según el producto, uso, rigidez y temperatura recomendada. Posee baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta capacidad para recuperar su forma, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se debe proteger contra la intemperie y abuso mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es 727 K (454 °C).

Con aceites minerales que evitan abrasión entre fibras y que dan lugar a mantas. Su densidad comercial usual es 48 kg/m<sup>3</sup>. Presenta baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta resiliencia, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se debe recubrir contra la intemperie y evitar la exposición al trabajo mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 728 K (455 °C).

### ***Lana de roca***

Es un termoaislante hecho a partir del estado de fusión de roca tipo basáltica o semejante, con alto contenido de aluminosilicatos. Según su proceso de manufactura, se presenta en dos formas:

Con aglutinantes orgánicos. Poseen estructura propia y preforma. Dan lugar a mantas, coquillas, placas rígidas y semirrígidas. Presenta baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta resiliencia, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se debe proteger con recubrimiento contra la intemperie y abuso mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 923 K (650 °C) para coquillas, y hasta 1 255 K (982 °C) para placas rígidas y semirrígidas.

Con aceites minerales que evitan abrasión entre fibras y que dan lugar a mantas. Su densidad comercial usual es de 96 a 144 kg/m<sup>3</sup>. Posee baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta resiliencia, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se debe proteger de la intemperie y su temperatura máxima de aplicación es hasta 923 K (650 °C).

### **1.5. Criterios de selección del espesor de aislante**

Definir el espesor de aislante en una determinada instalación puede ser función de varios criterios. En la mayoría de los casos el procedimiento suele ser iterativo, ya que los coeficientes de transferencia de calor dependen en general de la temperatura de las superficies y estas a su vez dependen del flujo de calor transferido que es función del espesor utilizado. En el caso de tuberías, el coeficiente de convección puede depender del diámetro exterior de la tubería y éste a su vez depende del espesor de aislamiento (IDAE, 2007). Los criterios de selección más empleados por el sector industrial y los servicios son los que a continuación se relacionan:

#### ***Para intercambiar un flujo de calor dado***

El caso más sencillo en la estimación del espesor de aislante térmico consiste en asignar un valor a la densidad de flujo de calor, lo cual comúnmente suele ser fijado por



experiencia. Aunque en la práctica habitual es bastante empleado, sus resultados pueden ser muy alejados de valores óptimos de diseño. En el caso de tuberías el procedimiento es necesariamente iterativo, ya que el radio exterior aparece en los términos resistencia de su capa y resistencia convectiva radiactiva exterior.

#### ***Para perder un porcentaje de calor con respecto al elemento no aislado***

Es quizás uno de los criterios más acertados, no obstante hay que destacar que en tuberías pequeñas el cambio de los coeficientes de convección por el exterior es crítico. Por lo tanto este criterio puede parecer acertado 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 limitar una resistencia térmica o un coeficiente global de transmisión de calor***

Las ecuaciones utilizadas para esta aplicación están en función de la geometría analizada, de las cuales se deben despejar el espesor de aislamiento. Señalar que en el caso de tuberías el procedimiento es necesariamente iterativo, ya que el radio exterior aparece en ambos términos de la ecuación (ISOVER, 2004).

#### ***Para mantener una temperatura superficial exterior***

Se trata de asignar una temperatura máxima de protección, de forma que los contactos involuntarios no produzcan lesiones. En la práctica se trata de depósitos o tuberías (geometría cilíndrica) que transportan fluidos calientes. La estimación del espesor de aislamiento necesario, se realiza igualando el flujo de calor total transferido, al correspondiente entre la superficie que se quiere proteger y el ambiente exterior (ISOVER, 2004).

#### ***Para evitar condensaciones superficiales***

Debe establecerse 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 en tuberías, se presenta si

únicamente por ellas circula un fluido a temperatura inferior a la de rocío del aire que la circunda exteriormente. 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 (ISOVER, 2004; Armacell, 2013).

### ***En función del espesor económico***

En este supuesto se trata de determinar el espesor que minimice el costo total de la instalación teniendo en cuenta su periodo de explotación. A mayor espesor de aislamiento más costo de inversión se tendrá y menor flujo de calor intercambiará el elemento (ISOVER, 2004; CONAE *et al.*, 2008; CONUEE *et al.*, 2008), por lo que será menor el costo de energía asociado a su explotación. Teniendo en cuenta ambos costos deberá existir un espesor que minimice el costo total.

### ***En función de un tiempo de congelación para tuberías***

Para algunas aplicaciones en tuberías, es necesario conocer el tiempo que tardará en congelarse el fluido de su interior sin movimiento, partiendo de una determinada temperatura inicial, o planteado de forma alternativa, qué espesor de aislamiento se debe utilizar para que se congele un determinado porcentaje del fluido en un determinado tiempo y con condiciones dadas de temperatura exterior (López, 2010).

### ***En función de presentar una diferencia de temperaturas a lo largo de una tubería***

El calor intercambiado a lo largo de una tubería será utilizado por el fluido interior en modificar su temperatura. Si se limita la máxima diferencia de temperatura del fluido se estará limitando el máximo flujo de calor intercambiado y con ello el espesor de aislamiento adecuado para lograr esta condición.

## **1.6. Mecanismos de transferencia de calor empleados en la selección del espesor de aislamiento térmico**

La evaluación de los sistemas de intercambio de calor y conversión de la energía, requieren del conocimiento y aplicación de tres mecanismos diferentes, conducción, convección y radiación, así como de sus interacciones (Góngora, 2013). La selección

del espesor de aislamiento térmico no queda exenta de esto, e independientemente del criterio utilizado, emplea las teorías y leyes de la transferencia de calor.

### **Conducción**

La transmisión del calor por conducción, ocurre por contacto directo entre las partículas de dos cuerpos, o entre partes de un mismo cuerpo siempre que se encuentren a distintas temperaturas, donde se considera la materia como un medio continuo (Martín-Domingo, 2011). Cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, ocurre transferencia de energía desde la región a alta temperatura hacia la región de baja temperatura. Se afirma que la energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura. La ecuación se conoce como Ley de Fourier de la conducción de calor y se emplea cuando el flujo de calor se transmite en una sola dirección.

### **Convección**

El término convección se utiliza para describir la transferencia de energía entre una superficie y un fluido. Aunque el mecanismo de difusión contribuye a esta transferencia, generalmente la aportación dominante es la del movimiento global o total de las partículas del fluido. La convección aparece únicamente en fluidos, que es donde puede producirse este movimiento de materia (Martín-Domingo, 2011). Para un fluido de velocidad  $V$  y temperatura  $T_{\infty}$ , que fluye sobre una superficie de forma arbitraria y de área  $A$ , la superficie tiene una temperatura uniforme  $T_s$ ; si  $T_s \neq T_{\infty}$  entonces ocurrirá la transferencia de calor por convección. En estas condiciones se produce la convección, caracterizada por un flujo térmico transmitido, dado por la relación empírica conocida como Ley de Enfriamiento de Newton.

### **Radiación**

La radiación térmica es la propagación de ondas electromagnéticas, en determinadas longitudes de ondas, emitidas por un cuerpo como resultado de su temperatura. La transferencia de calor por radiación no requiere de presencia de la materia, ya que el calor puede ser transmitido a través del vacío absoluto a diferencia de la transferencia de calor por conducción y convección.

## 1.7. Clasificación de los hidrocarburos

La génesis del petróleo, se ubica en el depósito y descomposición de organismos de origen vegetal y animal, que hace millones de años quedaron atrapados en rocas sedimentarias en ambientes marinos o próximos al mar y que fueron sometidos a enormes presiones y elevadas temperaturas. La palabra petróleo, proveniente del latín “petroleum” y significa aceite de piedra (Laurencio, 2007).

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

El petróleo se localiza en el subsuelo, impregnado en formaciones de tipo arenoso y calcáreo. Asume los tres estados físicos de la materia (sólido, líquido y gaseoso) según su composición, temperatura y presión a la que se encuentra. Los yacimientos de petróleos crudos están constituidos por hidrocarburos líquidos, bajo las condiciones de presión y temperatura del depósito, su viscosidad es medida a la temperatura original del yacimiento y a la presión atmosférica, como un líquido estabilizado libre de gas.

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

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

### 1- Petróleo de base parafínicas.

- Predominan los hidrocarburos saturados o parafínicos.
- Son muy fluidos de colores claros y bajo peso específico (aproximadamente 0,85 kg/l).

- Por destilación producen abundante parafina y poco asfalto.
- Proporcionan mayores porcentajes de nafta y aceite lubricante.

## 2- Petróleo de base asfáltica o nafténica.

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

## 3- Petróleo de base mixta.

- De composición por bases intermedias, formados por toda clase de hidrocarburos: saturados, no saturados (etilénicos y acetilénicos) y cíclicos (ciclánicos o nafténicos y bencénicos o aromáticos).
- La mayoría de los yacimientos mundiales son de este tipo.

En la práctica es común hablar de clases de petróleos crudos de acuerdo al peso específico, expresado en una escala normalizada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute). La clasificación de los petróleos crudos se muestra en términos de su densidad, aunque hay que enfatizar que la producción de diversos yacimientos productores está asociada a un solo tipo (Ávila, 1995).

Para asegurar un mejor valor económico de los hidrocarburos en propósitos comerciales, los combustibles crudos vendidos nacional e internacionalmente son en general mezclas de petróleos de diferentes densidades.

### 1.7.1. Clases de combustibles cubanos

A los hidrocarburos se les define como compuestos químicos de carbón e hidrógeno; elementos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros forman parte

de estos y su clasificación suele darse en función de los compuestos característicos. 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 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).

### **1.7.2. Efecto de la temperatura**

En principio, el comportamiento del fluido siempre y cuando no exista ninguna reacción o proceso físico, pudiera seguir un comportamiento de acuerdo con la ley de Arrhenius. En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura (Chenlo *et al.*, 2010; Colby, 2010). La disminución de la viscosidad se debe a dos efectos principales (Laurencio y Delgado 2008; Trapeznikov, 2011): disminución de la viscosidad del medio dispersante y debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

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 ha sido estudiado por varios autores (Vandresen *et al.*, 2009; Trapeznikov, 2011).

De acuerdo a los análisis hechos, 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 (Laurencio y Delgado, 2008). Sin embargo la principal

dificultad está dada a la hora de mantener esta temperatura a lo largo de la tubería, función realizada por el aislamiento térmico.

### **1.8. Aplicación del transporte de combustibles por tuberías**

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

Los oleoductos principales son tuberías de acero cuyo diámetro puede medir hasta más de 0,8 m y se extienden a través de grandes distancias, desde los yacimientos hasta las refinerías o los puertos de embarque. Están generalmente enterrados y protegidos contra la corrosión mediante revestimientos especiales. La construcción de un oleoducto que tiene que cruzar montañas, ríos y desiertos, constituye una gran tarea de ingeniería. El sistema de transporte de hidrocarburos por tuberías resulta el más eficiente y económico cuando se han tenido en cuenta los parámetros racionales de operación en diseño.

En relación con lo citado Gilbert (2014) brinda la siguiente clasificación de oleoductos:

#### 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 una traza de vapor
  - ✓ Con dos trazas de vapor
  - ✓ Con tres trazas de vapor
  - ✓ Con traza interior
- Sin aislamiento térmico



### **1.9. Conclusiones del capítulo**

- Resultan limitadas las investigaciones consultadas, que brinden las vías para seleccionar el espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor.
- Quedó establecido el marco teórico relacionado con la selección de espesor de aislamiento térmico, aplicable a los sistemas de transporte de combustible por tuberías con trazas de vapor.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

La determinación de un espesor de aislamiento térmico obedece en algunos casos a condiciones exclusivamente técnicas; pero, las inversiones en aislamiento poseen un carácter económico. Por ello es necesario introducir criterios económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor (figura 2.1), ya que el costo total será mínimo precisamente para el espesor óptimo económico (ISOVER, 2004; IDAE, 2007; CONUEE, 2008; CENER, 2012).

El objetivo del presente capítulo es: establecer el procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, aplicable a oleoductos con trazas de vapor.

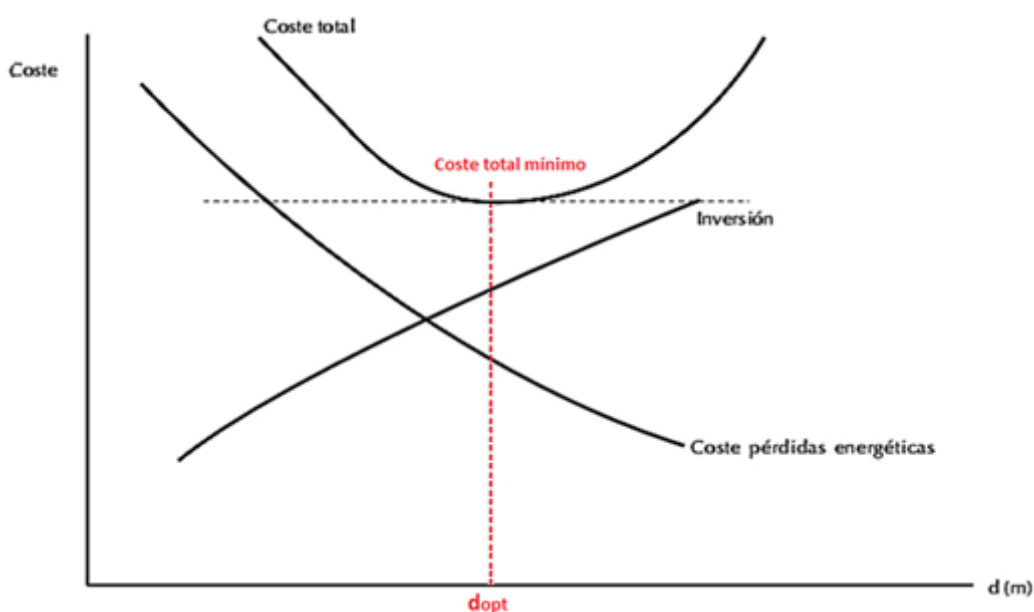


Figura 2.1. Método de selección del espesor óptimo económico de aislamiento.

Fuente: ISOVER, 2004.

La existencia de un espesor óptimo de aislamiento para los sistemas radiales (tuberías sin trazas), es explicada por la presencia de efectos inversos asociados a un incremento del espesor. Por tanto el espesor óptimo de aislamiento es aquel que minimiza la pérdida de calor, maximizando la resistencia térmica total

(Bergman *et al.*, 2011). Estos autores recomiendan emplear la expresión 2.1, para calcular la pérdida de calor que se produce desde el interior al exterior de una tubería.

$$q_r = \frac{t_{\infty 1} - t_{\infty 2}}{R_T} \quad (2.1)$$

Donde:

$q_r$ : Calor transferido en la tubería; [W/m].

$t_{\infty 1}$ : Temperatura del fluido caliente; [K].

$t_{\infty 2}$ : Temperatura del fluido frío; [K].

$R_T$ : Resistencia térmica total; [K/W].

Aunque los cálculos realizados por la ecuación 2.1 poseen validez para los sistemas radiales, presentan errores de estimación al ser aplicados a instalaciones con trazas de vapor; debido fundamentalmente, a las características geométricas de estos tipos de sistemas, lo cual no es considerado en el modelo.

Monteagudo *et al.* (1998), proponen una metodología que permite determinar el espesor del aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor, cuya finalidad es mantener un nivel estable de temperatura; sin embargo, no toma en consideración la marcada influencia del costo del aislamiento, en la selección de su espesor.

Según Gilbert (2015) el proceso de selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor ha sido escasamente estudiado, debido fundamentalmente a la complejidad de estos tipos de sistemas. De ahí que la selección se realice generalmente por los procedimientos desarrollados para sistemas radiales, que poseen otra geometría y por ende un análisis diferente.

## **2.2. Espesores de aislamiento**

De acuerdo con las expresiones conocidas, ISOVER (2004) plantea que las pérdidas de energía disminuyen con el aumento del espesor de aislamiento, lo cual coincide con lo expresado por diferentes autores (Huang y Zhang, 2014; Lulic *et al.*, 2014). De ahí que se proceda a determinar para cada inversión en aislamiento, el valor actualizado neto

de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión.

### 2.3. Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento

Según Monteagudo *et al.* (1998) la pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior y la cantidad de calor disipada por la parte restante de la superficie del aislamiento, se pueden determinar por las expresiones 2.2 y 2.20, respectivamente.

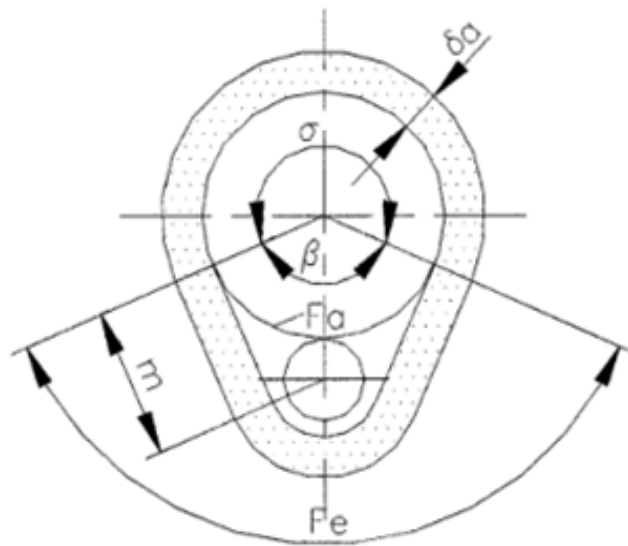


Figura 2.2. Tuberías de vapor acompañante con ángulo selectivo de calentamiento.

Fuente: Monteagudo *et al.*, 1998.

Sin embargo, las consideraciones realizadas por el mismo excluye, la resistencia térmica por convección desde el fluido a la pared interior de la tubería principal (expresión 2.6) y la resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería (expresión 2.7), lo que limita la precisión de los modelos.

$$q^P = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{R_p} \quad (2.2)$$

Siendo:

$$\theta = 360 - \beta \quad (2.3)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{2r_2 - 2r_A - 0,02}{2r_2 + 2r_A} \right) \quad (2.4)$$

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (2.5)$$

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

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

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

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

Donde:

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

$\theta$ : Ángulo formado por la parte de la tubería principal sobre la cual se dispone el aislamiento; [grados sexagesimales].

$t_p$ : Temperatura a la cual se transporta el petróleo en la tubería principal; [K].

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

$R_p$ : Resistencia térmica desde el combustible hasta el aire ambiente por unidad de longitud; [m·K/W].

$\beta$ : Ángulo de incidencia del calor de la tubería principal desde el aire en la cavidad termoaislada; [grados sexagesimales].

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

$r_A$ : Radio exterior de la traza de vapor; [m].

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

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

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

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

$h_1$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal; [W/m<sup>2</sup>·K].

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

$k_p$ : Conductividad térmica del material de la tubería principal; [W/m·K].

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

$k_A$ : Conductividad térmica del material aislante; [W/m·K].

$h_2$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente; [W/m<sup>2</sup>·K].

El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) se determina por la expresión 2.10 (Bergman *et al.*, 2011), para ello se calcula el número de Nusselt ( $Nu$ ).

$$h = Nu \cdot \frac{k}{2r} \quad (2.10)$$

Donde:

$Nu$ : Número de Nusselt; [adimensional].

$k$ : Conductividad térmica del fluido; [W/m·K].

$r$ : Radio de la tubería de trasiego; [m].

Para calcular el número de Nusselt para el crudo mejorado 650 Laurencio (2012) recomienda la expresión 2.11, la cual recoge características termofísicas y de flujo del combustible, la misma fue obtenida a partir de las recomendaciones realizadas por Bergman *et al.*, (2011). Las propiedades termofísicas del combustible se determinan a la temperatura de operación.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \quad (2.11)$$

Siendo:

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

Donde:

$Re$ : Número de Reynolds; [adimensional].

$Pr$ : Número de Prandtl; [adimensional].

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

$D_i$ : Diámetro interior de la tubería de combustible; [m].

$\rho$ : Densidad del fluido; [kg/m<sup>3</sup>].

$\mu$ : Viscosidad aparente; [Pa·s].

Mediante la ecuación 2.13, se determina la viscosidad aparente del combustible cubano CM-650 durante su transporte por tuberías; relacionado con la correcta predicción de la viscosidad al ser un fluido no newtoniano. Su aplicación puede incidir en la correcta descripción del consumo energético de las instalaciones, al conocerse el comportamiento del fluido ante variaciones de la temperatura, la velocidad y el diámetro de la tubería (Laurencio y Delgado, 2008).

$$\mu = \frac{59,86}{e^{0,056 \cdot (t_p - 273)}} \cdot \left( \frac{8,16 \cdot v}{D} \right)^{-0,075} \quad (2.13)$$

Según Laurencio (2012) la densidad del crudo mejorado 650 manifiesta un comportamiento decreciente con tendencia logarítmica al incrementar la temperatura, y dicho comportamiento puede ser evaluado mediante la expresión 2.14:

$$\rho = -7,62 \cdot \ln(t_p - 273) + 1012 \quad (2.14)$$

Sustituyendo 11 en 10 se obtiene el coeficiente de convección para el crudo mejorado 650, resultando la expresión 15:

$$h_1 = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \cdot \frac{k_c}{2r_1} \quad (2.15)$$

Donde:

$k_c$ : Conductividad térmica del petróleo; [W/m·K].

Según Laurencio (2012) la conductividad térmica se puede predecir mediante la ecuación 2.16 y su tendencia decreciente al incrementarse la temperatura se le atribuye a la reestructuración de las partículas dispersas en el combustible, efecto relacionado con la variación del comportamiento reológico y la densidad.

$$k_c = [-0,13 \cdot (t_p - 273) + 149,1] \cdot 10^{-3} \quad (2.16)$$

La expresión 2.17 constituye la ecuación para el cálculo del número de Prandtl particularizada para el combustible cubano CM-650.

$$Pr = \frac{8,56 \cdot (t_p - 273) + 1483}{[-0,13 \cdot (t_p - 273) + 149,1] \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{59,86}{e^{0,056 \cdot (t_p - 273)}} \cdot \left( \frac{8,16 \cdot v}{D} \right)^{-0,075} \quad (2.17)$$

Para el aire, el número de Nusselt se considera en función del número de Reynolds, según la expresión 2.18 reportada por Laurencio (2012).

$$Nu = 0,245 \cdot Re^{0.6} \quad (2.18)$$

El coeficiente de convección para el aire se obtiene al sustituir la expresión 2.18 en la 2.10 según las recomendaciones propuestas por Bergman *et al.* (2011).

$$h_2 = 0,245 \cdot Re^{0.6} \cdot \frac{k}{D} \quad (2.19)$$

Donde:

$k$ : Conductividad térmica del aire; [W/m·K].

$D$ : Diámetro exterior de la instalación; [m].

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

Siendo:

$$F_E = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m \quad (2.21)$$

$$m = \sqrt{(2r_2 - 0,01) \cdot (2r_A + 0,01)} \quad (2.22)$$

$$R_E = \frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2} \quad (2.23)$$



Donde:

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

$F_E$ : Área superficial del aislamiento que no incluye la porción que se dispone sobre la tubería principal, por unidad de longitud; [m<sup>2</sup>/m].

$R_E$ : Resistencia térmica desde el aire en la cavidad termoaislada al exterior; [m<sup>2</sup>·K/W].

$t_c$ : Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada; [K].

$m$ : Distancia entre los centros de la traza y la tubería principal; [m].

$\delta$ : Espesor de aislamiento térmico; [m].

$h_5$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el aire en la cavidad a la superficie interior del aislamiento; [W/m<sup>2</sup>·K].

Al respecto, Gilbert (2014) plantea que en una instalación con traza de vapor (figura 2.3), la pérdida total de calor ( $q^T$ ) está fraccionada entre las pérdidas a través de la sección aislada de la tubería principal ( $q^P$ ) y la cavidad termoaislada ( $q^E$ ).

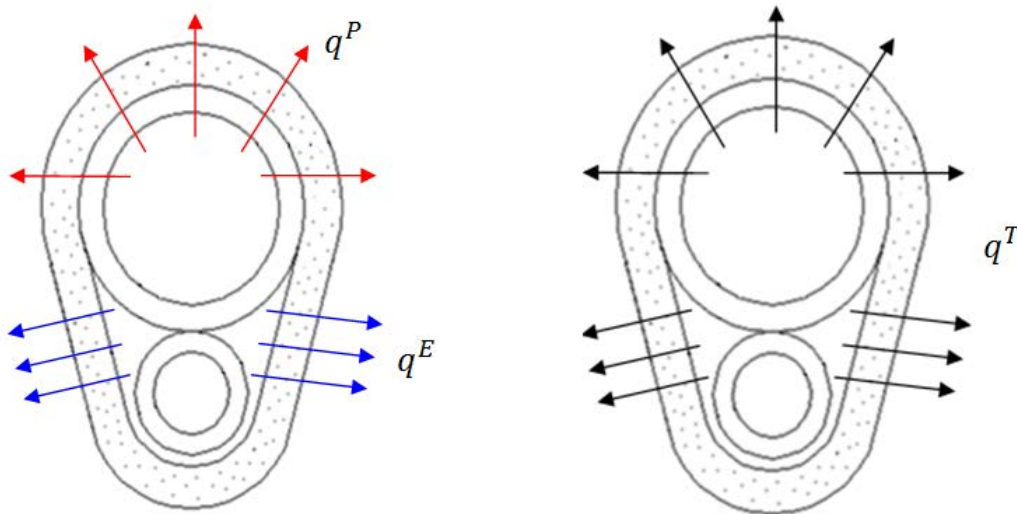


Figura 2.3. Pérdidas de calor en una instalación con traza de vapor.

De ahí que, al introducir un coeficiente para considerar las pérdidas por apoyo igual a 1,25 (Monteagudo *et al.*, 1998.), se infiere que es posible emplear un modelo único que integre las expresiones anteriores y permita determinar la pérdida total de calor en una instalación con trazas de vapor (expresión 2.24), lo cual constituye un modesto aporte

en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, en instalaciones con este tipo de configuración.

$$q^T = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{\left( \frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \right)} + 1,25 \cdot \left[ \frac{\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m}{\frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2}} \right] \cdot (t_c - t_o) \quad (2.24)$$

Donde:

$q^T$ : Pérdida total de calor por unidad de longitud; [W/m].

## 2.4. Valor de las pérdidas energéticas

Si se consideran dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas entre ellos tendrá un valor económico que puede ser considerable (ISOVER, 2004). Para determinar dicha diferencia es necesario calcular el valor de las pérdidas para cada uno de los espesores de aislamiento evaluados, lo cual es posible auxiliándose de la expresión 2.25:

$$V = q^T \cdot E \cdot Z \cdot 10^{-3} \quad (2.25)$$

Donde:

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

$E$ : Costo de la energía; [CUP/kW·h].

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

## 2.5. Valor actualizado de las pérdidas

Para cada inversión en aislamiento, se determina el valor actualizado neto de los ahorros energéticos aportados en el periodo analizado (ecuación 2.26) y se comparan con los incrementos que supone la inversión (ISOVER, 2004).

$$V_A = V \cdot C_{VAN} \quad (2.26)$$

Siendo:

$$C_{VAN} = \frac{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \cdot \left[ \left( \frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \right)^n - 1 \right]}{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} - 1} \quad (2.27)$$

$$r = c - d \quad (2.28)$$

Donde:

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

$C_{VAN}$ : Coeficiente de actualización; [adimensional].

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

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

$n$ : Número de años para los que se efectúa el estudio.

$c$ : Interés anual del dinero deducidos impuestos; [%].

$d$ : Tasa de inflación anual prevista; [%].

## 2.6. Incremento del ahorro

El conocido comportamiento que genera una disminución de las pérdidas energéticas al aumentar el espesor del material aislante (De Angelis y Serra, 2014), favorece a que se produzca un incremento del ahorro energético (IDAE, 2007), lo que se traduce en una disminución de los gastos por concepto de pérdidas al exterior, este incremento del ahorro puede estimarse mediante la expresión 2.29:

$$A = V_{A(\delta)} + V_{A(\delta+1)} \quad (2.29)$$

Donde:

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

$V_{A(\delta)}$ : Valor actualizado de las pérdidas correspondiente al aislamiento de menor espesor; [CUP/m].

$V_{A(\delta+1)}$ : Valor actualizado de las pérdidas correspondiente al aislamiento de mayor espesor; [CUP/m].

## 2.7. Incremento de la inversión del aislamiento

El aumento del espesor de aislamiento térmico, genera incremento de la inversión para su compra e instalación, aunque esto no posee leyes determinadas de crecimiento; se puede emplear la expresión 2.30 para determinar el incremento de la inversión en espesores consecutivos.

$$I_A = I_{(\delta+1)} - I_{(\delta)} \quad (2.30)$$

Donde:

$I_A$ : Incremento de la inversión del aislamiento entre dos espesores consecutivos; [CUC/m].

$I_{(\delta+1)}$ : Inversión del aislamiento de mayor espesor; [CUC/m].

$I_{(\delta)}$  : Inversión del aislamiento de menor espesor; [CUC/m].

---

Para:	0,04 m de espesor	11,05 CUC/m
	0,05 m de espesor	13,65 CUC/m
	0,06 m de espesor	15,35 CUC/m
	0,07 m de espesor	17,55 CUC/m
	0,08 m de espesor	19,70 CUC/m
	0,10 m de espesor	23,05 CUC/m
	0,15 m de espesor	25,45 CUC/m

---

Fuente: ISOVER, 2015.

## 2.8. Espesor óptimo económico

El espesor óptimo económico se corresponde con aquel que tiende a cero, al establecer la diferencia entre el incremento del ahorro ( $A$ ) y el incremento de la inversión ( $I_A$ ), condición que debe ser comprobada según la expresión 2.31:

$$A - I_A \approx 0 \quad (2.31)$$

Este modo de selección permite equilibrar ambos costos, empleando el aislamiento cuyo espesor minimice el costo total ( $Ct$ ), lo cual puede ser comprobado mediante la ecuación 2.32:

$$Ct = V_A + I \quad (2.32)$$

## 2.9. Caracterización de la instalación donde se aplicó el procedimiento

La instalación analizada se utiliza para el transporte del Crudo Mejorado 650 (CM-650), hacia la termoeléctrica de la empresa productora de níquel Comandante Ernesto Che Guevara, de esta manera se garantiza el suministro de combustible para su quema y permite el trabajo continuo tres unidades generadoras. Con la energía producida se abastece a la propia empresa y se entrega al sistema electroenergético nacional. Esta empresa del oriente cubano, en conjunto con la empresa de capital mixto Moa Nickel S.A constituyen la base de las industrias metalúrgicas del país, constituyendo el níquel uno de los principales renglones económicos de la economía nacional.

Tabla 2.1. Principales características de la instalación.

Parámetro	Valor	UM
Diámetro interior de la tubería principal	0,250	m
Espesor de la tubería principal	0,014	m
Diámetro interior de la traza de vapor	0,150	m
Espesor de la traza de vapor	0,011	m
Longitud total de la instalación	5 100 m	m
Conductividad térmica de las tuberías	60,5	W/m·K
Flujo de combustible trasegado	0,05	m <sup>3</sup> /s
Tiempo de funcionamiento promedio	2920	h/año

## 2.10. Conclusiones del capítulo

- Se estableció el procedimiento que posibilita la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, aplicable a oleoductos con trazas de vapor.
- Quedo caracterizada la instalación objeto de estudio ubicada entre las empresas Puerto Moa y Comandante Ernesto Che Guevara.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 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, estas condiciones solo se pueden garantizar para un adecuado régimen térmico.

Se define como objetivo del capítulo: implementar el procedimiento a la instalación de bombeo de combustible ubicada entre las empresas Puerto Moa y Comandante Ernesto Che Guevara.

#### 3.2. Propiedades termofísicas del Crudo mejorado 650

En la selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor, se consideraron las propiedades termofísicas del carburante trasegado. En la tabla 3.1 se relacionan los valores obtenidos de viscosidad dinámica ( $\mu$ ), densidad ( $\rho$ ), conductividad térmica ( $kc$ ), Prandtl ( $Pr$ ) y capacidad calorífica ( $C_p$ ) del Crudo Mejorado 650, calculadas mediante las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.16 y 2.17 del capítulo 2 respectivamente. Las referidas ecuaciones han sido validadas y utilizadas con éxito en múltiples investigaciones precedentes relacionadas con el transporte eficiente de este tipo de combustible (Laurencio y Delgado, 2008; Laurencio, 2012 y Pérez, 2013).

Tabla 3.1. Propiedades termofísicas del Crudo Mejorado 650.

$t_p$ K (°C)	$kc$ W/m·K	$Pr$	$\mu$ Pa·s	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
313 (40)	1,439	5253,062	4,933	983,890739
314 (41)	1,437	4976,166	4,665	983,702581
315 (42)	1,436	4713,860	4,412	983,518958
316 (43)	1,435	4465,374	4,172	983,339655

Tabla 3.1. Propiedades termofísicas del Crudo Mejorado 650 (continuación).

317 (44)	1,433	4229,983	3,945	983,164475
318 (45)	1,432	4006,995	3,731	982,993232
319 (46)	1,431	3795,757	3,529	982,825753
320 (47)	1,429	3595,651	3,337	982,661875
321 (48)	1,428	3406,090	3,156	982,501448
322 (49)	1,427	3226,519	2,984	982,344329
323 (50)	1,426	3056,412	2,822	982,190385
324 (51)	1,424	2895,269	2,669	982,039489
325 (52)	1,423	2742,619	2,524	981,891523
326 (53)	1,422	2598,014	2,387	981,746376
327 (54)	1,420	2461,031	2,257	981,603942
328 (55)	1,419	2331,267	2,135	981,464121
329 (56)	1,418	2208,344	2,019	981,32682
330 (57)	1,416	2091,899	1,909	981,191949
331 (58)	1,415	1981,592	1,805	981,059424
332 (59)	1,414	1877,099	1,707	980,929165
333 (60)	1,413	1778,115	1,615	980,801094
334 (61)	1,411	1684,348	1,527	980,675141
335 (62)	1,410	1595,525	1,444	980,551236
336 (63)	1,409	1511,383	1,366	980,429313
337 (64)	1,407	1431,678	1,291	980,309311
338 (65)	1,406	1356,174	1,221	980,191169
339 (66)	1,405	1284,651	1,155	980,074831
340 (67)	1,403	1216,898	1,092	979,960242
341 (68)	1,402	1152,718	1,033	979,847351
342 (69)	1,401	1091,921	0,977	979,736108
343 (70)	1,400	1034,330	0,924	979,626466

### 3.3. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura del vapor

Los valores de pérdida total de calor obtenidos a diferentes temperaturas del vapor se calcularon empleando la expresión 2.24.

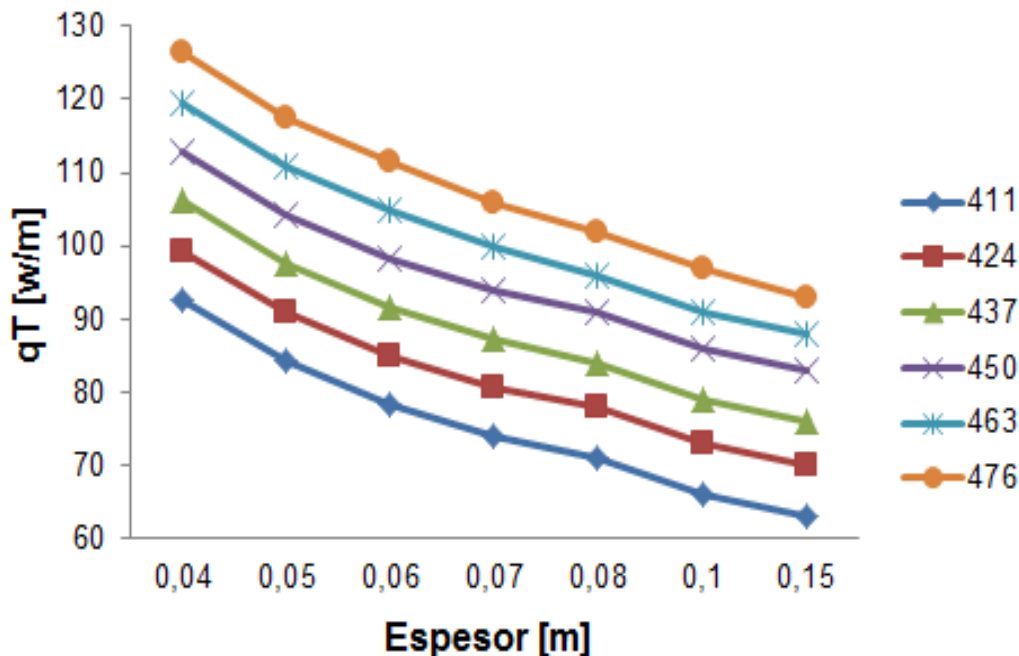


Figura 3.1. Comportamiento de la pérdida total de calor en función de la temperatura del vapor.

Al graficar los resultados (figura 3.1) se observó un comportamiento análogo para todos los valores de temperatura del vapor y espesores de aislamiento, reflejando un ligero aumento de las pérdidas energéticas al incrementar la temperatura del vapor para un mismo espesor. Comportamiento inverso al mostrado por las pérdidas al aumentar el espesor de aislamiento para un valor específico de temperatura, lo cual está asociado fundamentalmente al acrecentamiento de la resistencia térmica por conducción al incrementarse el espesor del material aislante (Góngora *et al.* 2009; Martín-Domingo, 2011). Este resultado permite corroborar la influencia de la temperatura del vapor, en las pérdidas energéticas para diferentes espesores, semejante a lo reportado por Cruz y Toro (2011), y Limone (2012).



En el caso del espesor óptimo económico de aislamiento (0,1 m) se observa que existe una dependencia con tendencia lineal creciente (figura 3.2) de las pérdidas de calor respecto a la temperatura del vapor, arrojando como valor máximo 97 W/m para los 476 K de temperatura del vapor.

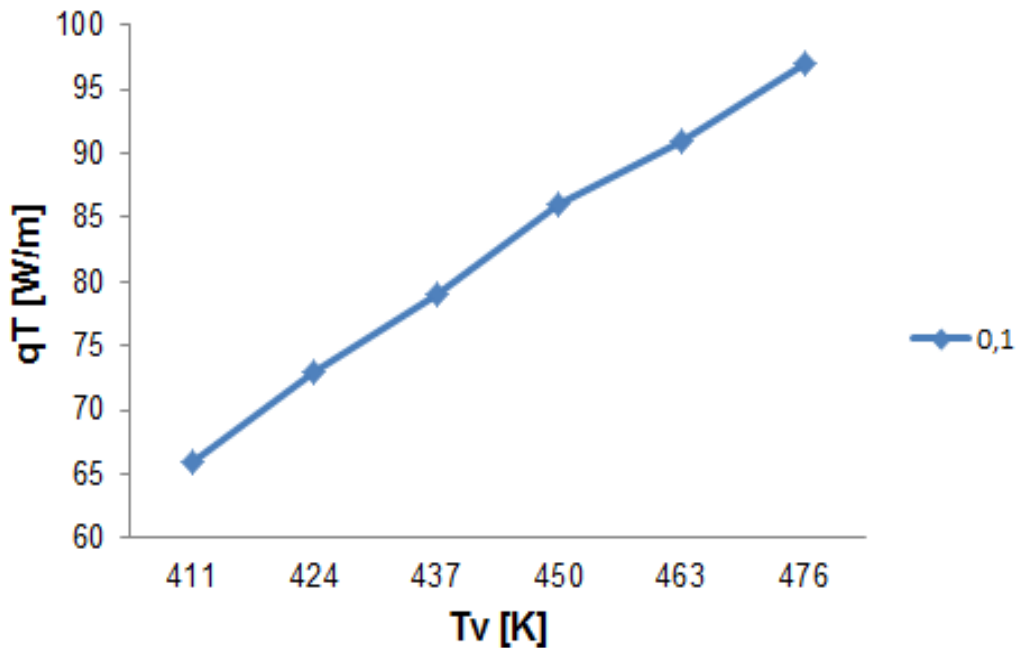


Figura 3.2. Comportamiento de la pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento en función de la temperatura del vapor.

### 3.4. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura del petróleo

Similar análisis al apartado anterior se realizó para determinar la influencia de la temperatura del petróleo en las pérdidas energéticas. En la figura 3.3 se aprecia el aumento que experimenta la pérdida total de calor al incrementarse la temperatura de bombeo del combustible, resultando evidente que los rangos de variación de las pérdidas energéticas para los valores de temperatura resultan mayor, para las temperaturas más elevadas. No obstante e independientemente de la temperatura evaluada, se obtienen los menores valores de pérdida total de calor para los mayores espesores del material aislante.

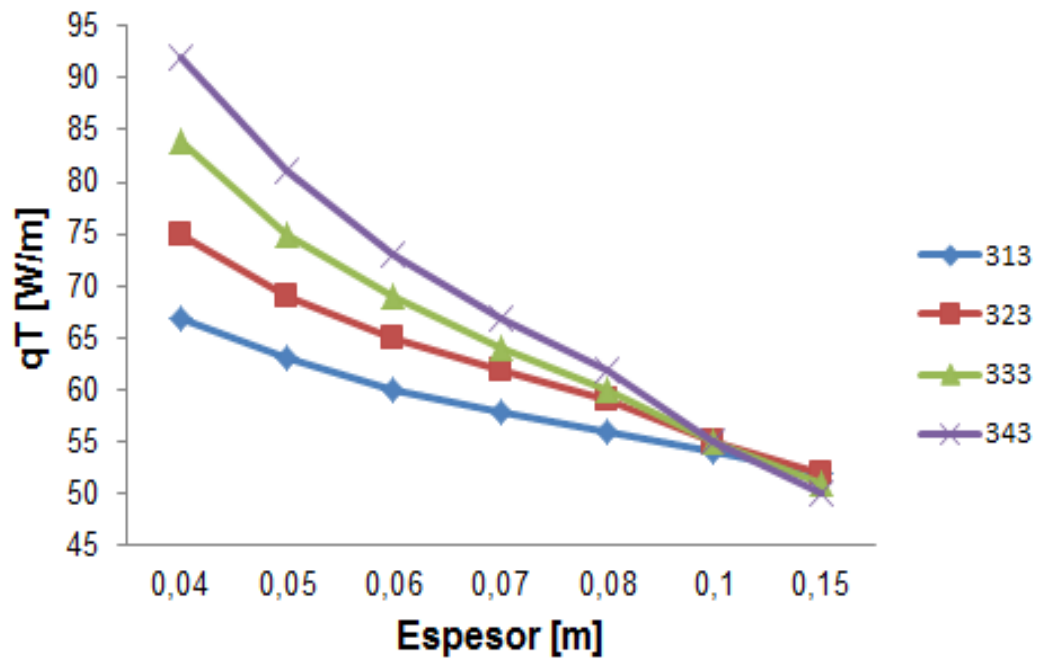


Figura 3.3. Comportamiento de la pérdida total de calor en función de la temperatura del petróleo.

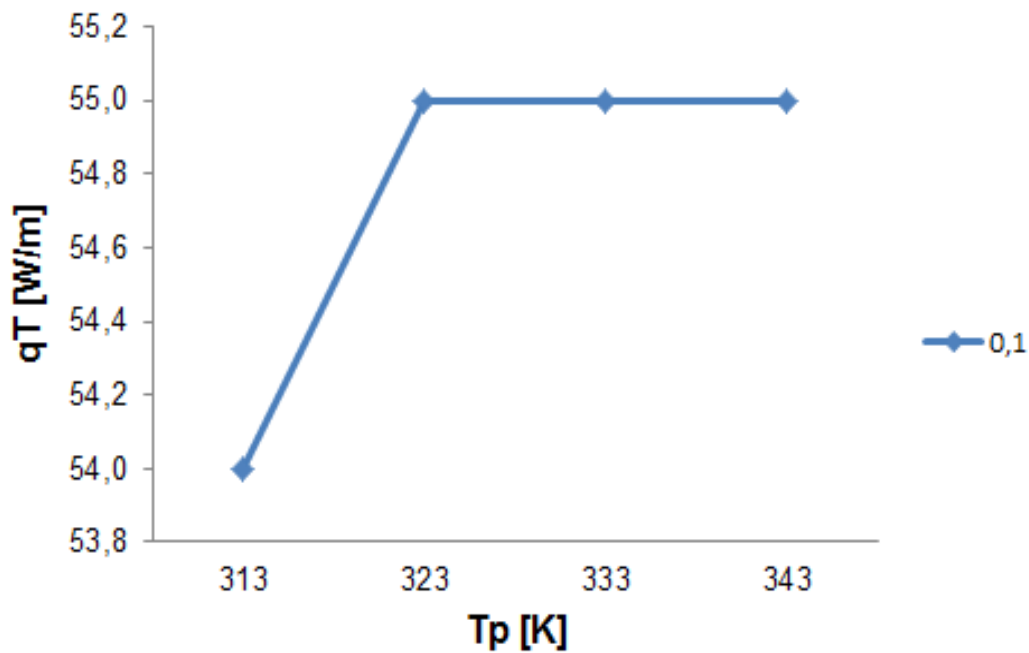


Figura 3.4. Comportamiento de la pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento en función de la temperatura del petróleo.

Al realizar el análisis para el espesor técnico racional de aislamiento, se evidencia (figura 3.4) que existe un comportamiento con tendencia creciente de las pérdidas energéticas respecto a la temperatura del petróleo, hasta llegar a los 323 K donde permanece constante. Reportando valores de 54 W/m para la temperatura mínima evaluada y 55 W/m para la temperatura máxima.

### 3.5. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura ambiente

El efecto de la temperatura ambiental se muestra en la figura 3.5, en la cual se observa que existen cambios significativos de la pérdida total de calor para los distintos espesores de aislamiento, donde las pérdidas se tornan menores a medida que aumenta el espesor, semejante a lo reportado por Koverdynsky *et al.* (2006). Mientras que, para los valores superiores de la temperatura ambiente se aprecia una disminución de la pérdida total de calor, mostrando menores niveles de variación para los mayores espesores de aislamiento.

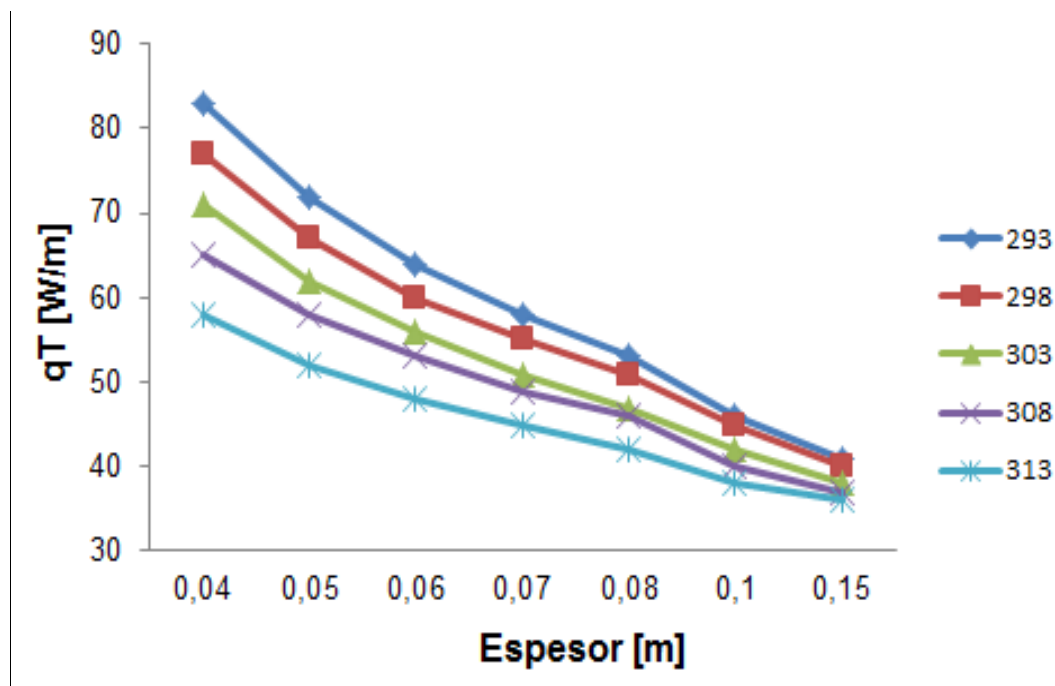


Figura 3.5. Comportamiento de la pérdida total de calor en función de la temperatura ambiente.

Al aumentar la temperatura ambiente en el posible rango de operación, para el espesor óptimo económico de aislamiento, se observó una disminución de los valores de las pérdidas energéticas (figura 3.6), comportamiento similar a lo reportado en la literatura (Limone, 2012). Lo cual refleja la marcada incidencia de los parámetros climáticos en el proceso de transporte de crudo por sistemas que emplean trazas de vapor. Este comportamiento es inverso al mostrado por el mismo espesor, al variar la temperatura del vapor y la temperatura del petróleo, y muestra diferencias de 8 W/m en el rango experimentado, al variar de 38 W/m a los 293 K hasta los 46 W/m a los 313 K.

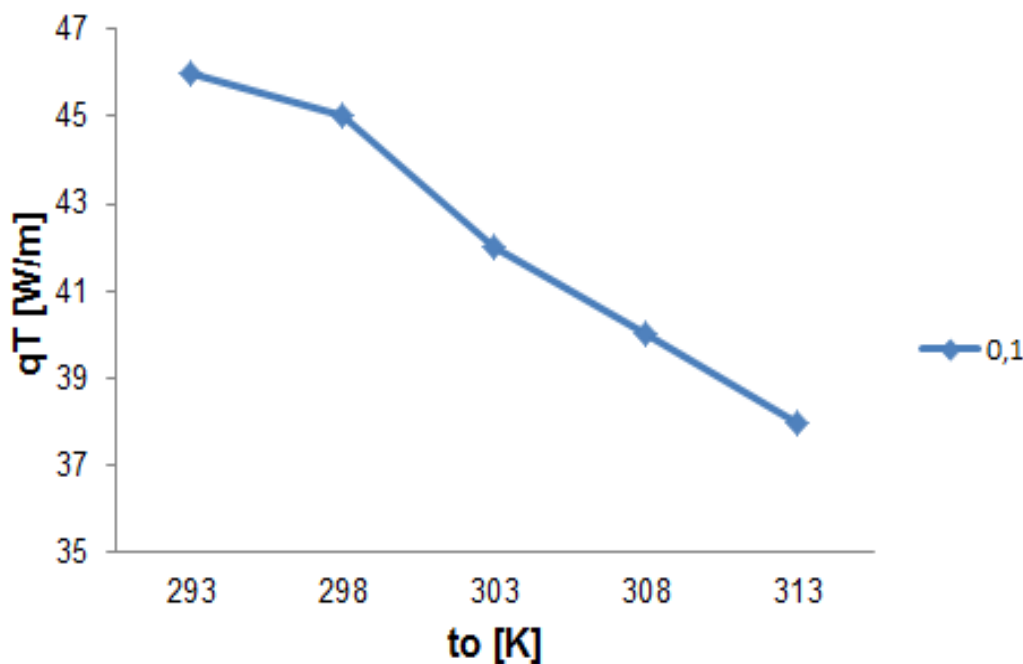


Figura 3.6. Comportamiento de la pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento en función de la temperatura ambiente.

### 3.6. Estimación del espesor óptimo económico de aislamiento

Para la obtención de la pérdida total de calor se procedió a calcular mediante la ecuación 2.24, la cual es el resultado de la integración de las expresiones 2.2 y 2.20; para las condiciones estimadas resulta evidente que la pérdida de calor que se produce desde la parte aislada de la tubería principal al medio exterior ( $q^P$ ) sea mayor que la pérdida generada desde la cavidad termoaislada ( $q^E$ ), lo cual está asociado

fundamentalmente a una mayor área de disipación de calor, debido a la diferencia de los diámetros de la tubería principal y la traza de vapor. La figura 3.7 muestra el valor de la pérdida total de calor disgregado en sus dos componentes y exhibe los porcentajes que representan del total.

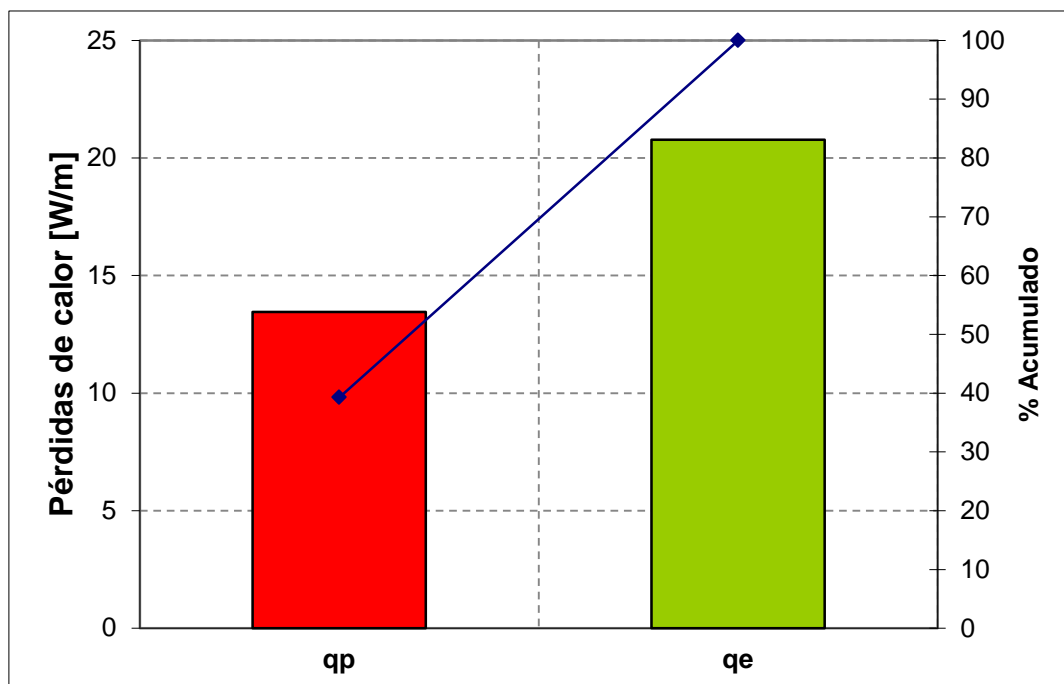


Figura 3.7. Distribución de la pérdida total de calor por componentes.

El cálculo de los parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento, se obtuvo en correspondencia con el procedimiento descrito anteriormente; el valor de las pérdidas energéticas, el valor actualizado de dichas pérdidas, el incremento del ahorro, el incremento de la inversión y la diferencia entre estos dos últimos parámetros han sido determinadas por las expresiones 2.25, 2.26, 2.29, 2.30 y 2.31 respectivamente. El espesor óptimo económico de aislamiento se determinó considerando entre otros parámetros el tiempo de funcionamiento de la instalación (2920 h/año), el costo energético (0,09 CUP/kW·h), la duración estimada del aislamiento (10 años), el incremento del costo de la energía (3 %), la tasa de interés (5 %) y la tasa de inflación prevista (1 %). Los precios de los aislamientos se fijaron dependientes de los espesores empleados, en relación a lo establecido por ISOVER (2015), y no se ha tenido en cuenta un costo adicional del aislamiento por mano de obra.

Tabla 3.2. Parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento.

$\delta$ [m]	$q^T$ [W/m]	$V$ [CUP/m·año]	$V_A$ [CUP/m]	$A$ [CUP/m]	$I_A$ [CUC/m]	$A - I_A$ [CUP+CUC/m]
0,04	70,534	18,536	175,839			
0,05	58,925	15,486	146,898	28,941	2,6	26,341
0,06	50,925	13,383	126,953	19,945	1,7	18,245
0,07	45,074	11,845	112,366	14,587	2,2	12,387
0,08	40,606	10,671	101,230	11,136	2,15	8,986
<b>0,10</b>	34,231	8,996	95,336	5,894	3,35	<b>2,544</b>
0,15	25,528	6,7089	93,641	1,695	2,4	-0,705

La estimación del espesor óptimo económico se realizó considerando siete espesores de aislamiento (0,04 m; 0,05 m; 0,06 m; 0,07 m; 0,08 m; 0,1 m y 0,12 m) de lana de roca (*TECH Wired Mat MT 6.1*), según valores normalizados por la compañía española ISOVER para este material aislante. Para cada espesor evaluado se calcularon los parámetros característicos mostrados en la tabla 3.2, resultando evidente que la pérdida total de calor, el valor de las pérdidas energéticas y el valor actualizado de dichas pérdidas disminuyen al aumentarse el espesor de aislamiento, (lo cual resulta lógico considerando la dependencia matemática entre estos parámetros, en el mismo orden expuesto), mientras que el incremento del ahorro no muestra tendencia a ascender o disminuir con el incremento del espesor, comportamiento análogo al mostrado por el incremento de la inversión del aislamiento, influenciado por los precios establecidos para los diferentes espesores. La diferencia entre el incremento del ahorro y el incremento de la inversión manifiesta cierta disminución, obteniéndose su valor mínimo positivo justamente para el espesor óptimo económico, siendo para este caso de 0,1 m.

El análisis de los costos en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento, garantizó el escenario de forma tal que quedaron desestimados aquellos espesores para los cuales el gasto de energía resultó elevado, o los costos de inversión no amortizaban en el período evaluado.

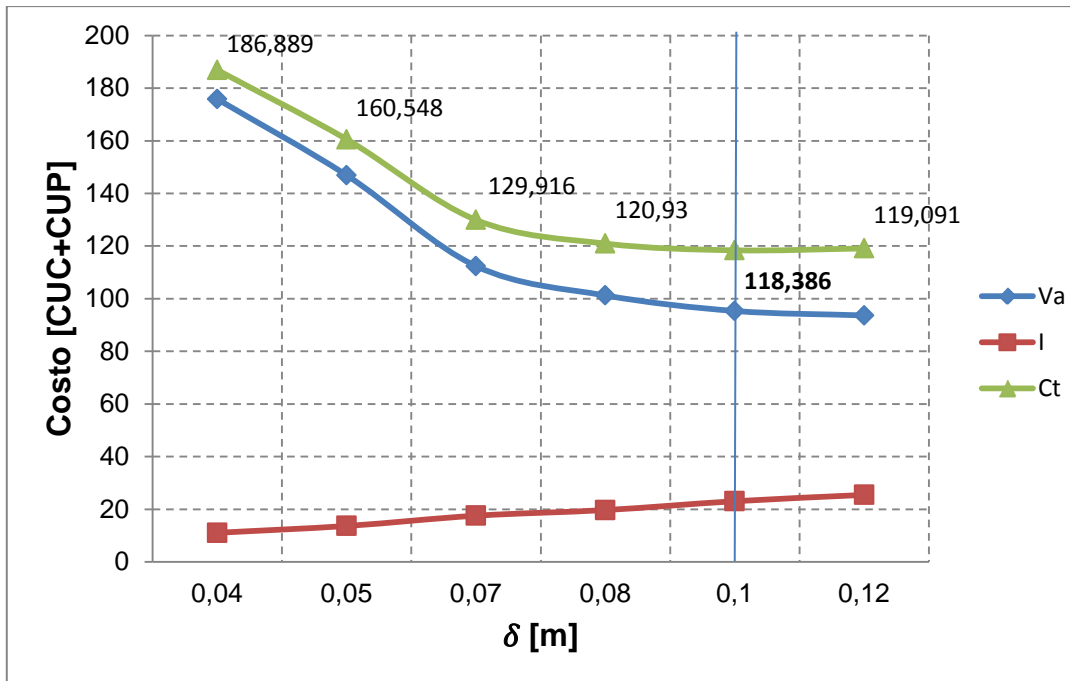


Figura 3.8. Espesor óptimo económico de aislamiento.

La selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías con traza de vapor está relacionada a factores de naturaleza opuesta, como son los costos asociados a la pérdida de calor y la inversión en aislamiento. La figura 3.8 muestra como al evaluar para un mismo espesor de aislamiento, existe una disminución del valor actualizado de la pérdida total de calor ( $V_A$ ) asociado al incremento de la resistencia térmica por conducción, mientras el costo de inversión de aislamiento ( $I$ ) crece a causa del aumento de material aislante, comportamientos análogos a los obtenidos por CENER (2012), Galdámez y Guzmán (2011).

La suma del valor actualizado de las pérdidas energéticas con el costo de inversión, posibilitó la búsqueda del valor mínimo de costo total (118,386 CUC + CUP), demostrándose que para las condiciones analizadas el espesor óptimo económico de aislamiento es de 0,10 m.

Si se eligiera un espesor de aislamiento menor que el óptimo económico, la pérdida total de calor sería mayor y el costo también aumentaría. Si por el contrario, se seleccionara un espesor mayor, el ahorro de la energía (asociado a este espesor) no compensaría el costo efectuado por su compra.

### 3.7. Impacto económico

En la tabla 3.3 se muestran los gastos monetarios producto de la pérdida total de calor para cada espesor de aislamiento; aunque, para el espesor de 0,12 m se obtiene una pérdida de calor inferior al espesor óptimo económico, este no se toma en consideración pues su costo de inversión resulta superior al ahorro generado y no logra amortizar el dinero desembolsado por su compra e instalación, para el periodo evaluado.

Tabla 3.3. Gastos monetarios por espesor de aislamiento.

$\delta$ [m]	$q^T$ [W/m]	$V_A$ [CUP/m]	Gastos [CUP + CUC]
0,04	70,534	175,839	186,889
0,05	58,925	146,898	160,548
0,07	45,074	112,366	129,916
0,08	40,606	101,230	120,930
<b>0,10</b>	34,231	95,336	118,386
0,15	25,528	93,641	119,091

Para el espesor óptimo económico (0,1 m) la pérdida total de calor ascendió a los 34,231 W/m, si se analiza que el valor actualizado de las pérdidas es de 95,336 CUP/m y que la instalación posee una longitud de 5 100 m resulta fácil percibir que se incurren en gastos de 486 213,6 CUP para el periodo evaluado; sin embargo, al comparar estos valores con los aportados por el espesor de 0,04 m resulta evidente que la pérdida total de calor asociada a este espesor es de 70,534 W/m incurriendo en gastos de 186,889 CUP + CUC. De ahí que, al emplear el espesor adecuado de aislamiento se produzca un ahorro de energía respecto al espesor con 0,04 m de 36,303 W/m, que equivale en términos monetarios a 185 145,3 CUP + CUC.

### 3.8. Análisis ambiental

La selección del espesor adecuado de aislamiento térmico, contribuye al comportamiento eficiente del transporte de combustible por tuberías y mitiga sucesos que afectan directamente al medio ambiente, con impactos directos sobre la naturaleza



y la sociedad. En la tabla 3.4 se han identificados los efectos negativos asociados a una inadecuada selección del espesor de aislamiento térmico, en la instalación de trasiego del crudo cubano ubicada entre las empresas Puerto Moa y Comandante Ernesto Che Guevara.

Tabla 3.4. Impactos ambientales asociados una inadecuada selección del espesor de aislamiento térmico.

Suceso	Factor	Impactos ambientales
Emisión excesiva de calor	Aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de la calidad del aire</li> <li>• Incremento local de la temperatura</li> </ul>
	Hombre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de enfermedades respiratorias</li> <li>• Quemaduras y malestares</li> </ul>

La caracterización de los impactos ambientales resulta de suma importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta en el análisis desarrollado (Somoza y García 2002); determinando la repercusión específica que posee el proceso de selección de espesor de aislamiento térmico, sobre el medio circundante.

Los impactos ambientales expuestos en la tabla 3.4, ocasionan efectos negativos indirectos que pueden generar incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardiaco, la contracción de los capilares de la piel y la disminución en la capacidad de trabajo física del hombre.

Según Navarro (2014) muchas plantas de energía eléctrica producen calor en exceso; sin embargo, uno de los efectos que se logra mitigar con la selección adecuada del espesor de aislamiento es la contaminación térmica, contribuyendo a que no exista un mayor deterioro de la calidad del aire, provocado por un ascenso de la temperatura que afecta la flora y fauna endémica y contribuye al cambio climático.

### **3.9. Conclusiones del capítulo**

- Independiente del espesor de aislamiento empleado, el incremento de la temperatura del vapor y la temperatura del combustible, provocan un aumento de la pérdida total de calor, comportamiento opuesto al reflejado por la temperatura ambiente.
- La diferencia entre el incremento del ahorro y el incremento de la inversión manifestó su valor mínimo positivo para el espesor óptimo económico, de 0,1 m, con un costo total de 118,386 CUC + CUP/m.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Para una duración estimada del aislamiento de 10 años, con un periodo de trabajo de la instalación de 2 920 horas anuales, incremento del costo de la energía de un 3 %, tasa de interés de un 5 % y tasa de inflación del 1 %. La diferencia entre el incremento del ahorro y el incremento de la inversión manifestó su valor mínimo positivo para el espesor óptimo económico, de 0,1m; registrándose para este, el mínimo costo total de 118,386 CUC+CUP por metro de tubería.
- Para la instalación analizada y lana de roca *TECH Wired Mat MT 6.1* se determinó que el espesor óptimo económico es de 0,1 m; para el cual se genera una pérdida total de calor de 34, 231 W/m.
- Para el espesor óptimo económico de aislamiento se comprobó que existe un aumento de la pérdida total de calor al incrementarse la temperatura del vapor y la temperatura del petróleo, comportamiento opuesto al mostrado por la temperatura ambiente.

## **RECOMENDACIONES**

- Extender la selección de espesor de aislamiento térmico de tuberías con trazas de vapor, para otros tipos de combustible y fluidos.
- Analizar el comportamiento térmico de otros sistemas, para nuevos materiales aislantes y diferentes condiciones de trabajo.
- Perfeccionar el método empleado considerando criterios no valorados en la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armacell. 2013. *Cálculo del espesor de aislamiento AF/Armaflex necesario para impedir la condensación*. España. Información técnica No 3. Pág. 1-4. Consultado: 24 de marzo de 2014. Disponible en: [www.armacell.com](http://www.armacell.com).
- Ávila, R. 1995. *Química aplicada I*, Edición UPC, Primera edición, Barcelona.
- Balan,C; Broboana, D; Gheorghiu, E; Vékás, L. 2008. *Rheological characterization of crude oils and complex fluids in electro-magnetic fields*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Vol 42. No 2. Pág. 92-103.
- Benítez, I; Álvarez R; Escudero, I; Reyes, F; Rodríguez, A. 2004. *Efecto de aditivos nacionales en las propiedades físicas del petróleo crudo cubano*. Tecnología Química. Vol 24. No 1. Pág.43-61.
- Bergman, T; Lavine, A; Incropera, F; Dewit, D. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New Jersey. ISBN 13 978-0470-50197-9. 1039 Pág.
- Caldiño, V; Salgado, M. 2004. *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.
- Campo, A. 2001. *A capstone senior design project: thermal design of insulated pipes that carry hot single-phase fluids and are immersed in atmospheric air*. International Journal of Mechanical Engineering Education. Vol 30. No 4. Pág. 341-350.
- CENER. 2012. *El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO2 en viviendas mediante incremento del aislamiento*. Consultado: 16 de marzo de 2015. Disponible en: [www.cener.com](http://www.cener.com).
- Chen, T; Mohammed, R; Bailey, A; Luckham, P; Taylor, S. 1994. *Dewatering of crude oil emulsions. Emulsion resolution by the application of an electric field, colloids and surfaces*. Physicochemical and Engineering Aspects. Vol 31. No 8. Pág 273-284.

- Chenlo, F; Moreira, R; Silva, C. 2010. *Rheological behavior of aqueous systems of tragacanth and guar gums with storage time*. Journal of Food Engineering. Vol 32. No 6. Pág.107-113.
- Colby, R. 2010. *Structure and linear viscoelasticity of flexible polymer solutions: comparison of polyelectrolyte and neutral polymer solutions*. Journal of Rheological. Vol 24. No 9. Pág. 425-442.
- CONAE, PYME, SENER. 2008. *Beneficios del aislamiento en la industria*. 52 Pág. Consultado: 16 de enero de 2015. Disponible en: [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx).
- CONUEE, PYME, SENER. 2008. *Beneficios del aislamiento en la industria*. 52 Pág. Consultado: 20 de febrero de 2015. Disponible en: [www.conuee.gob.mx](http://www.conuee.gob.mx).
- Cruz, M; Toro, A. 2011. *Reingeniería del sistema de distribución de vapor al área de lavandería y cocina del hospital gineco obstétrico Isidro Ayora*. Quito : Tesis de grado. Escuela politécnica nacional. 151 Pág.
- De Angelis, E; Serra, E. 2014. *Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges*. Energy Procedia. Vol 45. Pág. 362-371.
- Del Pozo, J. 1982. *Técnicas de conservación energéticas en la industria. Tomo I. Fundamentos y ahorro en operaciones*. Edición revolucionaria. 508 Pág.
- Díaz, A; Falcón, J. 2004. *Estudio reológico de emulsiones del petróleo crudo cubano en agua*. Tecnología Química. Vol 24. No 2. Pág.45-53.
- Falcón, J; Serret, N; Carbonell, J. 2006. *Effect of pyrolysis products on diesel-fuel oil blends*. Tecnología Química. Vol 26.No 3. Pág. 54-63.
- Galdámez, V; Guzmán, H. 2011. *Evaluación térmica, energética y económica del uso de aislantes térmicos*. Tesis de grado. Universidad centroamericana José Simeón Cañas. 61 Pág.
- Gilbert, A; Laurencio, H; Rodríguez, I; Retirado, Y; Torres, E. 2014. *Selección del espesor de aislamiento térmico para tuberías de petróleo con traza de vapor*. Cuba : Minería y Geología, Vol 30. No 1. ISSN 1993 8012. Pág. 62-79.

- Gilbert, A. 2015. Selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor. Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba,
- Gilbert, A; Retirado, Y; Laurencio, H; Palacios, A; Góngora, E. 2016. Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor. *Minería y Geología*, Vol 32. No 2. ISSN 1993 8012. Pág. 21-37
- Góngora, E. 2013. *Modelación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico en cilindros horizontales rotatorios*. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 127 Pág.
- González, F. 2005. *Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción*. Tesis doctoral. Universidad Politècnica De Catalunya. 299 Pág.
- Harms, H. 1991. *Oil tool and method for controlling paraffin deposits in flow lines and downhole Strings*. Patent 20 32 005.
- Huang, C; Zhang, Y. 2014. *Calculation of high-temperature insulation parameters and heat transfer behaviors of multilayer insulation by inverse problems method*. *Chinese Journal of Aeronautics*. Pág.1-6.
- Hummel, R; Fisher, L. 1966. *Structural building panels with expanded polystyrene cores. The design and structural applications of urethane-cored sandwich panels. Plastics in building structures*. London: Pergamon Press. Pág. 243-267.
- IDAE. 2007. *Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos*. Madrid. ISBN: 978-84-96680-08-1. 59 Pág.
- InfoTUB. 2013. *Aislamiento térmico de redes de tuberías plásticas. Cálculo del espesor (según RITE)*. 6 Pág.
- ISOVER. 2004. *Manual de aislamiento en la industria*. Madrid : Saint-Gobain Isover España. 148 Pág.
- ISOVER. 2015. *Lista de precios*. Madrid : Saint-Gobain Isover España. 53 Pág.

- Jensen, P; Løpppentien, J. 2008. *Temperature Optimization- Hørning District Heating Company has achieved remarkable results*. Hot|Cool, International Magazine on District Heating and Cooling, num. 1, DBDH, Taastrup, Denmark. ISSN: 0904 9681.
- Koverdinsky, V, Korsgaard, V y Rode, C. 2006.
- López, J. 2010. *Integración de sistemas de refrigeración solar en redes de distrito de frío y de calor*. Tesis doctoral. Universitat Rovira I Virgili. 212 Pág.
- Lulic, H; Civic, A; Pasic, M; Omerspahic, A; Dzaferovic, E. 2014. *Optimization of thermal insulation and regressionanalysis of fuel consumption*. Procedia Engineering. Vol 69. Pág.902-910.
- Massó, Y. 2008. *El aislamiento térmico en el nuevo RITE*. Pág. 22-24.
- Martín-Domingo, D. 2011. *Apuntes de transmisión del calor*. España: UPM.
- Maruska, P; Rao, B. 1987. *Estudio reológico y dieléctricos a los petróleos parafínicos y asfalténicos*. Fuel Science and Technology. Vol 2. No 5. Pág.119-168.
- Mechetti, M; Rodríguez L; Castañeda, M; Pelaez, C. 2001. *Efecto electrorreológico en crudos pesados*. Informe ICP, Ecopetrol, Argentina.
- Monteagudo, J; Pérez, J; Guerra, E. 1998. *Aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor*. España: Ingeniería Química, Vol 24. No 3. ISSN 0210-2056. Pág. 161-167.
- Navarro, A. 2014. *Contaminación térmica en el agua*. Registro N° 188.540. Consultado: 17 de septiembre de 2014. Disponible en: [www.profesorenlinea.cl](http://www.profesorenlinea.cl).
- Ochoa, O. 2011. *Procedimiento para el bombeo eficiente de petróleos pesados*. Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 85 Pág.
- Om, N; Loginapaulo, V; Cavado, A. 2004. *Composición de los petróleos pesados cubanos*. Oil & Gas Journal Latinoamérica. Vol 10. No 1. Pág. 23-37.
- Pardal, C. 2009. *La hoja interior de la fachada ventilada. Análisis, taxonomía y prospectiva*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica De Catalunya. 351 Pág.



- Pelaez, C; Stachenco, E. 1999. *Estudio del efecto del campo magnético en crudos parafínicos por cromatografía de gases de alta resolución*. Ecopetrol-ICP.
- Pérez, O. 2013. *Determinación de los parámetros técnico económicos racionales para el transporte de petróleo por tuberías*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 73 Pág.
- Prieto, L. 2008. *Análisis del comportamiento de la caída de presión en el eje convectivo del generador de vapor en la unidad # 6 de la CTE "10 de octubre" con la quema del crudo cubano*. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Cuba, 86 Pág.
- Romo, L. 1998. *Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua*. Petroecuador-ESPE, convenio 96-058.
- Somoza, J; García, A. 2002. *Escenarios macroeconómicos a largo plazo del desarrollo energético y su impacto ambiental*. INIE.
- Tejela, J; San Martín, T. 2010. *Impermeabilización y aislamiento. Técnicas de aislamiento térmico y acústico*. 3 ed. Madrid : Tornapunta Ediciones, S.L.U. ISBN: 978-84-92686-61-2. 35 Pág.
- Trapeznikov, S. 2011. *Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente*. Tesis de Doctorado, Instituto de Minas de San Petersburgos, Rusia, 95 Pág.
- Vandresen, S; Quadri, M; De Souza, J; Hotza, D. 2009. *Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices*. Journal of Food Engineering. Vol 29. No 3. Pág 269-274.
- Vega, L; Batista, R. 2009. *Alternativa metodológica para el cálculo térmico de oleoductos*. Cuba : Ciencias Holguín, Vol 15. No 3. ISSN 1027-2127. Pág. 1-10.
- Vita, M; Alejandro, M; Arriola, M; Sánchez, M; Manzanares, E; Romo, C; Yeri, R. 2001. *Nueva tecnología para la emulsificación de residuales del petróleo en agua*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, Boletín IIE. Pág.131- 135.