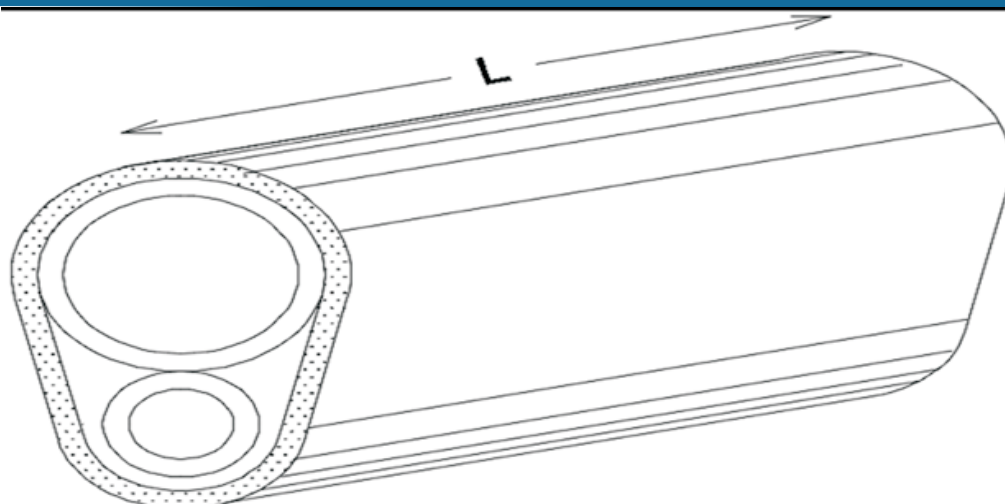


MONOGRAFÍA



PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE ESPESOR  
DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE  
DE COMBUSTIBLE CON TRAZAS DE VAPOR

M. Sc. AMAURIS GILBERT HERNÁNDEZ

Dr. YOALBYS RETIRADO MEDIACEJA

Procedimiento para la selección de espesor de aislamiento  
térmico en tuberías de transporte de combustible  
con trazas de vapor

Procedimiento para la selección de espesor de aislamiento térmico  
en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor

Autores: Lic. Amauris Gilbert Hernández

Dr. Yoalbys Retirado Mediaceja



*Editorial Digital Universitaria de Moa*

## Página legal

Título de la obra: Procedimiento para la selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor, 52pp

Editorial Digital Universitaria de Moa, año 2016 – ISBN: 978-959-16-3140-4

1. Autores: M. Sc. Amauris Gilbert Hernández  
Dr. Yoalbys Retirado Mediaceja

2. Institución: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.

Edición y corrección: M. Sc. Niurbis La Ó Lobaina



Institución del autor: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Editorial Digital Universitaria de Moa, año 2016

La Editorial Digital Universitaria de Moa publica bajo licencia Creative Commons de tipo Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas.

La licencia completa puede consultarse en:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

Editorial Digital Universitaria

Instituto Superior Minero Metalúrgico

Las coloradas s/n, Moa 83329, Holguín

Cuba

e-mail: [edum@ismm.edu.cu](mailto:edum@ismm.edu.cu)

Sitio Web: <http://ismm.edum.edu.cu>



**Editorial Digital Universitaria de Moa**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN EL TRANSPORTE POR TUBERÍAS</b> .....	3
1.1. Introito .....	3
1.2. Breve reseña histórica .....	3
1.3. Precedentes de la investigación.....	4
1.3.1. Trabajos relacionados con la selección de espesor de aislamiento térmico .....	4
1.3.2. Trabajos relacionados con el transporte de petróleos pesados .....	8
1.4. Materiales aislantes .....	12
1.4.1. Funciones básicas del aislamiento térmico.....	12
1.4.2. Normativas de materiales aislantes .....	13
1.5. Aspectos de interés sobre los materiales aislantes.....	14
1.5.1. Clasificación de los materiales aislantes .....	14
1.5.2. Características de los termoaislantes.....	15
1.6. Criterios de selección del espesor de aislante.....	17
1.7. Mecanismos de transferencia de calor empleados en la selección del espesor de aislamiento térmico .....	19
1.8. Clases de combustibles cubanos.....	21
1.8.1. Efecto de la temperatura .....	23
1.9. Aplicación del transporte de combustibles por tuberías.....	24
1.9.1. Tuberías con trazas de vapor.....	24
1.9.2. Ventajas del transporte por sistemas de tuberías .....	25
<b>2. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DEL ESPESOR TÉCNICO RACIONAL DE AISLAMIENTO</b> .....	27

2.1. Introito .....	27
2.2. Selección del espesor técnico racional de aislamiento .....	28
2.2.1. Pérdida de calor desde la sección aislada de la tubería principal .....	28
2.2.2. Calor recibido por la tubería principal .....	32
2.2.3. Temperatura del aire en la cavidad .....	33
2.2.4. Espesor técnico racional .....	35
<b>3. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DEL ESPESOR ÓPTIMO ECONÓMICO DE AISLAMIENTO .....</b>	<b>38</b>
3.1. Introito .....	38
3.2. Espesores de aislamiento .....	39
3.3. Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento .....	40
3.4. Valor de las pérdidas energéticas .....	43
3.5. Valor actualizado de las pérdidas.....	44
3.6. Incremento del ahorro .....	44
3.7. Incremento de la inversión del aislamiento.....	45
3.8. Espesor óptimo económico .....	45
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>

## 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, dando paso a que persistan como principales deficiencias:

- Los procedimientos para estimar el espesor de aislamiento térmico han sido desarrollados para sistemas radiales y no consideran la cavidad formada en una instalación con trazas de vapor y el análisis de los procesos convectivos asociados.
- No se consideran resistencias térmicas y ganancias de calor propios de este tipo de instalación, lo que limita la adecuada estimación del espesor de aislamiento térmico que garantice las necesidades del proceso de transporte.
- No se realiza un análisis riguroso de las propiedades termofísicas de los fluidos trasegados, así como su integración en los modelos establecidos para la obtención del espesor de aislamiento térmico.



## SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN EL TRANSPORTE POR TUBERÍAS

### 1.1. Introito

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.

### 1.2. Breve reseña histórica

Desde la antigüedad los fenicios y egipcios ya sabían obtener hilos de vidrio, elementos que obtenían sumergiendo una varilla metálica en un crisol que contenía vidrio en fusión y retirándola rápidamente. Bien entendido que en esta época no se trataba de lana de vidrio para aislamiento, sino para fines textiles. Sin embargo, la primera comunicación sobre este material aislante no aparece hasta el siglo XVIII y se debe al físico y naturalista francés Antoine de Reamur en 1713.

Hasta principios del siglo XX la lana de vidrio fue una simple curiosidad. No existen datos precisos que señalen el momento a partir del cual se desarrolla su utilización como aislamiento térmico; sin embargo, parece que coincide con la

aparición de un nuevo procedimiento de fibrado. El algodón de vidrio se obtenía dejando caer un hilo de vidrio fundido con un chorro de vapor. Así se lograba obtener gotas de vidrio prolongadas en una aguja fina.

Las cualidades aislantes de estas fibras groseras no tardaron en ser advertidas. Mientras tanto, el aumento del desarrollo industrial impuso la necesidad creciente de los calorifugados. A partir de este momento, los procedimientos de fibrado empiezan a progresar rápidamente y durante la primera guerra mundial (1914-1918) por razones del bloqueo, los alemanes continuaron activamente las investigaciones para reemplazar los aislantes tradicionales de los que carecían (corcho, amianto y tierra de diatomeas).

En Francia la pionera fue la sociedad, La Seda de Vidrio, cuya fábrica fue destruida en 1940 tras un bombardeo. En España comienza la fabricación de este material en la granja Segovia, en el año 1942, por la sociedad EXPACO S.A y comercializada bajo la marca VITROFIB (ISOVER, 2004a).

### **1.3. Precedentes de la investigación**

#### **1.3.1. 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 trasegado 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 (2004a) 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 (2004b) 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  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  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 (López, 2010).

En relación con el 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 (Incropera y Dewitt, 1999, 2007; Bergman *et al.*, 2011). En el trabajo de estos autores se realiza un riguroso análisis térmico, pero 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 (2008a) y Laurencio (2007, 2010, 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 (2010). 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.

El espesor de aislamiento térmico adecuado de una instalación de transporte de combustible con traza de vapor fue determinado por Gilbert *et al.* (2012a, 2013). El método empleado para la selección del espesor del material aislante, parte de un balance de energía y brinda la posibilidad de tener en cuenta las propiedades termofísicas y de flujo del combustible trasegado.

Gilbert *et al.* (2014a) 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.* (2014b), 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.

### **1.3.2. 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, Ventura y Pitot entre otros (Otero, 1989; Laurencio, 2007; 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 (Laurencio, 2007; Ochoa, 2011). En Cuba el desarrollo de los estudios de fluidos no newtonianos no se promueve hasta después del triunfo de la Revolución, y han devenido una de las bases principales del progreso científico técnico en este campo de la ciencia.

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, 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 De la Paz (2002) y, 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 (Da Silva *et al.*, 2005; Dak *et al.*, 2007; Andrade *et al.*, 2009; 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 geológicos 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.*, 2000).

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 (1991) y 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 dilatación 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 Ferro *et al.* (2004). La dilatación mostrada se explica por la presencia de partículas cargadas en suspensión coloidal, lo que podría atribuirse 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 (1993); Romo (1998), donde se determina que las emulsiones con un 70 % de petróleo pesado y 5 % de sustancia tensoactiva, tienen una alta fluidez porque la viscosidad se ha reducido a menos de 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 (2000) y 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. De forma similar Manals y Falcón (2005) analizan la influencia que presentan los productos de pirólisis y los agentes emulsionantes sobre la tensión superficial y las propiedades del petróleo crudo cubano.

Falcón *et al.* (2006) describen 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 (2008a) efectúan el estudio a un petróleo crudo cubano y sus emulsiones; se determinó que tanto el petróleo como la emulsión presentaban comportamiento pseudoplástico. Laurencio y Delgado (2008b) incluyen la influencia de la temperatura en los modelos antes mencionados, obteniéndose un resultado de mayor aplicabilidad práctica.

## **1.4. 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).

### **1.4.1. 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 (2002) y EN ISO 15758 (2004) se presenten los principios para minimizar acumulación de humedad en los materiales aislantes. Según ISOVER (2004a) 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).

#### 1.4.2. Normativas de materiales aislantes

El comportamiento de un producto en relación a cómo 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

## 1.5. Aspectos de interés sobre los materiales aislantes

### 1.5.1. 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 disímiles 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></ul>   |
| Su estructura  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Aislantes pulverulentos</li><li>• Aislantes fibrosos<ul style="list-style-type: none"><li>➤ de origen animal</li></ul></li><li>• Espumas<ul style="list-style-type: none"><li>➤ sintéticas</li><li>➤ aglomeradas</li></ul></li></ul> |
| Su temperatura | <ul style="list-style-type: none"><li>• Aislantes refractarios</li><li>• Aislantes semirrefractarios</li><li>• Aislantes ordinarios</li></ul>  |

---

**Fuente:** Del Pozo, 1982.

### 1.5.2. 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, 2004a). 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 alumino-silicatos. 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).

### **Poliestireno**

Es un termoaislante celular producido a partir del espumado de polímeros plásticos, que dan lugar a un material rígido de celda cerrada. Disponible en mantas y placas. Su densidad comercial es 32 kg/m<sup>3</sup>. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 353 K (80°C). No contiene clorofluorocarbonos. Es un material ligero de excelentes características de corte e impermeable al agua. Es combustible, aunque se puede producir como autoextinguible. Requiere barrera de vapor y protección contra intemperie.

### **Poliuretano**

Es un termoaislante celular producido a partir del espumado de polímeros plásticos que dan lugar a un material rígido de celda cerrada. Disponible en coquillas, placas y espumado en sitio. Su densidad comercial es 32 kg/m<sup>3</sup>. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 383 K (110 °C). Contiene clorofluorocarbonos. Es un material ligero de excelentes características de corte e impermeable al agua. Su formulación varía con cada fabricante. Es combustible, aunque se puede producir como autoextinguible. Requiere barrera de vapor y protección contra intemperie.

## **1.6. 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 radiativa 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, 2004d).

#### **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, 2004c).

#### **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, 2004d; 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, 2004a; 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.

## **1.7. 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 (Kern, 1999; 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 1.1 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 (Holman, 1999).

$$q = -k \cdot A \cdot dT/dx \quad (1.1)$$

$q$ : Calor transferido; [W].

$k$ : Conductividad térmica; [W/m·K].

$A$ : Área de la sección transversal al flujo de calor; [m<sup>2</sup>].

$dT/dx$ : Gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor; [K/m].

### **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 (Incropera y Dewitt, 2007). 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 y la densidad del flujo de calor, puede ser expresada por la ecuación 1.2 (Kern, 1999).

$$q'' = h_{\infty} \cdot (T_{\infty} - T_s) \quad (1.2)$$

$q''$ : Densidad del flujo de calor; [W/m].

$h_{\infty}$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección; [W/m<sup>2</sup>·K].

$T_{\infty}$ : Temperatura del fluido; [K].

$T_s$ : Temperatura de la superficie; [K].

## 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 (Incropera y Dewitt, 2007; Kern, 1999). El intercambio de radiación entre dos superficies grises, una encima de la otra, se expresa según la ecuación 1.3.

$$q_{1,2} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot \left( \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2} \right)^{-1} \quad (1.3)$$

$q_{1,2}$ : Calor transferido por radiación desde la superficie emisora a la receptora; [W].

$T_1$ ;  $T_2$ : Temperatura de la superficie emisora y receptora; [K].

$A_1$ ;  $A_2$ : Área de la superficie emisora y receptora; [m<sup>2</sup>].

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman; 5,67·10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>.

$\varepsilon_1$ ;  $\varepsilon_2$ : Emisividad de la superficie emisora y receptora; [adimensional].

$F_{12}$ : Factor de visión; [adimensional].

### 1.8. 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).

### **1.8.1. 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 (Balagui *et al.*, 2010; Bourbon *et al.*, 2010; Chenlo *et al.*, 2010; Colby, 2010).

La disminución de la viscosidad se debe a dos efectos principales (Garcell *et al.*, 1988; Laurencio y Delgado 2008b; Cárdenas y Fonseca, 2009; Trapeznikov, 2011): disminución de la viscosidad del medio dispersante y debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

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

De acuerdo con 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, 2008b). 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.

## 1.9. 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 (2012) 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

### 1.9.1. 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 (Mironov, 1986; Vega y Batista, 2009).

### **1.9.2. Ventajas del transporte por sistemas de tuberías**

El transporte por tuberías tiene una gran aplicación en las industrias y en el laboreo de minas; además, en la industria metalúrgica tiene efectividad para la transportación de concentrados de materiales no ferrosos, carbón, petróleo, gas, materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos (Laurencio, 2007; Trapeznikov, 2011).

En la actualidad, en las industrias cubanas, se utilizan diversas formas de transportación, cobrando mayor auge el transporte por tuberías, debido a que

tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte. El transporte por tuberías progresa principalmente por la aplicabilidad y la posibilidad de simplificar la longitud de la vía según las características del relieve, y se logra una productividad anual de la instalación superior a otros sistemas de transporte.

El transporte por tuberías posee significativas ventajas en comparación con el transporte ferroviario, automotriz y marítimo, tales como: facilidad en la variación de la dirección y superación de obstáculos, garantiza un proceso tecnológico continuo con la disminución considerable del volumen de las operaciones principales, ausencia de vías de transporte especiales, eleva la productividad del trabajo, poca necesidad en servicio de personal, posibilita la automatización de todo el proceso de transportación, no existen pérdidas del material durante su transportación, las instalaciones y equipos principales son de pequeño tamaño y de poco peso, el material puede ser beneficiado simultáneamente durante su transportación.

La desventaja principal de este tipo de transporte se debe a los gastos elevados de energía, asociados a la operación fuera de los parámetros racionales y deposición de sedimentos en las tuberías. Estas desventajas son compensadas con las disímiles ventajas que se ofrecen en el caso de transportar combustibles pesados con el establecimiento de sus parámetros racionales de flujo.



### PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DEL ESPESOR TÉCNICO RACIONAL DE AISLAMIENTO

#### 2.1. Introito

Existen casos en los cuales un aislamiento térmico convencional no es suficiente para mantener el régimen térmico necesario del objeto aislado. En tales circunstancias, además del aislamiento térmico, se utiliza un calentamiento complementario de dicho objeto. Este calentamiento se utiliza fundamentalmente en tuberías para el transporte a distancias considerables de una sustancia con temperatura dada o con una viscosidad tal que luego de interrumpida la circulación, esta se incrementa considerablemente.

La problemática para mantener un valor de temperatura y por lo tanto de viscosidad, para garantizar un bombeo adecuado del petróleo crudo y en especial luego de las paradas de las instalaciones, puede ser resuelta a partir de este tipo de construcción aislante para la tubería principal, la cual consiste en suministrar un calentamiento adicional con la ayuda de una tubería acompañante de vapor dispuesta a lo largo de toda la tubería y forradas ambas con el material aislante, de manera que forme una cavidad termoaislada. El sistema formado, desde el punto de vista de intercambio de calor, presenta sus particularidades y no puede ser tratado adecuadamente por el método tradicional para la determinación del espesor de aislamiento (Monteagudo *et al.*, 1998).

Las expresiones más empleadas en la literatura (Byron *et al.*, 1960; Incropera y Dewitt, 2007; ISOVER 2004a; Vega y Batista, 2009; Bergman *et al.*, 2011;) para la selección de aislamiento térmico, presentan ciertas limitaciones al aplicarse en sistemas que emplean trazas de vapor, debido a su geometría irregular; lo que se refleja en precisión para el cálculo. De ahí la necesidad de determinar modelos matemáticos y métodos apropiados para la selección de aislamiento térmico.

## 2.2. Selección del espesor técnico racional de aislamiento

La selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías con trazas de vapor (Figura 2.1a) se obtiene a partir de un balance de energía realizado en la instalación de trasiego de petróleo (Gilbert *et al.*, 2012), donde todo el calor disipado por la traza de vapor ( $q^A$ ) se fracciona en el calor absorbido por la tubería principal ( $q^C$ ), las pérdidas de calor a través de la sección aislada del oleoducto ( $q^P$ ) y la cavidad termoaislada ( $q^E$ ). Expresado matemáticamente queda de la siguiente forma:

$$q^A = q^C + q^P + q^E \quad (2.1)$$

La tubería principal debe aislarse conjuntamente con la traza de vapor para formar una cavidad termoaislada; esta cavidad se monta a partir de materiales flexibles. Las cotas, superficies de cálculo, así como su estructura básica se muestran en la Figura 2.1b.

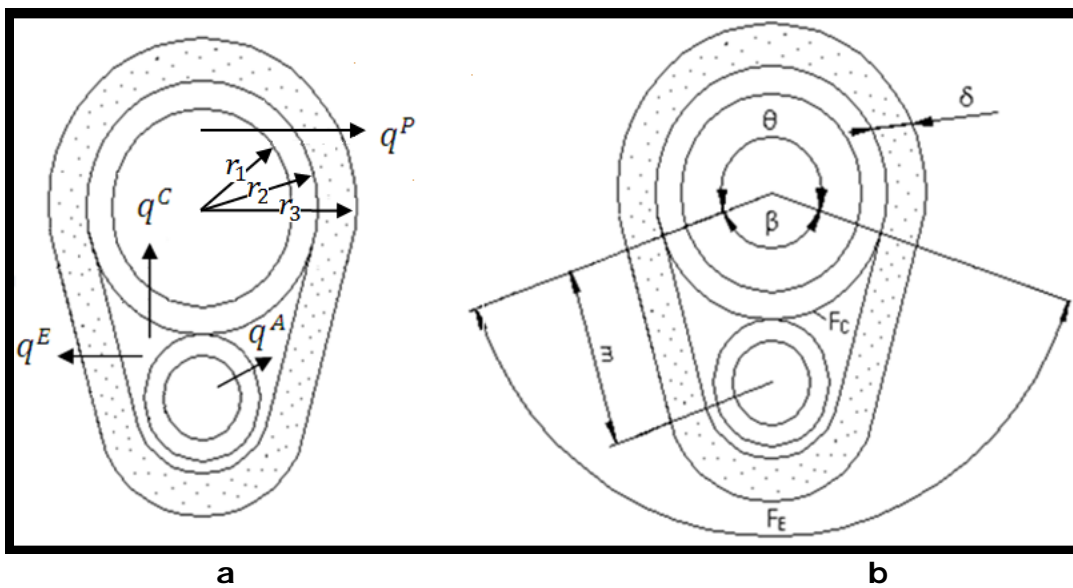


Figura 2.1. Vista frontal de una tubería con traza de vapor.

### 2.2.1. Pérdida de calor desde la sección aislada de la tubería principal

En una instalación de transporte de combustible, las pérdidas de calor se producen por todo el área de la superficie aislada, no mostrándose este comportamiento en un sistema con trazas de vapor; donde parte del flujo de calor se transfiere considerando el ángulo formado por la parte de la tubería principal sobre la cual se dispone el aislamiento. El calor disipado se puede determinar por la expresión 2.2:

$$q^P = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_P - t_0}{R_P} \quad (2.2)$$

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].

$t_0$ : 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 (Incropera y Dewitt, 1999, 2007), 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 Incropera y Dewitt (2007). 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 2.11 en 2.10 se obtiene el coeficiente de convección para el crudo mejorado 650, resultando la expresión 2.15:

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

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].

### 2.2.2. Calor recibido por la tubería principal

Desde la traza de vapor se genera un flujo de calor que queda atrapado en la cavidad termoaislada, este por diferencia de densidades se eleva a la parte no aislada de la tubería principal denominada área de calentamiento, siendo por esta zona donde se transfiere el calor (Figura 2.1):

$$q^c = \frac{\beta}{360} \cdot h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p) \quad (2.20)$$

Donde:

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

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

$h_3$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el aire en el interior de la cavidad a la tubería principal; [W/m<sup>2</sup>·K].

Los coeficientes de transferencia de calor por convección ( $h_3$ ;  $h_4$ ) en el interior de la cavidad termoaislada, consideran la transferencia de calor entre el aire y la superficie interior de la tubería. Según Monteagudo *et al.* (1998) es posible establecer la dependencia de los coeficientes en función de la temperatura y el diámetro de la tubería, tal como se expone en las Tablas 2.1 y 2.2.

**Tabla 2.1.** Coeficiente de transferencia de calor  $h_3$ .

Temperatura del vapor	411	424	437	450	463	476
Coeficiente $h_3$	13,5	14	14,5	15	15,5	16

### 2.2.3. Temperatura del aire en la cavidad

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

#### Calor disipado desde la traza de vapor:

$$q^A = \frac{F_A}{R_A} \cdot (t_V - t_C) \quad (2.21)$$

Siendo:

$$F_A = \pi \cdot 2r_A \quad (2.22)$$

$$R_A = \frac{1}{h_4 \cdot 2\pi \cdot r_A} \quad (2.23)$$

Donde:

$q^A$ : Calor disipado desde la traza de vapor por unidad de longitud; [W/m].

$F_A$ : Superficie de la traza de vapor por unidad de longitud; [m<sup>2</sup>/m].

$t_V$ : Temperatura del vapor en el interior de la traza; [K].

$R_A$ : Resistencia térmica desde la traza de vapor al aire en la cavidad termoaislada; [m<sup>2</sup>·K/W].

$h_4$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la traza de vapor hasta el aire en la cavidad; [W/m<sup>2</sup>·K].

**Tabla 2.2.** Coeficiente de transferencia de calor  $h_4$ .

Temperatura del vapor	Diámetro de la traza de vapor [mm]				
	25	50	75	100	150
411	20	18,38	16,76	15,14	11,90
424	21	19,22	17,44	15,66	12,10
437	22	20,44	18,88	17,32	14,20
450	23	21,41	19,82	18,23	15,05
463	24	22,44	20,88	19,32	16,20
476	25	23,47	21,94	20,41	17,35

**Calor que absorbe la tubería principal:**

$$q^c = \frac{F_C}{R_C} \cdot (t_C - t_P) \quad (2.24)$$

Siendo:

$$F_C = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot 2r_2 \quad (2.25)$$

$$R_C = \frac{1}{h_3} \quad (2.26)$$

Donde:

$F_C$ : Superficie de cálculo de la tubería principal por unidad de longitud; [m<sup>2</sup>/m].

$R_C$ : Resistencia térmica por convección desde el aire en la cavidad termoaislada a la tubería principal; [m<sup>2</sup>·K/W].

La resistencia  $R_C$  se determina según la expresión de resistencia térmica establecida para superficies planas, considerando la misma de radio de pequeña curvatura.

**Calor que se pierde al medio desde la cavidad termoaislada:**

$$q^E = 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_C - t_0) \quad (2.27)$$

Siendo:

$$F_E = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m \quad (2.28)$$

$$m = \sqrt{(2r_2 - 0,01) \cdot (2r_A + 0,01)} \quad (2.29)$$



$$R_E = \frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2} \quad (2.30)$$

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].

$m$ : 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].

Para establecer el coeficiente de transferencia de calor  $h_5$ , las bibliografías consultadas (Monteagudo *et al.*, 1998; ISOVER, 2004a) recomiendan asumir un valor de 12 W/m<sup>2</sup>·K sin que se introduzca un error que influya significativamente en el resultado final.

El calor disipado por la traza de vapor, es numéricamente igual a la suma del calor absorbido por la tubería principal y el que se pierde al medio; por lo que al despejar la temperatura del aire en la cavidad según sus ecuaciones (2.21, 2.24; 2.27) quedaría planteado de la siguiente forma:

$$t_c = \frac{\frac{F_A}{R_A} \cdot t_v + \frac{F_C}{R_C} \cdot t_p + 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot t_o}{\frac{F_A}{R_A} + \frac{F_C}{R_C} + 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E}} \quad (2.31)$$

#### 2.2.4. Espesor técnico racional

Asumiendo un flujo de calor constante que permita mantener un nivel estable de temperatura del petróleo y despreciando el calor almacenado en la tubería principal. Se igualan las expresiones 2.2 y 2.20 lo que compensa la entrada y salida de calor, desarrollando las expresiones resulta:

$$\frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{R_p} = \frac{\beta}{360} \cdot h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p) \quad (2.32)$$

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

$$R_p = \frac{\theta}{\beta} \cdot \frac{t_p - t_o}{h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p)} \quad (2.33)$$

Sustituyendo 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.15 en 25 e introduciendo un coeficiente para considerar las pérdidas por sujeción y anclaje igual a 1,25; se despeja el espesor de aislamiento y se obtiene:

$$\delta = r_2 \cdot \text{Exp} \left[ \left[ \frac{\theta}{\beta} \cdot \frac{1,25(t_p - t_o)}{h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p)} - \left( \frac{1}{\left( 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \cdot \frac{k_c}{D_i} \right) \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3'} \right)} \right] \cdot 2\pi \cdot k_A \right] - r_2 \quad (2.34)$$

Para determinar el valor de  $t_c$  y  $\delta$  es necesario aplicar un procedimiento iterativo hasta lograr la convergencia del método, para lo cual se asume un valor inicial de  $r_3'$ , y se computa mediante el uso de las expresiones 2.31 y 2.34.

El radio exterior del aislamiento colocado en la tubería principal ( $r_3'$ ) se calcula por la expresión:

$$r_3' = r_2 + \delta \quad (2.35)$$

Para mejorar el valor asumido del radio en la iteración se recomienda la expresión 2.36.

$$r_3' = 0,5 \cdot (r + r_3') \quad (2.36)$$

De los valores promedios del radio asumido y el calculado se determina el espesor de aislante térmico, realizando iteraciones mejoradas hasta lograr valores menores del 1%.

$$\frac{r_3' - r_3}{r_3} \cdot 100 \leq 1 \% \quad (2.37)$$

Debe considerarse que para los materiales aislantes en forma de guata (como lana de vidrio y otros similares), tiene lugar durante su colocación cierta compactación; por lo que se recomienda calcular a partir del espesor determinado, el espesor que deberá tener el material antes de su colocación (Monteagudo *et al.*, 1998), para lo cual se recomienda hacer uso de la expresión 2.38:

$$\delta_o = \delta \cdot Cc \cdot \frac{2r_2 + \delta}{2r_2 + 2 \cdot \delta} \quad (2.38)$$

Donde:

$\delta_0$ : Espesor de aislamiento térmico antes de ser instalado; [m].

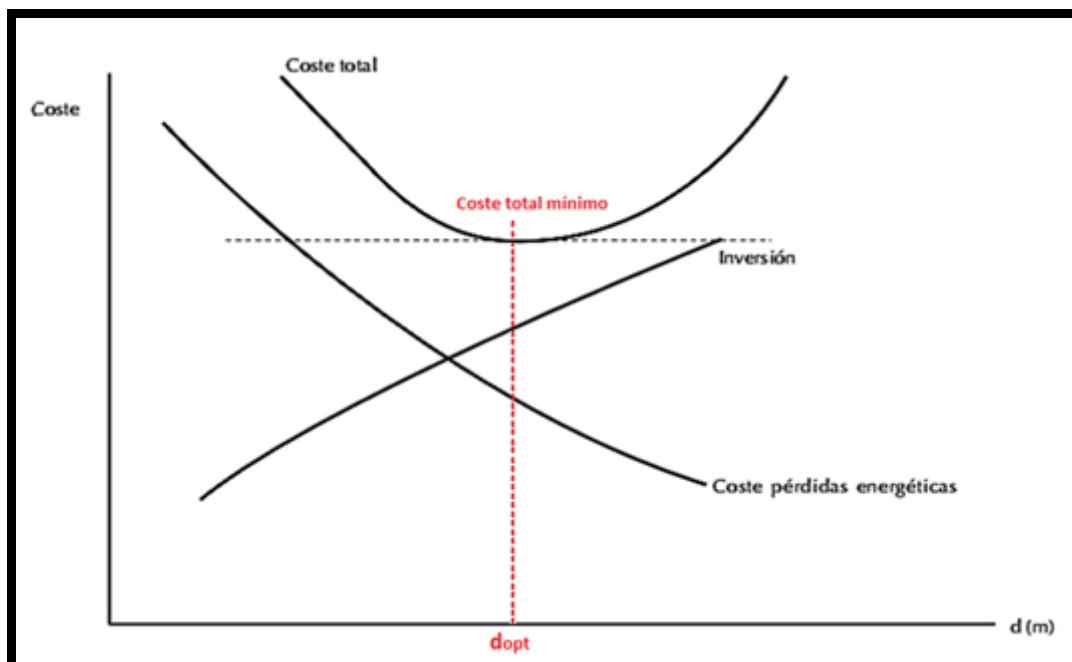
$C_c$ : Coeficiente de compactación del material aislante; [adimensional].

Para los materiales más comunes (lanas de vidrio), el coeficiente de compactación ( $C_c$ ) según Jichniakov (1976) posee valor de 1,6.

## PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DEL ESPESOR ÓPTIMO ECONÓMICO DE AISLAMIENTO

### 3.1. Introito

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 3.1), ya que el costo total será mínimo precisamente para el espesor óptimo económico (ISOVER, 2004a; ISOVER, 2004b; IDAE, 2007; CONUEE, 2008; CENER, 2012).



**Figura 3.1.** Método de selección del espesor óptimo económico de aislamiento.

**Fuente:** ISOVER, 2004a.

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

(Incropera y Dewitt, 2007; Bergman *et al.*, 2011). Estos autores recomiendan emplear la expresión 3.1, para calcular la pérdida de calor que se produce desde el interior al exterior de una tubería.

$$q_r = \frac{t_{\infty 1} - t_{\infty 2}}{R_T} \quad (3.1)$$

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 3.1 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.

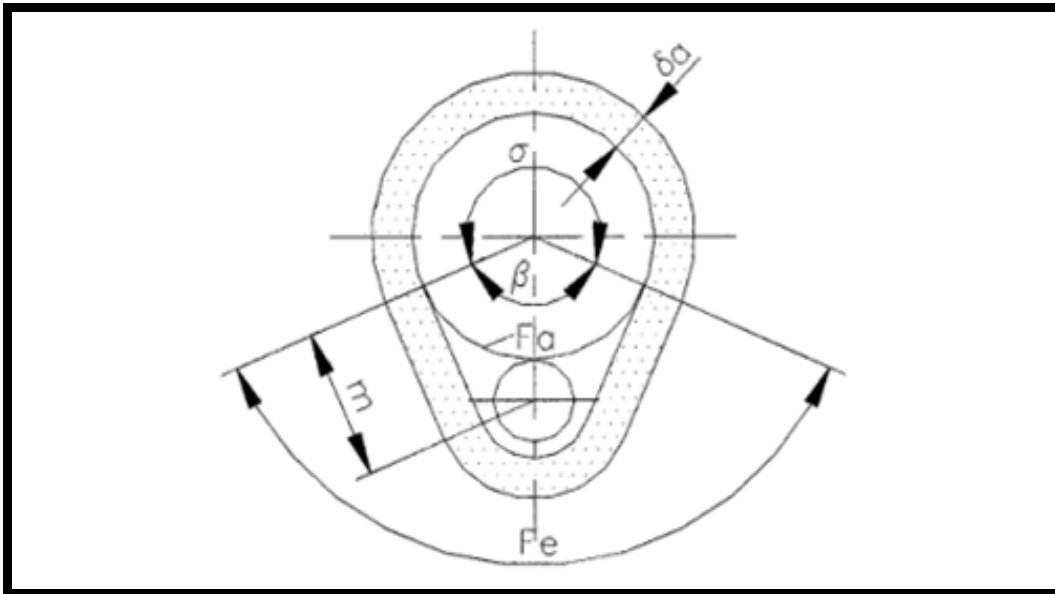
### **3.2. Espesores de aislamiento**

De acuerdo con las expresiones conocidas, ISOVER (2004a) 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; Zavattoni *et al.*, 2014; Haiqian *et al.*, 2012; Luamkanchanaphan *et al.*, 2014; Bomberg, 2013; 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.

### 3.3. 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 3.2 y 3.10, respectivamente.



**Figura 3.2.** 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 3.6) y la resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería (expresión 3.7), lo que limita la precisión de los modelos.

$$q^P = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_0}{R_p} \quad (3.2)$$

Siendo:

$$\theta = 360 - \beta \quad (3.3)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{2r_2 - 2r_A - 0,02}{2r_2 + 2r_A} \right) \quad (3.4)$$

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (3.5)$$

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} \quad (3.6)$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_P} \quad (3.7)$$

$$R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} \quad (3.8)$$

$$R_4 = \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \quad (3.9)$$

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].

$t_0$ : 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].

$$q^E = 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_C - t_O) \quad (3.10)$$

Siendo:

$$F_E = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m \quad (3.11)$$

$$m = \sqrt{(2r_2 - 0,01) \cdot (2r_A + 0,01)} \quad (3.12)$$

$$R_E = \frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2} \quad (3.13)$$

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].

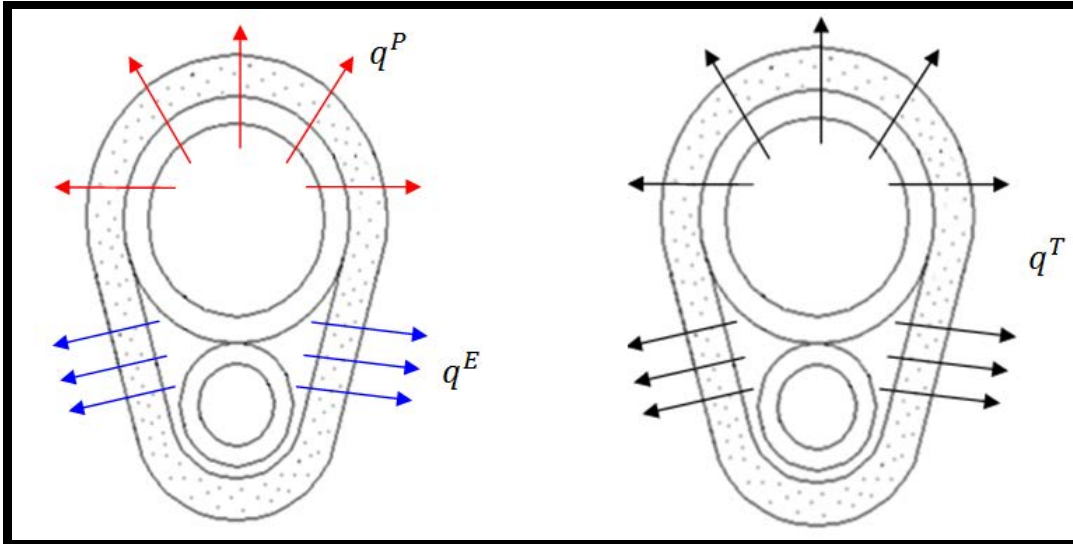
$m$ : Distancia entre los centros de la traza y la tubería principal; [m].

$\delta$ : 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 3.3), 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 3.3.** 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 3.14), lo cual constituye un modesto aporte en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, en instalaciones con este tipo de configuración.

$$q^T = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{\left( \frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \right)} + 1,25 \cdot \left[ \frac{\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m}{\frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2}} \right] \cdot (t_c - t_o) \quad (3.14)$$

Donde:

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

### 3.4. 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, 2004a). 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 3.15:

$$V = q^T \cdot E \cdot Z \cdot 10^{-3} \quad (3.15)$$

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].

### 3.5. 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 3.16) y se comparan con los incrementos que supone la inversión (ISOVER, 2004a).

$$V_A = V \cdot C_{VAN} \quad (3.16)$$

Siendo:

$$C_{VAN} = \frac{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \cdot \left[ \left( \frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \right)^n - 1 \right]}{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} - 1} \quad (3.17)$$

$$r = c - d \quad (3.18)$$

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; [%].

### 3.6. Incremento del ahorro

El conocido comportamiento que genera una disminución de las pérdidas energéticas al aumentar el espesor del material aislante (Patsis *et al.*, 2010; Zach *et al.*, 2013; Elsafty *et al.*, 2013; 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 3.19:

$$A = V_{A(\delta)} + V_{A(\delta+1)} \quad (3.19)$$

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].

### 3.7. 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 3.20 para determinar el incremento de la inversión en espesores consecutivos.

$$I_A = I_{(\delta+1)} - I_{(\delta)} \quad (3.20)$$

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].

### 3.8. 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 3.21:

$$A - I_A \approx 0 \quad (3.21)$$

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 3.22:

$$Ct = V_A + I \quad (3.22)$$

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, R; TORRES, R; MONTES, E. 2009. "Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpas orgánicas". *Revista de la Facultad de Agronomía*. Vol 26. No 3. Pág. 599-612.
- 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).
- BALAGUI, S; MOHAMMADIFAR, M; ZARGARAAN, A. 2010. "Physicochemical and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of iranian astragalus". *Journal of Food Biophys*. Vol 15. No 4. Pág 59-71.
- 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, L; 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.
- BOMBERG, M. 2013. "Glows and shadows of thermal insulation". *Frontiers of architectural research*. Vol 2. Pág.263-266.
- BOURBON, A; PINHEIRO, A; RIBEIRO, C; MIRANDA, C; MAIA, J; TEIXEIRA, J; VICENTE, A. 2010. "Characterization of galactomannans extracted from seeds of gleditsia triacanthos and sophorajaponica through shear and extensional rheology". *Journal of Food Hydrocolloid*. Vol 12. No 4. Pág.184-192.
- BYRON, R; STEWART, W; LIGHTFOOT, E. 1960. *Transport phenomena*. New York : JOHN WILEY & SONS. ISBN 0 471 07392 X.
- 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.
- CÁRDENAS, J; FONSECA, E. 2009. "Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiado desde la relación viscosidad y temperatura". *EIA*. Vol 12. No 2. Pág. 125-137.
- CENER R. 2005. El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> 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).
- DA SILVA, F; GUIMARAES, D; GASPARETTO, C. 2005. "Rheology of acerola juice, effects of concentration and temperature". *Science and Alimentary Technologic*. Vol 25. No 1. Pág.121-126.
- DAK, M; VERMA, R; JAAFFREY, S. 2007. "Effect of temperatures and concentration on rheological properties of kesar". *Journal of Food Engineering*. Vol 28. No 4. Pág. 1011-1015.
- DE ANGELIS, E; SERRA, E. 2014. "Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges". *Energy Procedia*. Vol 45. Pág. 362-371.

- DE LA PAZ, N. 2002. "Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida". *Revista Cubana de Farmacia*. Vol 36. No 1. Pág. 21-27.
- 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.
- EN 14114. 2002. *Hygrothermal Performance of Building Equipment and Industrial Installations – Calculations of Water Vapor Diffusion – Cold Pipe Insulation Systems*. European Committee for Standardization.
- EN ISO 15758. 2004. *Hygrothermal Performance of Building Equipment and Industrial Installations – Calculation of Water Vapor Diffusion – Cold Pipe Insulation Systems*. International Organization for Standardization.
- 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.
- FERRO, A. 2000. Estudio de la sustitución de las pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente P. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 78 Pág.
- FERRO, A; FALCÓN, J; TOLEDO, A. 2004. *Estudio de la posibilidad de sustitución de pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente p (Segunda Parte)*. *Tecnología Química*. Vol 24. No 1. Pág. 33-45.
- GARCELL, L; DÍAZ, A; SURÍS, G. 1988. *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana.
- GILBERT, A; PÉREZ, O; LAURENCIO H. 2012. Selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías con trazas de vapor bajo criterios técnicos, ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba. ISBN: 958-959-16-2067-5.14 Pág.
- GILBERT, A. 2012. Selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías con trazas de vapor bajo criterios técnicos y económicos. Tesis de grado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 56 Pág.
- GILBERT, A; LAURENCIO, H; TORRES, E; RODRÍGUEZ, I; RETIRADO, Y. 2013. *Espesor de aislamiento térmico para tuberías de transporte de combustible con trazas de*

- vapor. CINAREM´ 13, VII Conferencia internacional de aprovechamiento de recursos minerales. ISMM, Moa, Cuba, ISBN: 978-959-16-2244-0. 15 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; LAURENCIO, H; RETIRADO, Y; CHACÓN, Y; UTRIA, M. 2014. *Espesor óptimo económico de aislamiento térmico para tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor*, V ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba. 10 Pág.
- 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.
- HAIQIAN, Z; XIAOYAN, L; LIJUN, L; YONGNING, W; XIAOHUI, L; YING, Z. 2012. *Study on new thermal insulation construction of thermal recovery boiler*. *Energy Procedia*. Vol 16. Pág.1466-1471.
- HOLMAN, J. 1999. *Transferencia de Calor*. 8 ed. España, ISBN 84-481-2040-X.
- 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.
- IDAIE. 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.
- INCROPERA, F; DEWITT, D. 1999. *Fundamentos de la transferencia de calor*. 4 ed. México: Prentice Hall. 912 Pág.

- INCROPERA, F; DEWITT, D. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3 t. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- INFOTUB. 2013. *Aislamiento térmico de redes de tuberías plásticas. Cálculo del espesor (según RITE)*. 6 Pág.
- ISOVER 2004a. *Manual de aislamiento en la industria*. Madrid : Saint-Gobain Isover España. 148 Pág.
- ISOVER. 2004c. *Manual de conductos de aire acondicionado Climaver*. Madrid : Saint-Gobain Isover España. 128 Pág.
- ISOVER. 2004d. *Manual de aislamiento en la edificación*. Madrid : Saint-Gobain Isover España. 161 Pág.
- JENSEN, P; LØPPENTHIEN, 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.
- KERN, D. 1999. *Procesos de transferencia de calor*. 31 ed. México: Compañía Editorial Continental S.A.
- 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.
- LUAMKANCHANAPHAN, T; CHOTIKAPRAKHAN, S; JARUSOMBATI, S. 2012. "A study of physical, mechanical and thermal properties for thermal insulation from narrow-leaved cattail fibers". *APCBEE Procedia*. Vol 1. Pág.46- 52.
- LULIC, H; CIVIC, A; PASIC, M; OMERSPAHIC, A; DZAFEROVIC, E. 2014. "Optimization of thermal insulation and regression analysis of fuel consumption". *Procedia Engineering*. Vol 69. Pág.902-910.
- MANALS, M; FALCÓN, J. 2005. "Estudio de la estabilidad de la mezcla diesel-fuel-oil con productos de pirólisis". *Tecnología química*. Vol 25. No 2. Pág.53-61.
- 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 asfálticos". *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.
- 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.
- OTERO, L. 1989. *Fenómenos de transporte en metalurgia extractiva*. Editorial Alambra, Madrid, España.
- PAUL, C. 1978. "Effect of chemical structure on the conduction and breakdown of paraffin oil". *Indian Journal Technological*. Vol 8. No 1. Pág. 64-78.
- PARDAL, C. 2009. *La hoja interior de la fachada ventilada. Análisis, taxonomía y prospectiva*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica De Catalunya. 351 Pág.
- PATSI, G; PETROPOULOS, A; KALTSAS, G. 2010. "Modelling and evaluation of a thermal microfluidic sensor fabricated on plastic substrate". *Procedia Engineering*. Vol 5. Pág.1328-1331.
- 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.
- REID, C; SHERWOOD, K. 1966. *The properties of gases and liquids*. Mc. Graw-Hillbook Company, New York.
- ROMO, L. 1993. *Emulsiones*. Editorial Universitaria, Ecuador.

- ROMO, L. 1998. *Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua*. Petroecuador-ESPE, convenio 96-058.
- 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.
- WANG, M. 1991. *Permanent-magnet wax-proff device*. PATENT 5 024 271.
- ZACH, J; HROUDOVÁ, J; BROŽOVSKÝ, J; KREJZA, Z; GAILIUS, A. 2013. "Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems". *Procedia Engineering*. Vol 57. Pág.1288-1294.