

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

Tesis presentada en opción al título de
Máster en Metalurgia

**SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN
TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE CON
TRAZAS DE VAPOR**

Amauris Gilbert Hernández

MOA, 2015

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

Tesis presentada en opción al título de
Máster en Metalurgia

**SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN
TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE CON
TRAZAS DE VAPOR**

Autor: Prof. Asist., Ing. Amauris Gilbert Hernández.

Tutores: Prof. Aux., Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso, Dr. C.
Prof. Aux., Ing. Yoalbys Retirado Mediaceja, Dr. C.
Prof. Aux., Ing. Amaury Palacios Rodríguez, Dr. C.

MOA, 2015

Síntesis

En el trabajo se desarrolló un procedimiento para la selección del espesor de aislamiento térmico, en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor. Para lo cual se realizó una revisión bibliográfica, que estuvo dirigida a la determinación de las restricciones de las investigaciones precedentes, relacionadas con la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías, al ser aplicadas a los sistemas de transporte de combustible con trazas de vapor. Lo cual permitió la obtención de los modelos para el cálculo de la pérdida total de calor, la variación de temperatura del combustible en la tubería y el espesor de aislamiento térmico. Se emplearon dos criterios para la selección del espesor de aislamiento, uno con marcada incidencia técnica y otro que responde a elementos económicos; para ambos se determinó, que en la instalación analizada el espesor adecuado para lana de roca *TECH Wired Mat MT 6.1* es de 0,1 m, evidenciándose que para este espesor existe un aumento de la pérdida total de calor al incrementarse la temperatura del vapor, temperatura del petróleo y velocidad del viento, comportamiento opuesto al mostrado por la temperatura ambiente. Donde la pérdida total de calor asciende a los 27,147 W/m, reflejándose las mayores variaciones para la temperatura del combustible con 22,456 W/m y las menores variaciones para la temperatura del vapor con 1,458 W/m.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON LA SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN EL TRANSPORTE POR TUBERÍAS	6
1.1. Introducción.....	6
1.2. Breve reseña histórica.....	6
1.3. Análisis de los trabajos precedentes	7
1.3.1. Trabajos relacionados con la selección de espesor de aislamiento térmico	7
1.3.2. Trabajos relacionados con el transporte de petróleos pesados	11
1.4. Materiales aislantes.....	15
1.4.1. Funciones básicas del aislamiento térmico	15
1.4.2. Normativas de materiales aislantes	16
1.5. Aspectos de interés sobre los materiales aislantes.....	17
1.5.1. Clasificación de los materiales aislantes	17
1.5.2. Características de los termoaislantes	18
1.6. Criterios de selección del espesor de aislante	21
1.7. Mecanismos de transferencia de calor empleados en la selección del espesor de aislamiento térmico.....	23
1.8. Clases de combustibles cubanos	25
1.8.1. Efecto de la temperatura.....	27
1.9. Aplicación del transporte de combustibles por tuberías	27
1.9.1. Tuberías con trazas de vapor.....	28
1.9.2. Ventajas del transporte por sistemas de tuberías	29
1.10. Conclusiones del capítulo.....	30

2. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE CON TRAZAS DE VAPOR	31
2.1. Introducción.....	31
2.2. Selección del espesor técnico racional de aislamiento	32
2.2.1. Pérdida de calor desde la sección aislada de la tubería principal	32
2.2.2. Calor recibido por la tubería principal.....	37
2.2.3. Temperatura del aire en la cavidad.....	37
2.2.4. Espesor de aislamiento	40
2.3. Selección del espesor óptimo económico de aislamiento	42
2.3.1. Espesores de aislamiento	43
2.3.2. Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento.....	43
2.3.3. Valor de las pérdidas energéticas.....	44
2.3.4. Valor actualizado de las pérdidas	45
2.3.5. Incremento del ahorro	46
2.3.6. Incremento de la inversión del aislamiento	46
2.3.7. Espesor óptimo económico.....	47
2.3.8. Período de recuperación.....	47
2.4. Variación de la temperatura del combustible en la tubería.....	48
2.5. Conclusiones del capítulo.....	50
3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE CON TRAZAS DE VAPOR	51
3.1. Introducción.....	51
3.2. Descripción del proceso de trasiego: Caso de estudio.....	51

3.2.1. Caracterización e importancia de la instalación	52
3.3. Principales mediciones realizadas	52
3.4. Propiedades termofísicas del Crudo mejorado 650.....	54
3.5. Validación de los modelos en instalación a escala industrial	56
3.5.1. Variación de la temperatura del combustible en la tubería.....	57
3.6. Estimación del espesor técnico racional de aislamiento	59
3.7. Análisis de sensibilidad	61
3.7.1. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura del vapor	61
3.7.2. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura del petróleo	63
3.7.3. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la temperatura ambiente	65
3.7.4. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la velocidad del viento.....	66
3.8. Estimación del espesor óptimo económico de aislamiento	69
3.8.1. Tiempo de recuperación de la inversión	72
3.9. Impacto económico	74
3.10. Impacto ambiental	75
3.11. Conclusiones del capítulo.....	77
CONCLUSIONES GENERALES	78
RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	I

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.

Situación problemática

Tras el empleo de los crudos mejorados para la generación de energía en las empresas termoeléctricas cubanas, los sistemas de transporte de combustible han sufrido alteraciones que generan ineficiencia en su funcionamiento; debido, fundamentalmente a la alta viscosidad de estos combustibles a temperatura ambiente, ocasionado por el deficiente régimen térmico de las instalaciones para estas nuevas condiciones de explotación.

El empleo de trazas de vapor ha resultado una solución tentativa a este problema técnico; sin embargo, la inadecuada selección de aislamiento térmico, esencialmente la elección de su espesor, debido a la complejidad de la configuración de estos sistemas, ha provocado que estas dificultades persistan en numerosas empresas, incluyendo la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez de Felton.

Problema de investigación

El insuficiente conocimiento del comportamiento de las trazas de vapor en los sistemas de transporte de combustible por tuberías, que limita la adecuada selección del espesor de aislamiento térmico en estas instalaciones.

Objeto de estudio

Los sistemas de transporte de combustible por tuberías con trazas de vapor.

Campo de acción

La selección de espesores de aislamiento térmico en los sistemas de transporte de combustible por tuberías con trazas de vapor.

Objetivo general

Desarrollar un procedimiento para la selección del espesor de aislamiento térmico, en los sistemas de transporte de combustible por tuberías con trazas de vapor.

Hipótesis

La incorporación de las propiedades termofísicas y de flujo del combustible trasegado, y las particularidades geométricas en el análisis energético de los sistemas de transporte con traza de vapor, conjugada con la aplicación de las teorías básicas de la transferencia de calor; permitirá generar el conocimiento necesario para el desarrollo de un procedimiento que posibilite la selección del espesor de aislamiento térmico, basado en criterios técnicos y económicos.

Objetivos específicos

- A.** Determinar las restricciones de las investigaciones precedentes relacionadas con la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías, al ser aplicadas a los sistemas de transporte de combustible con trazas de vapor.
- B.** Establecer un procedimiento que relacione las propiedades termofísicas del combustible trasegado, con las particularidades geométricas de un sistema de transporte por tubería con trazas de vapor.
- C.** Calcular los parámetros que posibiliten la selección del espesor de aislamiento térmico, mediante la implementación del procedimiento a un caso de estudio.

Tareas

- A1.** Fundamentación del estado del arte en relación con las teorías y los modelos del espesor de aislamiento térmico, a partir de la sistematización del conocimiento científico expuesto en las investigaciones precedentes.

A2. Exposición un sistema gnoseológico actualizado sobre:

- Los criterios de selección del espesor de material aislante en los sistemas de transporte por tubería.
- El transporte de combustibles por tuberías.

B1. Establecimiento de ecuaciones para el cálculo de:

- Pérdida total de calor.
- Variación de temperatura del combustible en la tubería.
- Espesor de aislamiento.

B2. Desarrollo de un procedimiento para la obtención de:

- El espesor técnico racional de aislamiento.
- El espesor óptimo económico de aislamiento.

C1. Establecimiento del comportamiento del espesor de aislamiento térmico en función de los parámetros fundamentales del proceso de transporte.

C2. Valoración de los impactos técnicos, económicos y ambientales asociados a la selección del espesor de aislamiento térmico.

Métodos de investigación

Histórico-lógico: para la actualización del estado del arte relacionado con las vías, técnicas y procedimientos empleados para seleccionar el espesor de aislamiento térmico.

Sistémico: para el procesamiento del conocimiento científico que resulta de interés, en relación con los procedimientos de selección de espesor de aislamiento térmico.

Inductivo-deductivo: para la determinación de las limitaciones de las investigaciones precedentes, al ser aplicadas a una instalación con trazas de vapor.

Modelación físico-matemática: para el establecimiento de los modelos, basado en las particularidades geométricas de una instalación con trazas de vapor.

Experimental: para la obtención de los datos experimentales necesarios, la adecuación y validación de los modelos.

Computacional: para el cálculo de parámetros, la creación de gráficos y figuras, que favorecen la explicación y el entendimiento del procedimiento.

Búsqueda exhaustiva: para la selección iterativa del espesor técnico racional de aislamiento térmico.

1. MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON LA SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN EL TRANSPORTE POR TUBERÍAS

1.1. Introducción

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

El objetivo del presente capítulo es: exponer los fundamentos teóricos de la selección de espesor de aislamiento térmico, a partir de la sistematización del conocimiento científico de la literatura consultada.

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, conteniendo 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. Análisis de los trabajos precedentes

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 al tema plantean [Tejela y San Martín \(2010\)](#) que cuanto mayor es la temperatura de transporte de una instalación, mayor aislamiento térmico debe emplearse; sin embargo, al considerar que esto no es viable por razones económicas y de ocupación de espacio, se han producido una serie de materiales que, con un espesor mínimo garanticen estas condiciones.

La existencia de un espesor óptimo de aislamiento para los sistemas radiales, es explicada por la presencia de efectos inversos asociados con un incremento del espesor. Aunque en la conducción la resistencia aumenta con el espesor de aislamiento, la resistencia por convección decrece debido al área de la creciente superficie exterior. Por tanto el espesor óptimo de aislamiento es aquel que minimiza la pérdida de calor maximizando la resistencia térmica total ([Incropera y Dewitt, 1999, 2007](#); [Bergman et al., 2011](#)). Aunque el trabajo de estos autores realiza un riguroso análisis térmico, ha sido poco acogido por la comunidad científica, por no responder a criterios específicos en la selección del espesor de aislamiento térmico.

Son de relevante importancia los trabajos realizados por [Laurencio y Delgado \(2008a\)](#) 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 Poiseulle, interesado en la circulación de la sangre. Sobresalieron también en el aspecto teórico Julios Weibach y Gottlieb Hagen, y se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Ventura y Pitot entre otros ([Otero, 1989](#); [Laurencio, 2007](#); [Ochoa, 2011](#)).

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 reológicos y dieléctricos se pueden considerar como los más conocidos y eficaces para estudiar los petróleos parafínicos y asfálticos ([Maruska y Rao, 1987](#)).

En los últimos años las herramientas aplicadas al estudio, caracterización y control de crudos asfálticos y parafínicos, aparecen como técnicas altamente promisorias mediante la aplicación de campos eléctricos y magnéticos, ya sea por separado o combinadas sus acciones con el efecto de la temperatura. El comportamiento electrorreológico de los petróleos crudos, debido a la presencia de asfaltenos, es un campo que puede desentrañar algunas características aún desconocidas de estos últimos; la aplicación de campos eléctricos en petróleos con contenido de agua puede acelerar el rompimiento entre el enlace de fases dispersas y continuas ([Mechetti et al., 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 y Zapana \(2000a\)](#); [Mechetti y Zapana \(2000b\)](#), y [Mechetti et al. \(2000\)](#), presentan resultados de estudios del comportamiento reológico de petróleos crudos asfálticos a diferentes temperaturas y bajo la acción del campo eléctrico. Investigaron el comportamiento viscosimétrico de un petróleo crudo argentino de baja viscosidad con 7 % de contenido de asfaltenos; donde encuentran una dilatancia atípica para un crudo de baja viscosidad relativa y también una anomalía termorreológica (mayor viscosidad para una mayor temperatura), resultados análogos a los planteados por [Ferro et al. \(2004\)](#). La dilatancia mostrada se explica por la presencia de partículas cargadas en suspensión coloidal, lo que podría atribuírsele en este caso a la presencia de asfaltenos.

Por otro lado [Mechetti et al. \(2001\)](#) llevaron a cabo estudios electrorreológicos de petróleos crudos y emulsiones; 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

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

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

Tabla 1.1. Aislantes térmicos normalizados en Europa.

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

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

-
- Su origen
- Aislantes de origen animal o vegetal
 - Aislantes de origen mineral
 - Productos de síntesis

- Aislantes pulverulentos
- Aislantes fibrosos

Su estructura

➤ de origen animal

- Espumas
 - sintéticas
 - aglomeradas

Su temperatura

- Aislantes refractarios
- Aislantes semirrefractarios
- Aislantes ordinarios

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 isotrópica 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
• Cábamo	• Vidrio expandido
• Virutas de madera	• Poliestireno expandido

Tabla 1.2. Materiales empleados como aislantes térmicos (continuación).

• 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/m³, 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/m³. Presenta baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta resiliencia, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se debe recubrir

contra la intemperie y evitar la exposición al trabajo mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 728 K (455 °C).

Lana de roca

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

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

Con aceites minerales que evitan abrasión entre fibras y que dan lugar a mantas. Su densidad comercial usual es de 96 a 144 kg/m³. 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/m³. 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^3 . 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 radiactiva exterior.

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

Es quizás uno de los criterios más acertados, no obstante hay que destacar que en tuberías pequeñas el cambio de los coeficientes de convección por el exterior es crítico. Por lo tanto este criterio puede parecer acertado para tuberías con un diámetro superior a 10 cm . El proceso de cálculo es idéntico al anterior no obstante, el cálculo se debe

realizar dos veces, uno sin la existencia de aislamiento y otro partiendo del flujo de calor que finalmente se desea intercambiar, el cual se obtiene del flujo de calor anterior y el porcentaje asignado. Partiendo de este valor se obtiene el espesor de aislamiento.

Para limitar una resistencia térmica o un coeficiente global de transmisión de calor

Las ecuaciones utilizadas para esta aplicación están en función de la geometría analizada, de las cuales se deben despejar el espesor de aislamiento. Señalar que en el caso de tuberías el procedimiento es necesariamente iterativo, ya que el radio exterior aparece en ambos términos de la ecuación ([ISOVER, 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; [m²].

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_∞ , 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_∞ : Coeficiente de transferencia de calor por convección; [W/m²·K].

T_∞ : 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; [m²].

σ : Constante de Stefan-Boltzman; $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m² · K⁴.

ε_1 ; ε_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 (Anexo 1) 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 a los análisis hechos, la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura. En la práctica, la aplicación del efecto de la temperatura para la disminución de la viscosidad del combustible es el método de mayor aplicabilidad (Laurencio y Delgado, 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.

1.10. Conclusiones del capítulo

- La literatura es abundante en relación con las vías empleadas para la selección de espesor de aislamiento térmico. Sin embargo resultan limitadas las investigaciones consultadas, que muestren procedimientos para seleccionar el espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor.
- En la literatura científica examinada no se consideran las características de transporte en la selección del espesor de aislamiento térmico, y no se realiza un análisis riguroso al no tratar las cualidades específicas de los fluidos transportados.
- Quedó establecido el marco teórico relacionado con la selección de espesor de aislamiento térmico, en el transporte por tuberías. El mismo contiene los criterios más significativos sobre los trabajos precedentes, características de los materiales aislantes, criterios para su selección y las principales ventajas de su uso en el trasiego.

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

2.1. Introducción

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

En tal sentido se define como **objetivo** del capítulo establecer, para sistemas que trasiegan combustible con trazas de vapor, los modelos matemáticos de: selección del espesor de aislamiento térmico, pérdida total de calor y variación de temperatura del combustible en la tubería.

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.

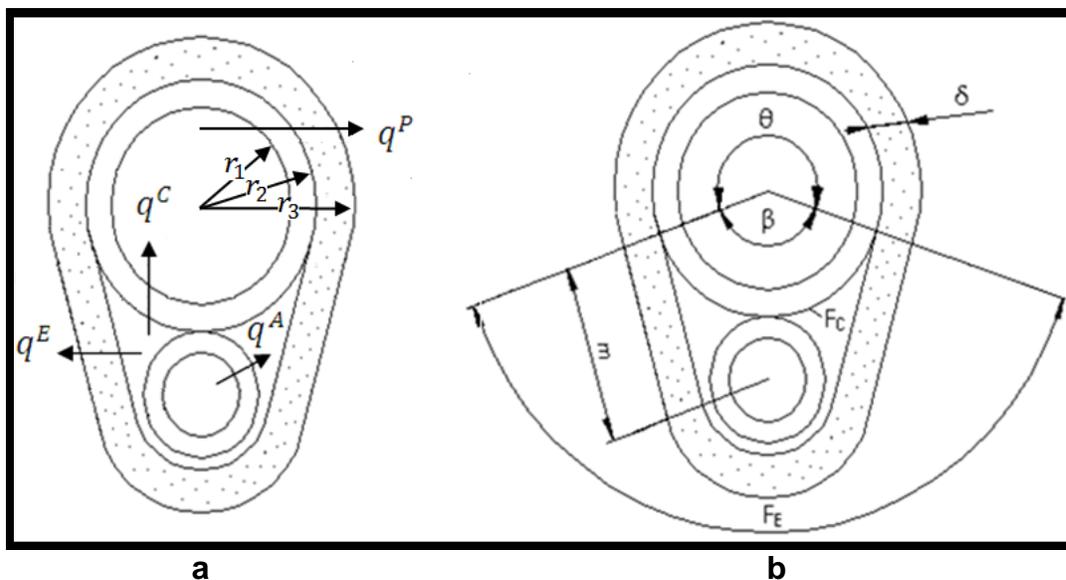


Figura 2.1. Vista frontal de una tubería con traza de vapor.

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].

θ : 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].

β : 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/m²·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/m²·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].

ρ : Densidad del fluido; [kg/m³].

μ : 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](#)).

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

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/m²·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; [m²/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; [m²·K/W].

h_4 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la traza de vapor hasta el aire en la cavidad; [W/m²·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^2/m].

R_C : Resistencia térmica por convección desde el aire en la cavidad termoaislada a la tubería principal; [$m^2 \cdot K/W$].

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:

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

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^2/m].

R_E : Resistencia térmica desde el aire en la cavidad termoaislada al exterior; [$m^2 \cdot K/W$].

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

δ : 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/m²·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/m²·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 de aislamiento

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:

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

- r₂ (2.34)

Para determinar el valor de t_c y δ 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:

$$r_3' = r_2 + \delta \tag{2.35}$$

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

$$r_3' = 0,5 \cdot (r + r_3') \tag{2.36}$$

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%.

$$\frac{r_3' - r_3}{r_3} \cdot 100 \leq 1 \% \tag{2.37}$$

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:

$$\delta_o = \delta \cdot Cc \cdot \frac{2r_2 + \delta}{2r_2 + 2 \cdot \delta} \tag{2.38}$$

Donde:

δ_o : Espesor de aislamiento térmico antes de ser instalado; [m].

Cc : 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.

2.3. Selección del espesor óptimo económico de aislamiento

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

La determinación de un espesor de aislamiento adecuado obedece en algunos casos a condiciones exclusivamente técnicas, pero la mayor parte de las inversiones en aislamiento tienen un carácter económico. Por ello es necesario introducir conceptos económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor (Figura 2.2), ya que el costo total será mínimo precisamente para el espesor óptimo económico ([ISOVER, 2004a](#); [ISOVER, 2004b](#); [IDAE, 2007](#); [CONUEE, 2008](#)).

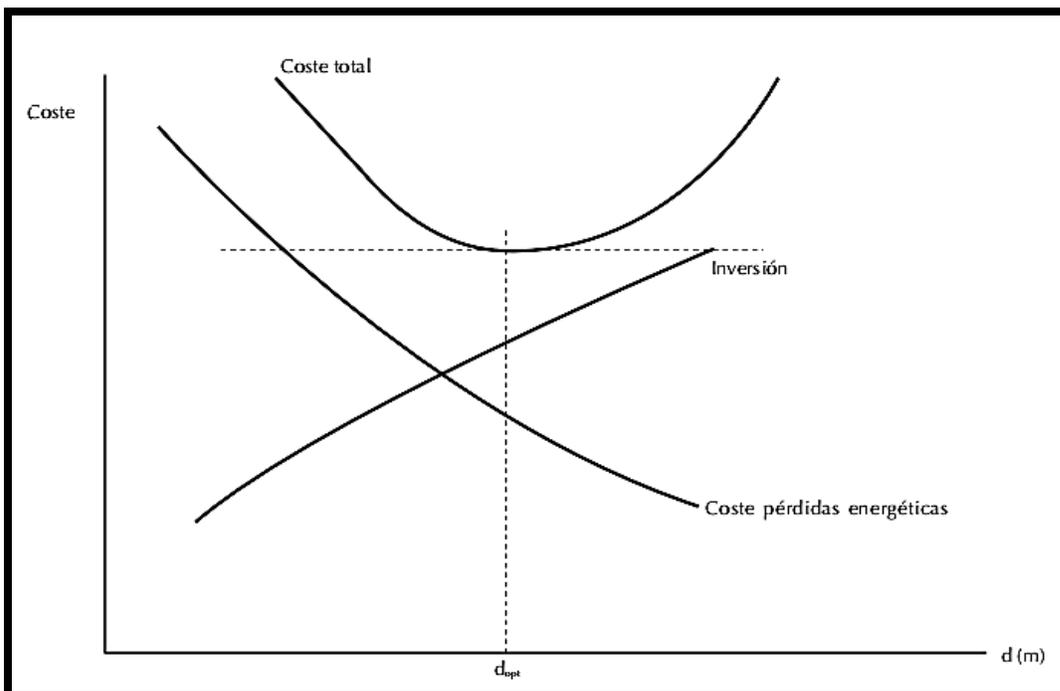


Figura 2.2. Método de selección del espesor óptimo económico de aislamiento.

Fuente: [ISOVER, 2004a](#).

2.3.1. 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 (Figura 2.3), 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.

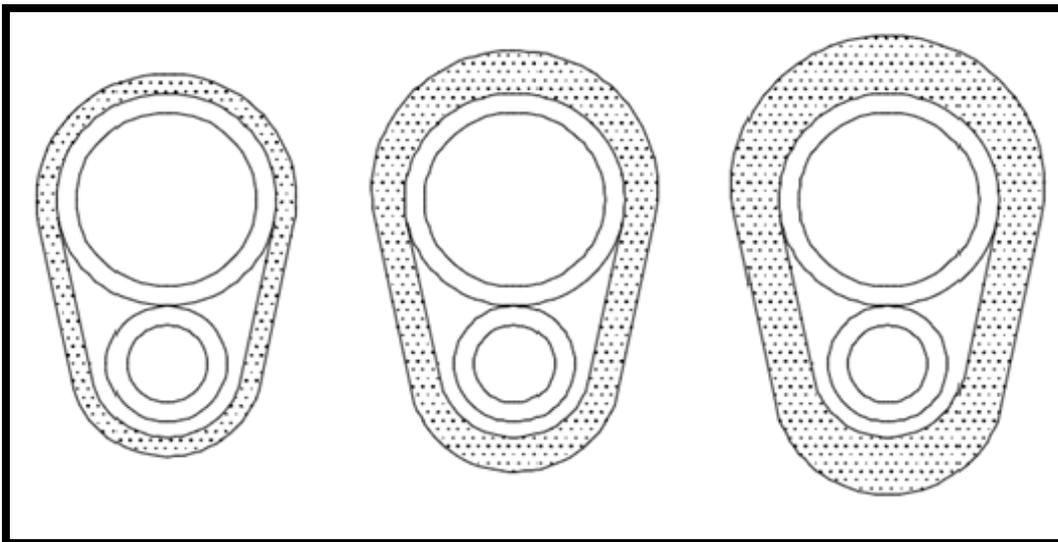


Figura 2.3. Incremento del espesor de aislamiento en una instalación con traza de vapor.

2.3.2. Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento

Según [Monteagudo \(1998\)](#) la pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior y la cantidad de calor disipada por la parte restante de la superficie del aislamiento, se pueden determinar por las expresiones 2.2 y 2.27, respectivamente. Sin embargo, las consideraciones realizadas por el mismo excluye la resistencia térmica por convección desde el fluido a la pared interior de la tubería principal (expresión 2.5) y la resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería (expresión 2.6), lo que limita la precisión de los modelos.

Al respecto, Gilbert (2014) plantea que en una instalación con traza de vapor (Figura 2.4), la pérdida total de calor (q^T) está fraccionada entre las pérdidas a través de la sección aislada de la tubería principal (q^P) y la cavidad termoaislada (q^E).

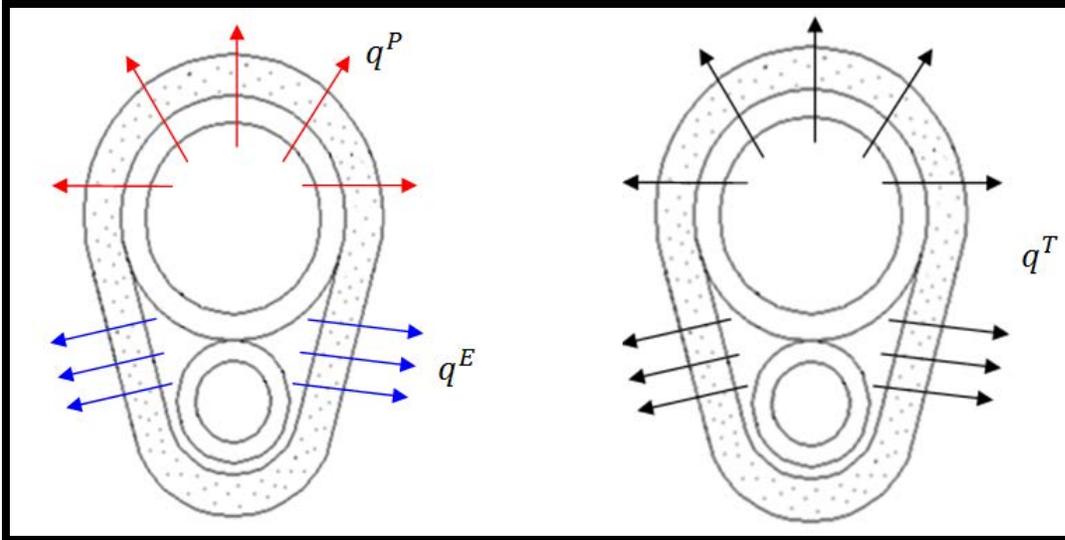


Figura 2.4. Pérdidas de calor en una instalación con traza de vapor.

De los criterios anteriores se infiere que es posible emplear un modelo único que integre las expresiones anteriores y permita determinar la pérdida total de calor en una instalación con trazas de vapor (expresión 2.39), lo cual constituye un modesto aporte en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, en instalaciones con este tipo de configuración.

$$q^T = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{\left(\frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \right)} + 1,25 \cdot \left[\frac{\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m}{\frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2}} \right] \cdot (t_c - t_o) \quad (2.39)$$

Donde:

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

2.3.3. 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 2.40:

$$V = q^T \cdot E \cdot Z \cdot 10^{-3} \quad (2.40)$$

Donde:

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

E : Costo de la energía; [CUP/kW·h].

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

2.3.4. 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 y se comparan con los incrementos que supone la inversión (ecuación 2.41).

$$V_A = V \cdot C_{VAN} \quad (2.41)$$

Siendo:

$$C_{VAN} = \frac{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \cdot \left[\left(\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \right)^n - 1 \right]}{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} - 1} \quad (2.42)$$

$$r = c - d \quad (2.43)$$

Donde:

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

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

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

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

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

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

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

2.3.5. 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; De 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 2.44:

$$A = V_{A(\delta)} + V_{A(\delta+1)} \quad (2.44)$$

Donde:

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

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

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

2.3.6. Incremento de la inversión del aislamiento

El aumento del espesor de aislamiento térmico, genera incremento de la inversión para su compra e instalación, aunque esto no posee leyes determinadas de crecimiento; se puede emplear la expresión 2.45 para determinar el incremento de la inversión en espesores consecutivos (ISOVER, 2004a).

$$I_A = I_{(\delta+1)} - I_{(\delta)} \quad (2.45)$$

Donde:

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

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

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

Para:	0,04 m de espesor	11,05 CUC/m
	0,05 m de espesor	13,65 CUC/m
	0,06 m de espesor	15,35 CUC/m
	0,07 m de espesor	17,55 CUC/m
	0,08 m de espesor	19,70 CUC/m
	0,10 m de espesor	23,05 CUC/m
	0,12 m de espesor	25,45 CUC/m

Fuente: [ISOVER, 2015](#).

2.3.7. Espesor óptimo económico

El espesor óptimo económico se corresponde a aquel que brinda el valor que tiende a cero, estableciendo la diferencia entre el incremento del ahorro (A) y el incremento de la inversión (I_A), condición que debe ser comprobada según la expresión 2.46:

$$A - I_A \approx 0 \quad (2.46)$$

Este modo de selección permite equilibrar ambos costos, empleando el aislamiento cuyo espesor minimice el costo total (Ct), lo cual puede ser comprobado mediante la ecuación 2.47:

$$Ct = V_A + I \quad (2.47)$$

2.3.8. Período de recuperación

Está dado por el número esperado de años necesarios para que se recupere una inversión original. La cantidad total requerida para recuperar el monto original invertido, incluye también la fracción de un año en caso que sea apropiado ([Weston y Brigham, 2009](#)).

$$P_R = A_A + \frac{C_N}{F_R} \quad (2.48)$$

Donde:

P_R : Período de recuperación; [año].

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

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

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

2.4. Variación de la temperatura del combustible en la tubería

Para conocer las variaciones de temperatura durante el transporte de combustible, [Laurencio \(2010\)](#) realizó una modelación del proceso, considerando la configuración de la instalación (sistema radial), las propiedades de los materiales y el combustible trasegado; planteando para dicho medio la expresión 2.49, siendo esta una modificación de lo obtenido por [Moring \(2006\)](#).

$$t_i - t_f = \frac{q_s}{Q \cdot \rho \cdot C_p} \quad (2.49)$$

Siendo:

$$\Delta t = t_i - t_f \quad (2.50)$$

Donde:

t_i : Temperatura inicial del combustible al ingresar a la tubería; [K].

t_f : Temperatura final del combustible al salir de la tubería; [K].

q_s : Calor transferido desde el interior al exterior de la tubería; [W/m].

Q : Flujo de combustible trasegado; [m³/s].

ρ : Densidad del combustible trasegado; [kg/m³].

C_p : Capacidad calorífica del combustible; [J/kg·K].

Δt : Variación de temperatura del combustible en la tubería; [K/m].

A presión constante se puede obtener el valor de la capacidad calorífica mediante la expresión 2.51, para el rango experimental en el que fue obtenido (303 a 343 K), manifestando una tendencia creciente con el aumento de la temperatura ([Laurencio, 2012](#)).

$$C_p = 8,56 \cdot (t_p - 273) + 1483 \quad (2.51)$$

Aunque en la práctica se han mostrados resultados satisfactorios, la expresión 2.49 en su forma original no es aplicable para determinar la variación de temperatura a lo largo de una instalación que emplee trazas de vapor (Figura 2.5), al solo considerar el calor transferido por sistemas radiales y no otro tipo de configuración.

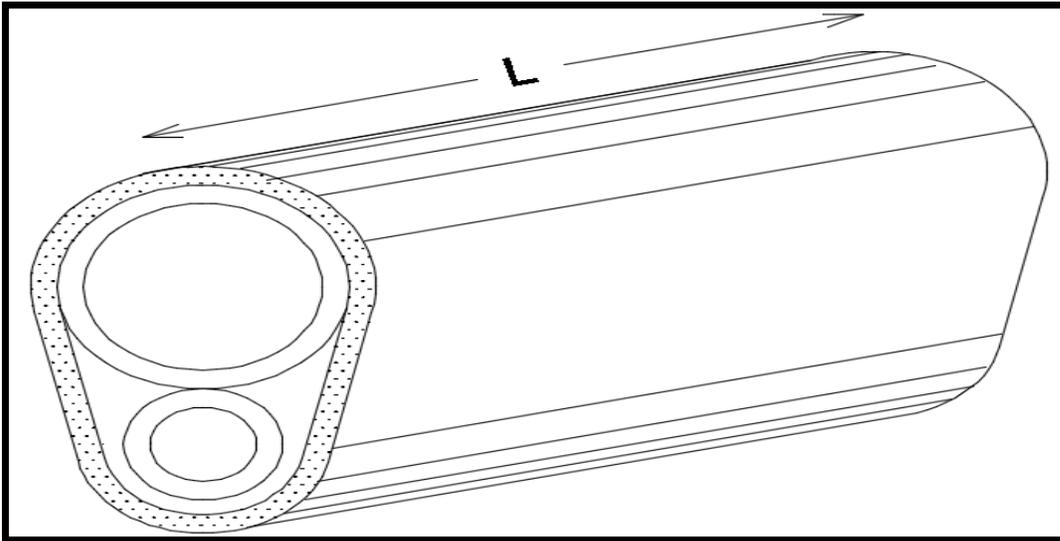


Figura 2.5. Sección de una instalación con trazas de vapor.

De ahí que sea necesario realizar transformaciones que permitan considerar el calor total transferido por una instalación con trazas de vapor, en tal sentido se sustituye la ecuación 2.39 en la 2.49 y se obtiene la 2.52.

$$t_i - t_f = \frac{\frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{\left(\frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \right)} + 1,25 \cdot \left[\frac{\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m}{\frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2}} \right] \cdot (t_c - t_o)}{Q \cdot \rho \cdot C_p} \quad (2.52)$$

Al sustituir las ecuaciones 2.15, 2.19, 2.50 en 2.52 y realizar las transformaciones pertinentes, se obtiene el modelo apropiado para el cálculo de la variación de temperatura del combustible en tuberías con trazas de vapor (expresión 2.53). En esta ecuación se introduce como elemento novedoso, la incorporación de la ganancia de calor aportada por la traza en la disminución del gradiente de temperatura.

$$\Delta t = \frac{\theta \cdot (t_p - t_o)}{Q \cdot \rho \cdot C_p \cdot \left[360 \cdot \left(\frac{1}{0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \cdot \frac{k_c}{D_i} \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} + \frac{1}{0,245 \cdot Re^{0.6} \cdot \frac{k}{D} \cdot 2\pi \cdot r_3} \right) \right]} - \frac{1,25 \cdot F_E \cdot (t_c - t_o)}{Q \cdot \rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{0,245 \cdot Re^{0.6} \cdot \frac{k}{D}} \right)} \quad (2.53)$$

2.5. Conclusiones del capítulo

- La expresión 2.34 constituye el modelo matemático para el cálculo y la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías de trasiego de petróleo crudo (CM-650) con trazas de vapor. La misma es función, fundamentalmente, del ángulo sobre el cual se dispone el aislamiento en la tubería principal, el ángulo de incidencia del calor, la temperatura del combustible, la temperatura del vapor, la temperatura ambiente y las conductividades térmicas de la tubería y el material aislante.
- La expresión 2.39 es el modelo que posibilita el cálculo de la pérdida total de calor en una instalación con trazas de vapor, se obtiene de la integración de las expresiones de pérdidas establecidas para la parte aislada de la tubería principal y la cavidad termoaislada. La misma está particularizada para instalaciones de configuración similar a la objeto de estudio.
- Queda establecido el modelo (expresión 2.53) que permite determinar la variación de la temperatura del combustible en la tubería. El mismo considera propiedades termofísicas y de flujo del combustible trasegado, e incorpora como elemento novedoso la ganancia de calor aportada por la traza de vapor.

3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE ESPESOR DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE CON TRAZAS DE VAPOR

3.1. Introducción

En los capítulos precedentes fueron establecidos las teorías y los modelos que dieron paso a la conformación del procedimiento, para la selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor. Para mostrar la validez de dicho procedimiento se torna imprescindible demostrar sus resultados en la práctica, aplicándolo a una instalación con estas características.

En tal sentido se define como objetivo del capítulo: Implementar el procedimiento desarrollado a un caso de estudio y realizar la valoración de los resultados, los beneficios económicos y el impacto ambiental asociado.

3.2. Descripción del proceso de trasiego: Caso de estudio

La función principal de la base de combustible (CUPET) enclavada en la comunidad de Felton es, almacenar y trasegar la cantidad de petróleo necesario para mantener el proceso de generación de energía en la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez. La base posee como medio de almacenamiento tres tanques, destinados a la acumulación de Fuel oil y el combustible nacional Crudo Mejorado 650. En los tanques el combustible es calentado a través de serpentines, con el fin de suministrarle calor, disminuir su viscosidad e incrementar su fluidez, lo cual se logra debido a la naturaleza reológica del hidrocarburo.

Para lograr estabilidad en la temperatura del combustible el proceso de calentamiento continúa en la fase de trasiego a través de las trazas (línea de acompañamiento), el vapor que circula internamente por ella es suministrado desde los generadores de la empresa termoeléctrica. La temperatura y cantidad de vapor, así como su contenido energético definen la temperatura y las condiciones del trasiego del combustible. El Crudo Mejorado 650 ingresa en el oleoducto y transita en sentido contrario al vapor que es suministrado para su calentamiento, ambas tuberías están unidas entre sí y se encuentran aisladas en conjunto. Debido a la alta viscosidad del combustible se utilizan bombas de tornillos (dos) conectadas en paralelo.

3.2.1. Caracterización e importancia de la instalación

El transporte del Crudo Mejorado 650 a la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez a través del oleoducto, garantiza el suministro de combustible para su quema y permite el trabajo continuo de dos unidades generadoras con una potencia instalada de 250 MW cada una. Con la energía generada se abastecen a las principales empresas del oriente cubano, entre las que resaltan las industrias metalúrgicas del nordeste de Holguín, y la zona turística de Guardalavaca, constituyendo estas uno de los principales renglones económicos de la economía nacional.

A través de la instalación se trasiegan el Fuel oil y el Crudo Mejorado 650 que garantizan la puesta en marcha y funcionamiento de la termoeléctrica. El buen funcionamiento de la instalación, así como las mejoras que se le puedan incorporar resulta vital, constituyendo esta la vía de abastecimiento del 100 % del combustible que proveen los servicios de la empresa, motivo por el cual debe mantenerse bajo un régimen adecuado de explotación.

Tabla 3.1. Principales características de la instalación.

Parámetro	Valor	UM
Diámetro interior de la tubería principal	0,42	m
Espesor de la tubería principal	0,013	m
Diámetro interior de la traza de vapor	0,025	m
Espesor de la traza de vapor	0,003	m
Longitud total de la instalación	3 200	m
Conductividad térmica de las tuberías	60,5	W/m·K
Flujo de combustible trasegado	0,044	m ³ /s
Tiempo de funcionamiento promedio	767	h/año

3.3. Principales mediciones realizadas

La selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor resulta un proceso complejo, de ahí que se torne necesaria la obtención de los principales parámetros de trabajo que la caracterizan, siendo este un proceso que depende de muchas variables, fundamentalmente de la temperatura del combustible y de la

temperatura del vapor que circula por la traza. Los valores de operación de la instalación fueron obtenidos a partir del uso de un sistema SCADA, específicamente por el programa EROS versión 5.10.0.22 (temperatura de entrada del combustible y temperatura del vapor), además se realizaron mediciones puntuales de las variables (temperatura de salida del combustible) en puntos de medición donde el sistema no registra datos.

Es conocido que en las instalaciones de gran responsabilidad socioeconómica, resulta complejo variar un parámetro para determinar su influencia en otras variables del proceso, considerándose un método invasivo que en algunos casos llega a afectar de alguna manera la producción de la entidad. Para el caso del proceso de selección de espesor de aislamiento térmico en el oleoducto que suministra el combustible a la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez de Felton, las mediciones se realizaron para 25 ciclos de bombes consecutivos, considerándose para el análisis los resultados promedios de los ciclos durante la operación, expuestos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Temperaturas registradas en la instalación.

Ciclos	t_p [K]		t_v [K]
	<i>entrada</i>	<i>salida</i>	
1	333	325	523
2	313	309	493
3	320	315	508
4	332	324	522
5	316	311	503
6	318	313	506
7	313	309	496
8	328	321	517
9	329	322	519
10	323	317	510
11	329	322	519
12	323	316	511
13	324	318	512

Tabla 3.2. Temperaturas registradas en la instalación (continuación).

14	325	319	512
15	313	309	493
16	327	320	515
17	333	324	523
18	329	322	517
19	323	317	511
20	322	316	510
21	331	323	519
22	316	311	502
23	321	315	508
24	326	319	513
25	333	324	523

3.4. Propiedades termofísicas del Crudo mejorado 650

En la selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor, se consideraron las propiedades termofísicas del carburante trasegado. En la Tabla 3.3 se relacionan los valores obtenidos de viscosidad dinámica (μ), densidad (ρ), conductividad térmica (kc), Prandtl (Pr) y capacidad calorífica (C_p) del Crudo Mejorado 650, calculadas mediante las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.16, 2.17 y 2.51 del capítulo 2 respectivamente. Las referidas ecuaciones han sido validadas y utilizadas con éxito en múltiples investigaciones precedentes relacionadas con el transporte eficiente de este tipo de combustible (Laurencio y Delgado, 2008; Laurencio, 2007, 2010, 2012 y Pérez, 2013).

Tabla 3.3. Propiedades termofísicas del Crudo Mejorado 650.

t_p K (°C)	μ Pa·s	ρ kg/m ³	kc W/m·K	Pr	C_p J/kg·K
313 (40)	4,933	983,890	1,439	5253,062	1825,4
314 (41)	4,665	983,702	1,4377	4976,166	1833,96

Tabla 3.3. Propiedades termofísicas del Crudo Mejorado 650 (continuación).

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

3.5. Validación de los modelos en instalación a escala industrial

En el capítulo precedente se establecieron los modelos teóricos que permiten estimar el espesor de aislamiento térmico, la pérdida total de calor y la variación de temperatura del combustible en la tubería, para una instalación con trazas de vapor. Sin embargo es necesario comprobar en qué medida los mismos permiten describir el proceso real, razón por la cual los modelos matemáticos deben ser validados.

Plantea [Retirado \(2012\)](#) que la validación de los modelos tiene gran importancia porque permite conocer con qué precisión los mismos se corresponden con la realidad física del proceso investigado, planteamiento que es corroborado por varios autores ([Góngora et al., 2007, 2008](#); [Bombino et al., 2010](#); [Brito-Vallina et al., 2011](#)). Dicha validación puede realizarse comparando los resultados obtenidos con el uso del modelo con los datos disponibles sobre el objeto de estudio, comparándolos con los datos reportados por otros modelos ya validados o valorando las conclusiones que se obtienen al usar el modelo en cuestión ([Legrá y Silva, 2011](#)).

En este trabajo, la validación de los modelos se realiza comparando los resultados experimentales obtenidos de variación de temperatura del combustible en la tubería, con los teóricos calculados con el modelo para las mismas condiciones de experimentación, se escoge dicho modelo por ser representativo del proceso, e integra los modelos de espesor de aislamiento térmico y pérdida total de calor. Se calculan los errores relativos entre los resultados experimentales y los teóricos, teniendo como criterio de aceptación que el error relativo sea inferior al 10 %. Para el cálculo del error se emplea la expresión 3.1; propuesta por [Montgomery \(2004\)](#) y [Freund et al. \(2006\)](#).

$$E = \left| \frac{(\Delta t_{exp} - \Delta t_{teo})}{\Delta t_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (3.1)$$

E : Error relativo puntual entre los valores experimentales y teóricos; [%].

Δt_{exp} : Variación experimental de la temperatura del combustible en la tubería; [K].

Δt_{teo} : Variación teórica de la temperatura del combustible en la tubería; [K].

Tabla 3.4. Variación teórica y experimental de la temperatura del combustible en la tubería.

t_p [K]	Δt [K]					Error [%]
	Teórico	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Promedio	
313	4,23	4	4	4	4	5,8
323	6,79	6	7	6	6,33	7,3
333	9,52	8	9	9	8,67	9,8

En la Tabla 3.4 se relacionan los valores teóricos y experimentales de la variación de temperatura del combustible en la tubería, determinados para las mismas condiciones de operación. Se observa que para las tres temperaturas del combustible que se experimentó (313 K, 323 K, 333 K), el valor teórico muestra poca diferencia con el valor promedio experimental obtenido al considerar las tres replicas, arrojando errores relativos que no sobrepasaron el 10 % en ninguno de los casos. Esta pequeña magnitud del error indica que existe correspondencia, entre los resultados de variación de temperatura del combustible en la tubería obtenidos experimentalmente durante trasiego del petróleo y los valores teóricos, calculados con los modelos propuestos en el capítulo anterior.

3.5.1. Variación de la temperatura del combustible en la tubería

Para determinar la variación de la temperatura del Crudo Mejorado 650 en la tubería, según el modelo propuesto (2.53), se tuvo en cuenta la temperatura inicial de trasiego y la temperatura ambiente promedio, así como el espesor del aislante térmico (0,1 m). Se determinó el coeficiente de convección del aire y del combustible para las condiciones del transporte, también se consideró la conductividad térmica de la tubería principal (Tabla 1, Anexo 2), del aire (Tabla 2, Anexo 2) y del aislante (Tabla 3, Anexo 2); la resistencia térmica total de la sección aislada de la tubería principal y la resistencia térmica total desde la cavidad termoaislada al exterior, se tuvo en cuenta el flujo de combustible trasegado y sus propiedades termofísicas, donde se obtuvo como resultado la relación de variación de temperatura del combustible en el oleoducto con traza de vapor.

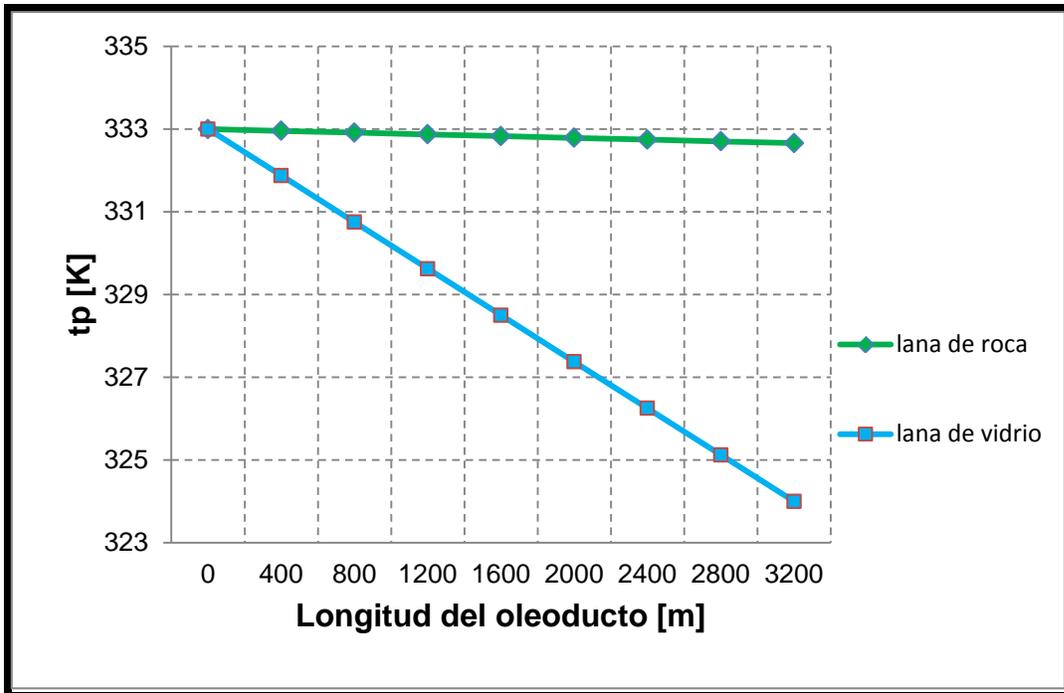


Figura 3.1. Variación de la temperatura del combustible en el oleoducto.

En la Figura 3.1 se expone el comportamiento de la variación de temperatura del combustible en el oleoducto, para una temperatura inicial de trasiego de 333 K (60 °C) la cual se registró como máxima temperatura de trabajo y lana de vidrio como material termoaislante (línea inferior), correspondiéndose con las características actuales de la instalación. En la propia figura (línea superior) se muestra una simulación del comportamiento del combustible para las mismas condiciones de trabajo, utilizando como aislante térmico lana de roca (*TECH Wired Mat MT 6.1*).

La figura muestra como, para igual espesor de aislamiento, existe una disminución del gradiente de temperatura al emplear lana de roca como material aislante y refleja una estabilidad casi total a lo largo del oleoducto. La diferencia final de la temperatura empleando lana de vidrio, excede en más de ocho grados a los valores obtenidos para la lana de roca, lo cual está asociado a la baja conductividad térmica de este material. Para lograrse una condición similar empleando lana de vidrio el espesor de aislante debe poseer aproximadamente 0,18 m, lo cual no resulta viable considerando los precios establecidos por los fabricantes de aislamientos ([ISOVER, 2014;](#)). Los valores

de temperatura del combustible en función de la longitud del oleoducto, para uno u otro termoaislante puede verse en la [Tabla 4 del Anexo 2](#).

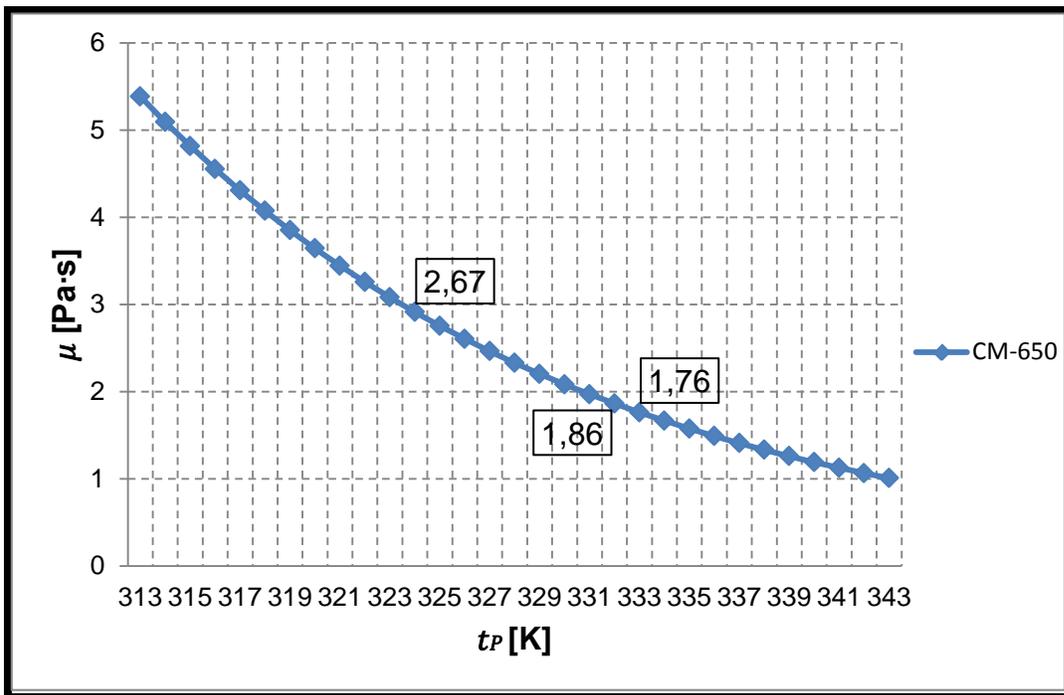


Figura 3.2. Comportamiento de la viscosidad del Crudo Mejorado 650 con el incremento de la temperatura.

En la Figura 3.2 se observa el comportamiento de la viscosidad del combustible para valores reales de temperatura de trasiego y muestra los valores específicos de esta propiedad en la instalación objeto de estudio, para diferentes materiales aislantes. El empleo de la lana de vidrio como material aislante provoca variaciones de temperatura del combustible cercanas a los nueve grados, que generan un aumento de su viscosidad de 1,76 Pa·s (a la temperatura de entrada) a los 2,67 Pa·s (a la temperatura de salida). Sin embargo la variación de temperatura para lana de roca no excede la unidad y solo genera un aumento máximo de la viscosidad de 1,86 Pa·s (a la temperatura de salida).

3.6. Estimación del espesor técnico racional de aislamiento

Al demostrar el mejoramiento del régimen térmico de la instalación para la lana de roca *TECH Wired Mat MT 6.1* respecto a la lana de vidrio y demostrado la validez de los modelos empleados; se consideró en la estimación del espesor de aislamiento térmico

el primero de estos como material aislante. En la Tabla 3.5 se muestran los principales parámetros que caracterizan al espesor técnico racional de aislamiento, los mismos se obtuvieron a partir del procedimiento planteado en el acápite 2.2 del capítulo anterior.

Tabla 3.5. Parámetros característicos del espesor técnico racional de aislamiento.

Magnitud	UM	Valores de la iteración						
		1	2	3	4	5	6	7
δ	m	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,12
θ	grados sexagesimales	326	326	326	326	326	326	326
β	grados sexagesimales	34	34	34	34	34	34	34
F_A	m ² /m	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097
F_C	m ² /m	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132
F_E	m ² /m	0,429	0,435	0,441	0,447	0,453	0,465	0,477
k_A	W/m·K	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
R_A	m ² ·K/W	0,411	0,411	0,411	0,411	0,411	0,411	0,411
R_C	m ² ·K/W	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063
R_E	m ² ·K/W	1,207	1,466	1,724	1,981	2,239	2,755	3,270
t_C	K	340,03	341,08	341,85	342,44	342,90	343,59	344,07
R_1	m·K/W	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
R_2	m·K/W	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴
R_3	m·K/W	0,673	0,826	0,972	1,114	1,251	1,512	1,757
R_4	m·K/W	0,059	0,059	0,057	0,056	0,055	0,053	0,051
q^P	W/m	37,867	31,628	27,292	24,102	21,655	18,146	15,747
q^C	W/m	14,892	17,109	18,736	19,979	20,961	22,412	23,433
q^E	W/m	17,348	14,882	13,074	11,691	10,599	8,986	7,850
q^T	W/m	55,284	46,558	40,401	35,820	32,277	27,147	23,596
Error	%	50,46	34,21	23,81	16,14	10,03	0,47	6,96

La estimación del espesor técnico racional de aislamiento, se realizó tomando en consideración los valores más representativos de la realidad del proceso y las variables que ejercen mayor influencia. Los datos mostrados en la Tabla 3.5 fueron determinados para valores de temperatura ambiente de 300 K (temperatura promedio), temperatura del combustible de 333 K (temperatura máxima registrada), temperatura del vapor de 476 K y velocidad del viento de 2,2 m/s (velocidad promedio). La estimación se realizó considerando siete espesores de aislamiento (0,04 m; 0,05 m; 0,06 m; 0,07 m; 0,08 m; 0,1 m; 0,12 m) de lana de roca (*TECH Wired Mat MT 6.1*), para cada espesor evaluado se calcularon los parámetros característicos y se determinó el error relativo de la estimación. En la Tabla 3.5 se evidencia como a medida que incrementa el espesor de aislamiento según los valores normalizados por la compañía española ISOVER para lana de roca, el error relativo disminuye rápidamente, siendo de 50,46 % para 0,04 m espesor y tan solo 0,47 % para 0,1 m de espesor, lo cual está en correspondencia a lo reportado por otros autores ([Gilli, 2005](#); [Luna, 2005](#)). Establecido el error relativo menor o igual al uno por ciento como criterio de parada del método, se puede aseverar que el espesor técnico racional de aislamiento para la instalación analizada y bajo las condiciones estudiadas es de 0,1 m.

3.7. Análisis de sensibilidad

Valorar el comportamiento térmico de la instalación para condiciones diversas de trabajo resulta necesario, a fin de conocer las pérdidas energéticas y los gastos asociados, permitiendo establecer estrategias de trabajo ([Gilli, 2005](#); [Galdámez y Guzmán, 2011](#)). El análisis se realizó considerando particularidades de operación de la instalación (temperatura del vapor y temperatura del petróleo) y características propias de la zona (temperatura ambiental y velocidad del viento).

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

Los valores de pérdida total de calor obtenidos a diferentes temperaturas del vapor se relacionan en la [Tabla 5 del Anexo 2](#), los mismos fueron calculados empleando la expresión 2.39.

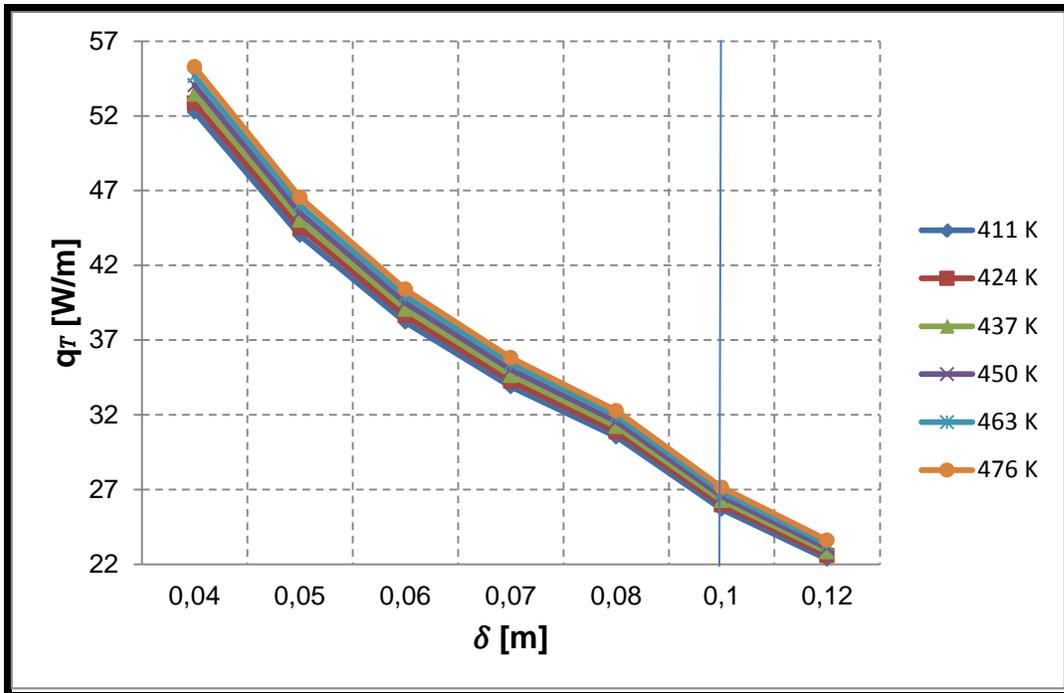


Figura 3.3. Comportamiento de la pérdida total de calor en función de la temperatura del vapor.

Al graficar los resultados (Figura 3.3) se observó un comportamiento análogo para todos los valores de temperatura del vapor y espesores de aislamiento, reflejando un ligero aumento de las pérdidas energéticas al incrementar la temperatura del vapor para un mismo espesor. Comportamiento inverso al mostrado por las pérdidas al aumentar el espesor de aislamiento para un valor específico de temperatura, lo cual está asociado fundamentalmente al acrecentamiento de la resistencia térmica por conducción al incrementarse el espesor del material aislante (Jiménez, 1999; Góngora *et al.* 2009; Martín-Domingo, 2011). Este resultado permite corroborar la influencia de la temperatura del vapor, en las pérdidas energéticas para diferentes espesores, semejante a lo reportado por Cruz y Toro (2011), y Limone (2012).

En el caso del espesor técnico racional de aislamiento (0,1 m) se observa que existe una dependencia con tendencia lineal creciente (Figura 3.4) de las pérdidas de calor respecto a la temperatura del vapor, arrojando como valor máximo 27,148 W/m para los 476 K de temperatura del vapor.

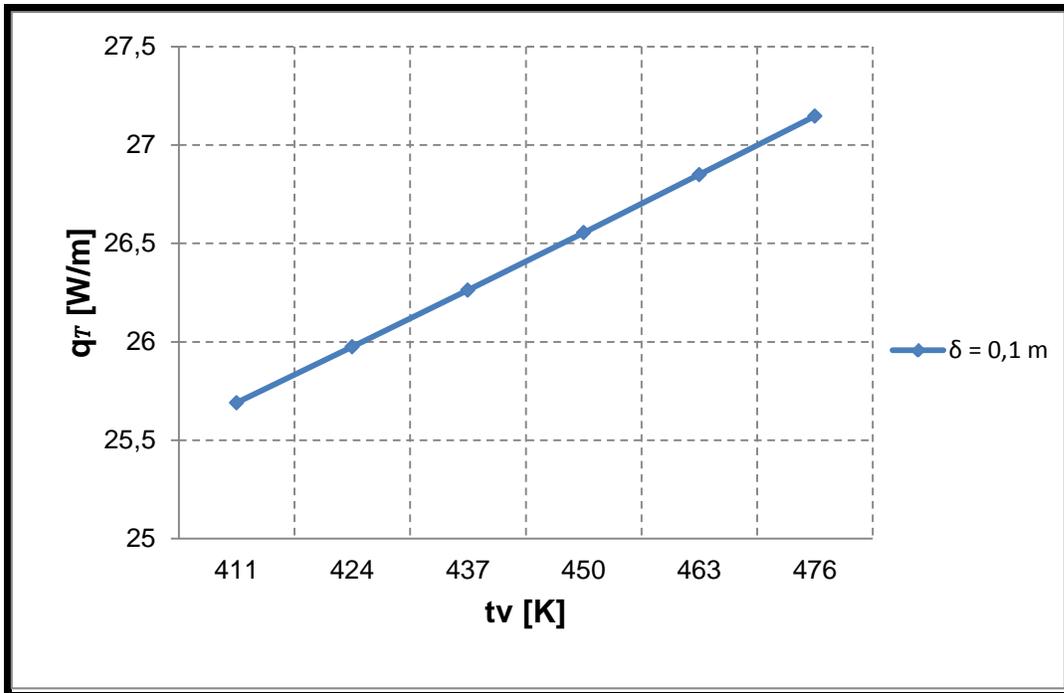


Figura 3.4. Comportamiento de la pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento en función de la temperatura del vapor.

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

Similar análisis al del tópico anterior se realizó para determinar la influencia de la temperatura del petróleo en las pérdidas energéticas, los resultados del cálculo se muestran en la [Tabla 6 del Anexo 2](#).

En la Figura 3.5 se aprecia el aumento que experimenta la pérdida total de calor al incrementarse la temperatura de bombeo del combustible, resultando evidente que los rangos de variación de las pérdidas energéticas para los valores de temperatura resultan mayor, para las temperaturas más elevadas. No obstante e independientemente de la temperatura evaluada, se obtienen los menores valores de pérdida total de calor para los mayores espesores del material aislante.

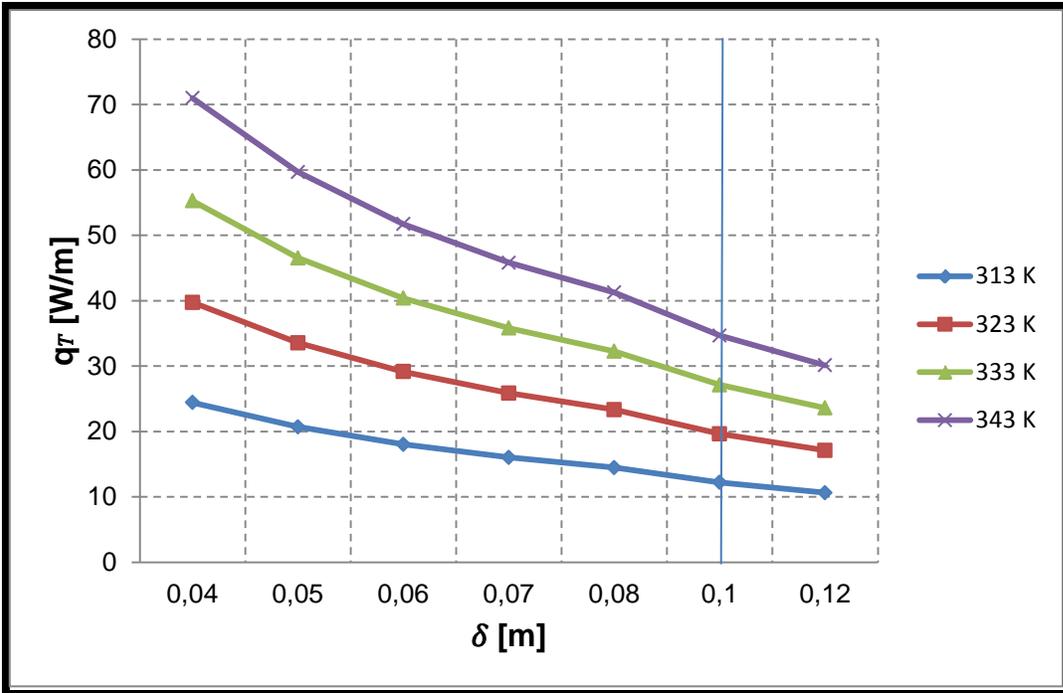


Figura 3.5. Comportamiento de la pérdida total de calor en función de la temperatura del petróleo.

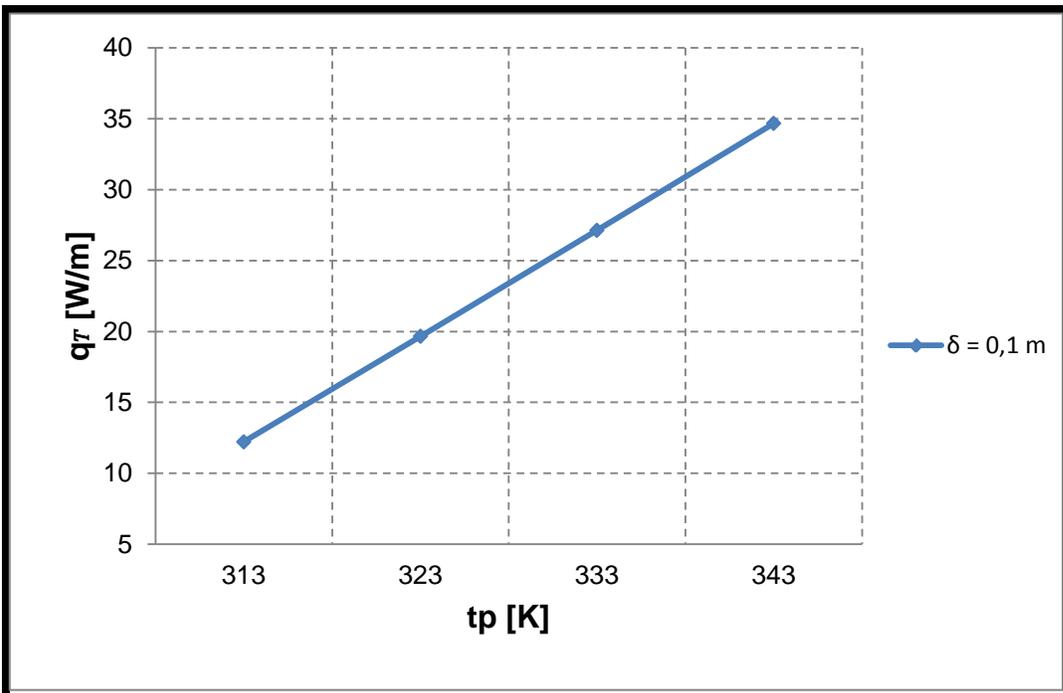


Figura 3.6. Comportamiento de la pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento en función de la temperatura del petróleo.

Al realizar el análisis para el espesor técnico racional de aislamiento, se evidencia (Figura 3.6) que existe un comportamiento lineal con tendencia creciente de las pérdidas energéticas respecto a la temperatura del petróleo. Reportando valores de 12,219 W/m para la temperatura mínima evaluada y 34,675 W/m para la temperatura máxima.

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

El efecto de la temperatura ambiental se muestra en la Figura 3.7, en la cual se observa que existen cambios significativos de la pérdida total de calor para los distintos espesores de aislamiento, donde las pérdidas se tornan menores a medida que aumenta el espesor, semejante a lo reportado por [Choudhary et al. \(2004\)](#) y [Koverdynsky et al. \(2006\)](#). Mientras que, para los valores superiores de la temperatura ambiente se aprecia una disminución de la pérdida total de calor, mostrando menores niveles de variación para los mayores espesores de aislamiento. Los valores de pérdida total de calor con los que se obtuvo la figura aparecen en la [Tabla 7 del Anexo 2](#).

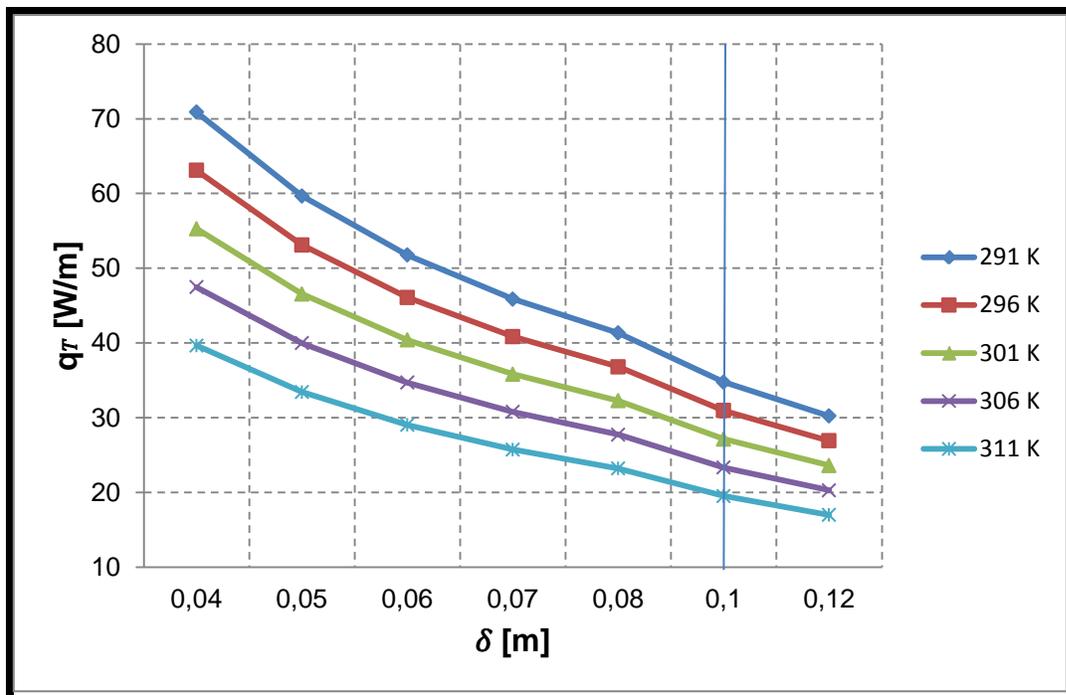


Figura 3.7. Comportamiento de la pérdida total de calor en función de la temperatura ambiente.

Al aumentar la temperatura ambiente en el posible rango de operación, para el espesor técnico racional de aislamiento, se observó una disminución de los valores de las pérdidas energéticas (Figura 3.8), comportamiento similar a lo reportado en la literatura (Gilli, 2005; Limone 2012). Lo cual refleja la marcada incidencia de los parámetros climáticos en el proceso de transporte de crudo por sistemas que emplean trazas de vapor. Este comportamiento es inverso al mostrado por el mismo espesor, al variar la temperatura del vapor y la temperatura del petróleo, y muestra diferencias de 15,233 W/m en el rango experimentado, al variar de 34,763 W/m a los 291 K hasta los 19,532 W/m a los 311 K.

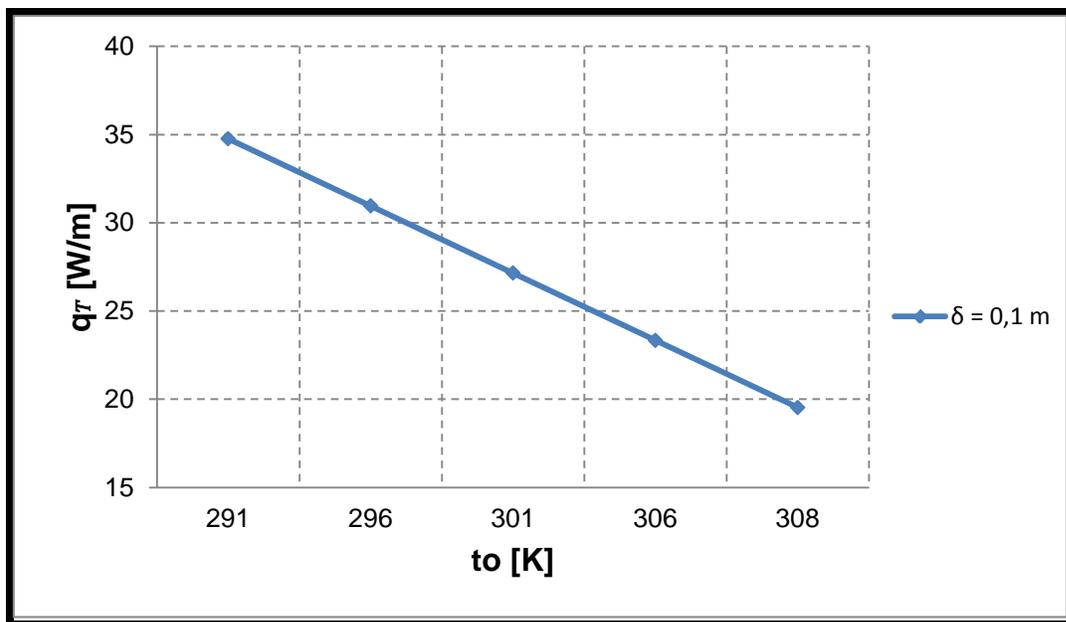


Figura 3.8. Comportamiento de la pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento en función de la temperatura ambiente.

3.7.4. Influencia del espesor de aislamiento en las pérdidas energéticas con variaciones de la velocidad del viento

Al graficar la pérdida total de calor en función del espesor de aislamiento para distintas velocidades del viento (Figura 3.9), se observa que no existe cambio significativo de dichas pérdidas considerando las velocidades del viento para un espesor determinado; sin embargo, los cambios en las pérdidas son de mayor relevancia para una velocidad del viento establecida, evaluada para diferentes espesores de aislamiento, resultados

que muestran correspondencia a los reflejados en la bibliografía (Galdámez y Guzmán, 2011; Limone 2012). Del mismo modo resulta evidente una ligera tendencia a aumentar las pérdidas de calor al acrecentarse la velocidad del viento, comportamiento que se vuelve más pequeño con el incremento de la velocidad. Los valores para los que se obtuvo la figura aparecen en la [Tabla 8 del Anexo 2](#).

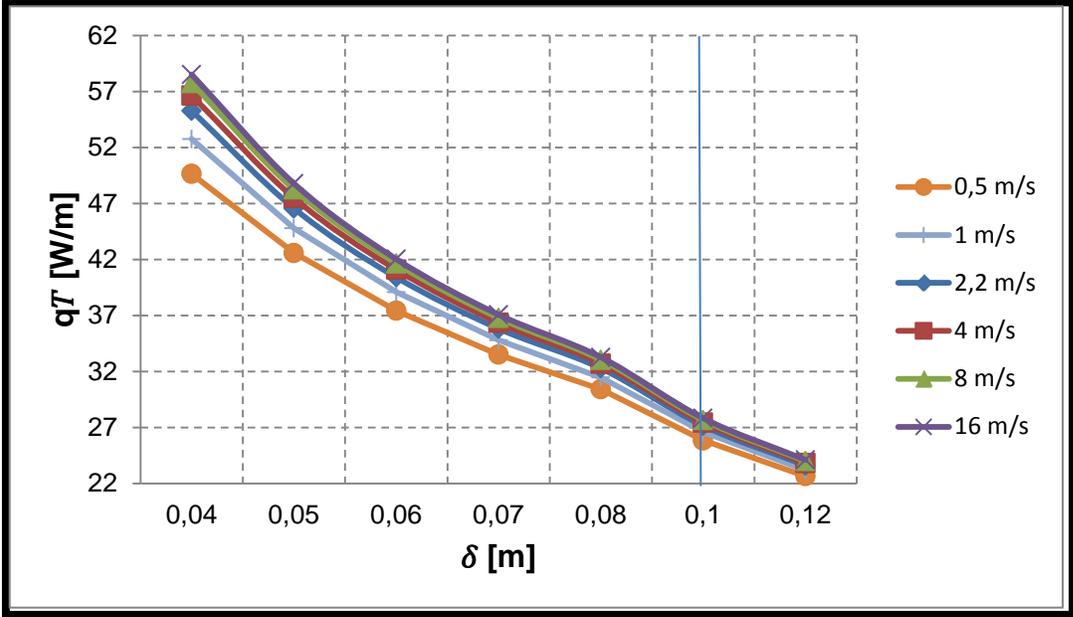


Figura 3.9. Comportamiento de la pérdida total de calor en función de la velocidad del viento.

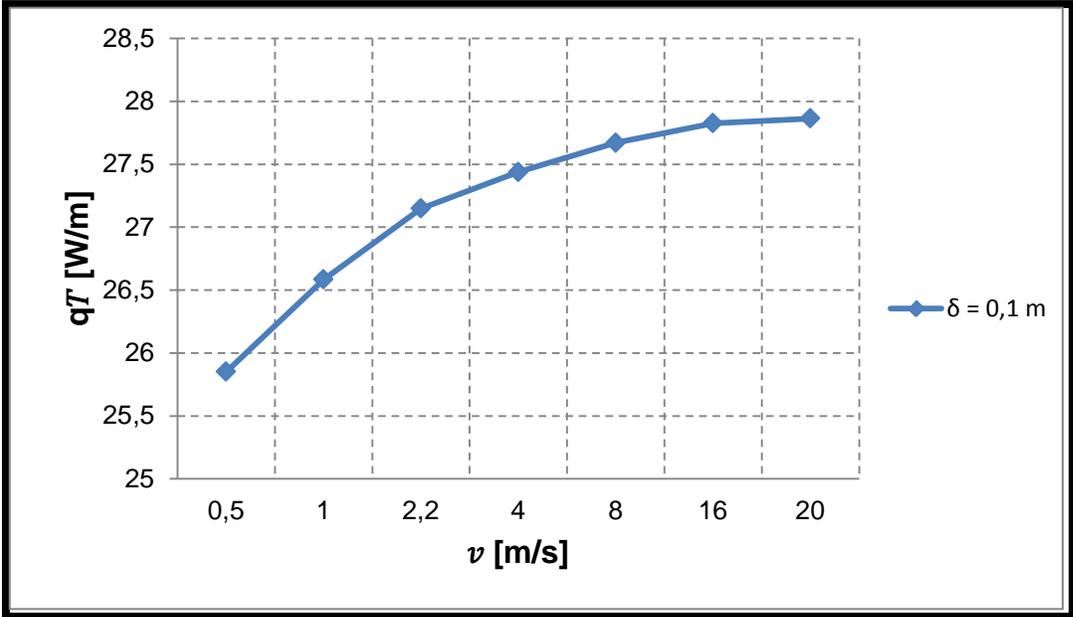


Figura 3.10. Comportamiento de la pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento en función de la velocidad del viento.

Para el espesor técnico racional de aislamiento, se produce un escaso incremento de la pérdida total de calor con el aumento de la velocidad del viento (Figura 3.10), dicho comportamiento muestra una tendencia logarítmica, y para la velocidad promedio del viento registrada en la zona (2,2 m/s) se alcanzan valores de 27,148 W/m.

Aunque para todos los casos analizados (temperatura del vapor, temperatura del petróleo, temperatura ambiente y velocidad del viento) se muestra una tendencia decreciente de las pérdidas de calor (Figura 3.3, Figura 3.5, Figura 3.7 y Figura 3.9 respectivamente) a medida que se incrementa el espesor de aislamiento; cuando se realiza el análisis de todos esos factores para el espesor técnico racional de aislamiento se muestra (Figura 3.4, Figura 3.6, y Figura 3.10) que al incrementar la temperatura del vapor, la temperatura del combustible o la velocidad del viento, tienden a incrementar el valor de la pérdida total de calor, comportamiento diametralmente opuesto al mostrado por la temperatura ambiente (Figura 3.8), que refleja una disminución.

Es válido destacar que bajo las condiciones evaluadas y para el caso específico del espesor técnico racional de aislamiento, los mayores valores de pérdida de calor se reportaron para la mínima temperatura ambiente evaluada y los menores para la mínima temperatura del combustible. Mientras que las mayores variaciones de pérdida total de calor, se registraron para la temperatura del combustible y temperatura ambiente respectivamente, reportándose las menores variaciones para la temperatura del vapor y velocidad del viento en ese mismo orden. Los valores mínimos, máximos y variaciones de pérdida total de calor asociadas al espesor técnico racional de aislamiento son expuestos en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Pérdida total de calor para el espesor técnico racional de aislamiento.

Parámetro				
	$q^T(t_v)$	$q^T(t_p)$	$q^T(t_o)$	$q^T(V)$
valor mínimo evaluado	25,689	12,219	34,763	25,851
valor máximo evaluado	27,147	34,675	19,531	27,864
Δ [W/m]	1,458	22,456	15,232	2,013

3.8. Estimación del espesor óptimo económico de aislamiento

Para la obtención de la pérdida total de calor se procedió a calcular mediante la ecuación 2.39, la cual es el resultado de la integración de las expresiones 2.2 y 2.27; para las condiciones estimadas resulta evidente que la pérdida de calor que se produce desde la parte aislada de la tubería principal al medio exterior (q^P) sea mayor que la pérdida generada desde la cavidad termoaislada (q^E), lo cual está asociado fundamentalmente a una mayor área de disipación de calor, debido a la diferencia de los diámetros de la tubería principal y la traza de vapor. La Figura 3.11 muestra el valor de la pérdida total de calor disgregado en sus dos componentes y exhibe los porcentajes que representan del total. Los valores para los cuales se obtuvo la figura están recogidos en la [Tabla 9 del Anexo 2](#).

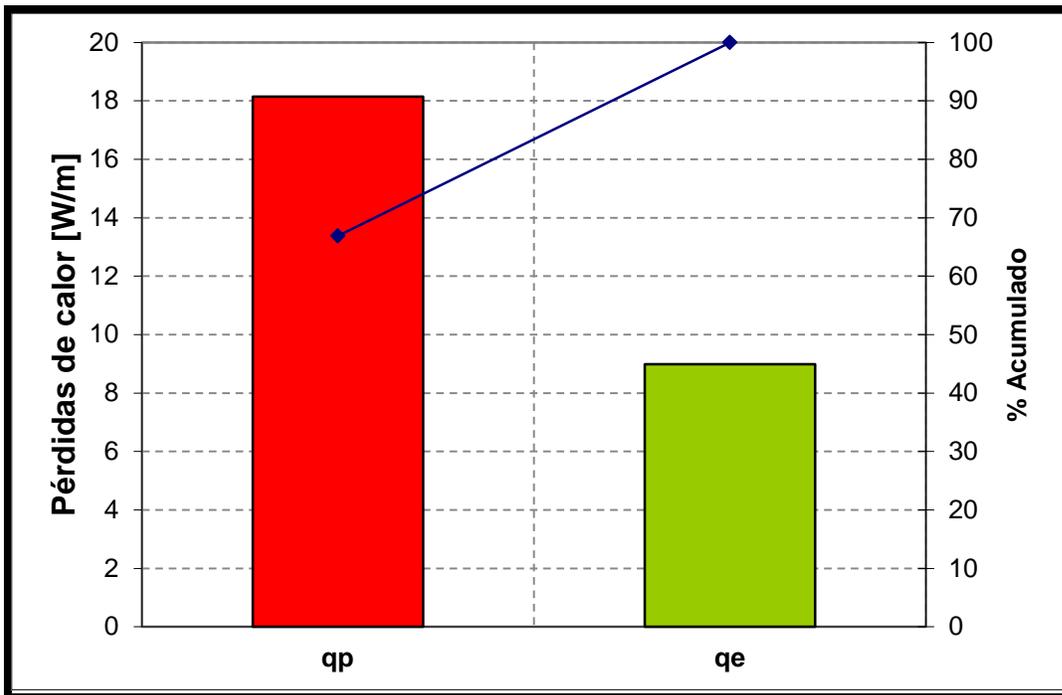


Figura 3.11. Distribución de la pérdida total de calor por componentes.

El cálculo de los parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento, se obtuvo en correspondencia con el procedimiento descrito en el tópico 2.3 del capítulo anterior; el valor de las pérdidas energéticas, el valor actualizado de dichas pérdidas, el incremento del ahorro, el incremento de la inversión y la diferencia entre estos dos últimos parámetros han sido determinadas por las expresiones 2.40,

2.41, 2.44, 2.45 y 2.46 respectivamente. El espesor óptimo económico de aislamiento se determinó considerando entre otros parámetros el tiempo de funcionamiento de la instalación (767 h/año), el costo energético (0,09 CUP/kW·h), la duración estimada del aislamiento (10 años), el incremento del costo de la energía (3 %), la tasa de interés (5 %) y la tasa de inflación prevista (1 %). Los precios de los aislamientos se fijaron dependientes de los espesores empleados, en relación a lo establecido por [ISOVER \(2015\)](#), y no se ha tenido en cuenta un costo adicional del aislamiento por mano de obra.

Tabla 3.7. Parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento.

δ [m]	q^T [W/m]	V [CUP/m·año]	V_A [CUP/m]	A [CUP/m]	I_A [CUC/m]	$A - I_A$ [CUP+CUC/m]
0,04	55,284	3,813	36,178			
0,05	46,558	3,211	30,467	5,710	2,6	3,110
0,06	40,401	2,787	26,438	4,028	1,7	2,328
0,07	35,820	2,471	23,441	2,997	2,2	0,797
0,08	32,277	2,226	21,122	2,318	2,15	0,168
0,1	27,147	1,872	17,765	3,356	3,35	0,006
0,12	23,609	1,628	15,450	2,315	2,4	-0,084

En la Tabla 3.7 se exponen los parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento, resultando evidente que la pérdida total de calor, el valor de las pérdidas energéticas y el valor actualizado de dichas pérdidas disminuyen al aumentarse el espesor de aislamiento, (lo cual resulta lógico considerando la dependencia matemática entre estos parámetros, en el mismo orden expuesto), mientras que el incremento del ahorro no muestra tendencia a ascender o disminuir con el incremento del espesor, comportamiento análogo al mostrado por el incremento de la inversión del aislamiento influenciado por los precios establecidos para los diferentes espesores. La diferencia entre el incremento del ahorro y el incremento de la inversión manifiesta cierta disminución, obteniéndose su valor mínimo positivo justamente para el espesor óptimo económico, siendo para este caso de 0,1 m.

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

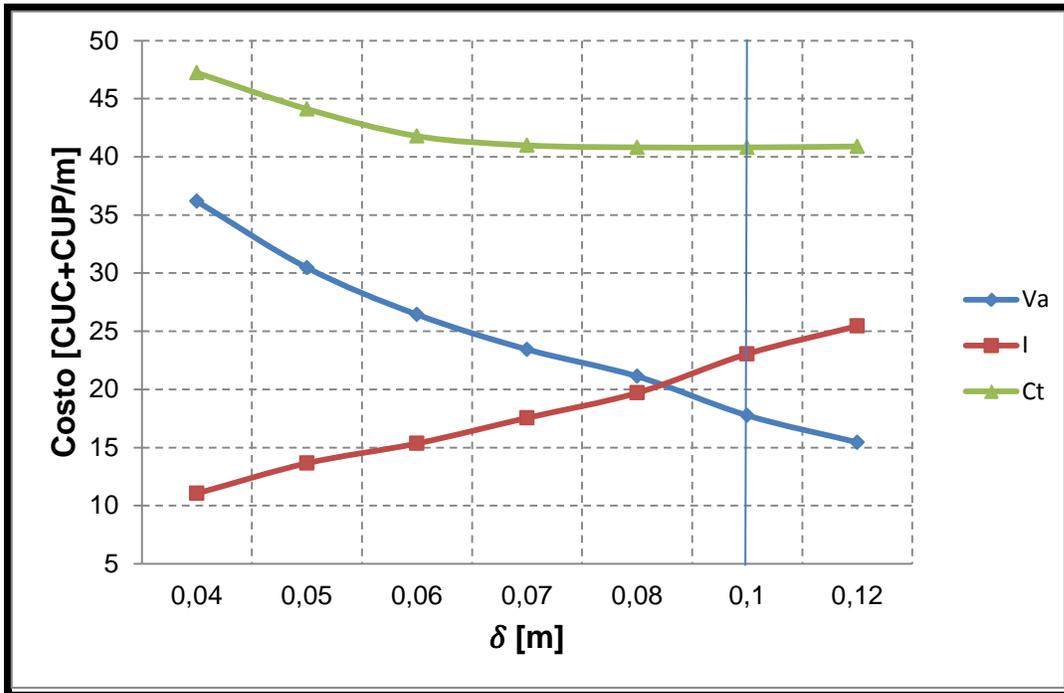


Figura 3.12. Espesor óptimo económico de aislamiento.

La selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías con traza de vapor está relacionada a factores de naturaleza opuesta, como son los costos asociados a la pérdida de calor y la inversión en aislamiento. La Figura 3.12 presencia como al evaluar para un mismo espesor de aislamiento, existe una disminución del valor actualizado de la pérdida total de calor (V_A) asociado al incremento de la resistencia térmica por conducción, mientras el costo de inversión de aislamiento (I) crece a causa del aumento de material aislante, comportamientos análogos a los obtenidos por CENER (2005), Izquierdo *et al.* (2005), y Galdámez y Guzmán (2011).

La suma del valor actualizado de las pérdidas energéticas con el costo de inversión, permitió la búsqueda del valor mínimo de costo total (40,816 CUC+CUP), demostrándose que para las condiciones analizadas el espesor óptimo económico de

aislamiento es de 0,1 m. Los valores de costo total asociados a los espesores de aislamientos evaluados pueden encontrarse en la [Tabla 10 del Anexo 2](#).

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

3.8.1. Tiempo de recuperación de la inversión

La evaluación de la rentabilidad del espesor óptimo económico de aislamiento, se realizó aplicando el método de recuperación de la inversión, considerándose el periodo para el cual se efectuó el estudio, determinando el tiempo que tarda para amortizar el capital invertido por su compra e instalación.

El análisis estuvo basado en el ahorro de energía generado por la colocación del espesor óptimo económico, respecto a los demás espesores analizados. El número de años en que amortiza la inversión del aislamiento con espesor óptimo aparece reflejado en la tabla 3.8, para la misma se tuvo en cuenta el ahorro neto de efectivo esperado, siendo esto función de la pérdida total de calor propia de cada espesor.

Tabla 3.8. Período de recuperación del espesor óptimo económico aislamiento.

Ahorro esperado por el empleo del espesor óptimo económico de aislamiento					
Año	$\delta = 0,04$ m	$\delta = 0,05$ m	$\delta = 0,06$ m	$\delta = 0,07$ m	$\delta = 0,08$ m
0	- 73 760	- 73 760	- 73 760	- 73 760	- 73 760
1	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
2	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
3	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
4	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
5	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
6	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
7	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
8	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4
9	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4

Tabla 3.8. Período de recuperación del espesor óptimo económico aislamiento (continuación).

10	58 921,6	40 646,4	27 753,6	18 163,2	10 742,4				
Ahorro esperado respecto a $\delta = 0,04$ m		0 ----- -73760	1 ----- 58921	2 ----- 14839					
Ahorro esperado respecto a $\delta = 0,05$ m		0 ----- -73760	1 ----- 40646	2 ----- 33114					
Ahorro esperado respecto a $\delta = 0,06$ m		0 ----- -73760	1 ----- 27753	2 ----- 27753	3 ----- 18254				
Ahorro esperado respecto a $\delta = 0,07$ m		0 ----- -73760	1 ----- 18163	2 ----- 18163	3 ----- 18163	4 ----- 18163	5 ----- 1108		
Ahorro esperado respecto a $\delta = 0,08$ m		0 ----- -73760	1 ----- 10742	2 ----- 10742	3 ----- 10742	4 ----- 10742	5 ----- 10742	6 ----- 10742	7 ----- 9308
Período de recuperación									
	1,25 años	1,81 años	2,66 años	4,06 años	6,87 años				

A medida que la diferencia entre el espesor evaluado y el óptimo económico resultó menor, el ahorro esperado disminuyó, de ahí que al evaluar respecto al espesor de 0,08 m se manifestó el periodo de recuperación más largo (6,87 años), lo cual refleja un comportamiento legítimo tomando en consideración que este es el espesor más cercano al óptimo económico (0,1 m) y para el cual se generan los menores ahorros. Contrariamente a esto cuando se evaluó respecto al espesor más lejano (0,04 m) del espesor óptimo económico, se obtiene el periodo de recuperación más corto

(1,25 años) lo cual está asociado a los altos valores del ahorro esperado, producto de la pérdida de calor propia de este espesor.

3.9. Impacto económico

La selección adecuada del espesor de aislamiento térmico ejerce notable influencia en la eficiencia del transporte del crudo mejorado y reduce los costos asociados a las pérdidas de calor.

En la tabla 3.9 se muestran los gastos monetarios producto de la pérdida total de calor para cada espesor de aislamiento; aunque, para el espesor de 0,12 m se obtiene una pérdida de calor inferior al espesor adecuado de aislamiento (espesor técnico racional y óptimo económico), este no se toma en consideración pues su costo de inversión resulta superior al ahorro generado y no logra amortizar el dinero desembolsado por su compra e instalación, para el periodo evaluado.

Tabla 3.9. Gastos monetarios por espesor de aislamiento.

δ [m]	q^T [W/m]	V_A [CUP/m]	Gastos [CUP]
0,04	55,284	36,178	115 769,6
0,05	46,558	30,467	97 494,4
0,06	40,401	26,438	84 601,6
0,07	35,820	23,441	75 011,2
0,08	32,277	21,122	67 590,4
0,1	27,147	17,765	56 848

Para el espesor técnico racional y óptimo económico (0,1 m) la pérdida total de calor ascendió a los 27,147 W/m, si se analiza que el valor actualizado de las pérdidas es de 17,765 CUP/m y que la instalación posee una longitud de 3 200 m resulta fácil percibir que se incurren en gastos de 56 848 CUP para el periodo evaluado; sin embargo, al comparar estos valores con los aportados por el espesor de 0,04 m resulta evidente que la pérdida total de calor asociada a este espesor es de 55,284 W/m incurriendo en gastos de 115 769,6 CUP. De ahí que, al emplear el espesor adecuado de aislamiento se produzca un ahorro de energía respecto al espesor con 0,04 m de 28,137 W/m, que

equivale en términos monetarios a 58 921,6 CUP, representando un ahorro del 104 %. Los ahorros de energía y monetario aportados por el espesor técnico racional y óptimo económico respecto a los demás espesores de aislamientos pueden encontrarse en la [Tabla 11 del Anexo 2](#).

3.10. Impacto ambiental

La selección del espesor adecuado de aislamiento térmico, contribuye al comportamiento eficiente del transporte de combustible por tuberías y mitiga sucesos que afectan directamente al medio ambiente, con impactos directos sobre la naturaleza y la sociedad. En la Tabla 3.10 se han identificados los efectos negativos asociados a una inadecuada selección del espesor de aislamiento térmico, en la instalación de trasiego del crudo cubano de la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez de Felton.

Tabla 3.10. Impactos ambientales asociados una inadecuada selección del espesor de aislamiento térmico.

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

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

Los impactos ambientales expuestos en la Tabla 3.10, ocasionan efectos negativos indirectos que pueden generar incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardiaco, la contracción de los capilares de la piel y la disminución en la capacidad de trabajo física del hombre.

Según [Navarro \(2014\)](#) muchas plantas de energía eléctrica producen calor en exceso; sin embargo, uno de los efectos que se logra mitigar con la selección adecuada del espesor de aislamiento es la contaminación térmica, contribuyendo a que no exista un

mayor deterioro de la calidad del aire, provocado por un ascenso de la temperatura que afecta la flora y fauna endémica y contribuye al cambio climático.

Al aplicar el valor de conversión correspondiente, en función del tipo de energía utilizada fue posible determinar la disminución de emanaciones de CO₂ a la atmósfera, producto del ahorro de energía aportados por el espesor técnico racional y óptimo económico respecto a los demás espesores de aislamiento, la técnica seguida está reflejada en la [Tabla 12 del Anexo 2](#).

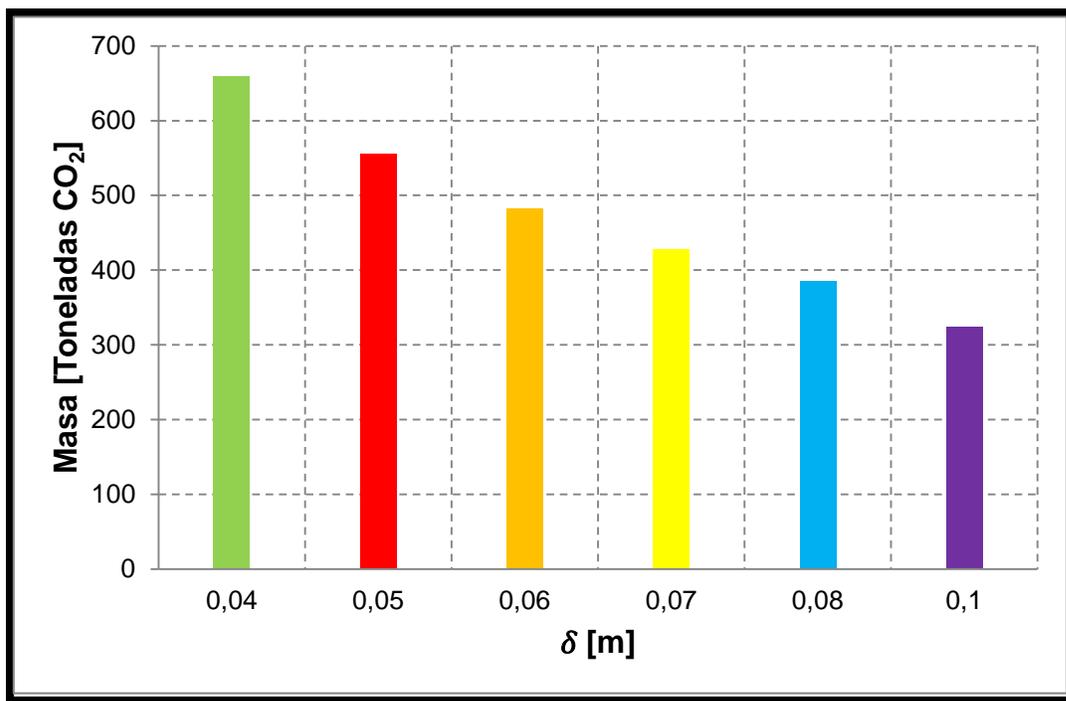


Figura 3.13. Toneladas de CO₂ emitidas por espesor de aislamiento.

En la Figura 3.13 se puede observar el comportamiento de las emisiones de CO₂ para los espesores analizados, resultando evidente que; a medida que el espesor evaluado se aleja del espesor adecuado de aislamiento (0,1 m), las emisiones de CO₂ se incrementan; resultando 659 toneladas de CO₂ para el espesor de 0,04 m y solo 385 toneladas de CO₂ para el espesor de 0,08 m. Las emisiones generadas por el espesor adecuado de aislamiento están en las 323 toneladas de CO₂ y constituye una disminución de 336 toneladas respecto al espesor de 0,4 m. Los resultados obtenidos son congruentes a los mostrados por otros autores ([Romero, 2008](#); [WWF, 2010](#);

IDAE, 2014) para condiciones afines. Los valores de emisión de CO₂ para cada espesor de aislamiento, con los que se obtuvo la figura aparecen en la [Tabla 13 del Anexo 2](#).

3.11. Conclusiones del capítulo

- Para la configuración geométrica de la instalación analizada y las propiedades termofísicas del combustible trasegado, se demostró que el espesor técnico racional de aislamiento es de 0,1 m, generándose una pérdida total de calor de 27,147 W/m.
- Independiente del espesor de aislamiento empleado, el incremento de la temperatura del vapor, la temperatura del combustible y la velocidad del viento, provocan un aumento de la pérdida total de calor, comportamiento diametralmente opuesto al reflejado por la temperatura ambiente.
- La diferencia entre el incremento del ahorro y el incremento de la inversión manifestó su valor mínimo positivo para el espesor óptimo económico, de 0,1 m, con un costo total de 40, 816 CUC + CUP/m.
- Con la utilización del espesor adecuado de aislamiento se generan gastos de 56 848 CUP y se emiten a la atmósfera 323 toneladas de CO₂ en el periodo evaluado, siendo estos los menores valores reportados de todos los espesores considerados.

CONCLUSIONES GENERALES

- Quedó establecido el procedimiento para la selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor, para el cual se validó el modelo de variación de temperatura del combustible en la tubería, que integra los modelos de espesor de aislamiento y pérdida total de calor, presentando un nivel de precisión ligeramente superior al 90 %.
- Para la instalación analizada y lana de roca *TECH Wired Mat MT 6.1* se determinó con un error relativo de 0,47 %, que el espesor técnico racional es de 0,1 m; para el cual se genera una pérdida total de calor de 27,147 W/m y variación de la temperatura del combustible en el oleoducto, inferior a un grado.
- Para el espesor técnico racional de aislamiento se comprobó que existe un aumento de la pérdida total de calor al incrementarse la temperatura del vapor, temperatura del petróleo y velocidad del viento, comportamiento diametralmente opuesto al mostrado por la temperatura ambiente. Reflejándose las mayores variaciones de pérdida total de calor para la temperatura del combustible con 22,456 W/m y las menores variaciones para la temperatura del vapor con 1,458 W/m.
- Se demostró que para una duración estimada del aislamiento de 10 años, con un periodo de trabajo de la instalación de 767 horas anuales, incremento del costo de la energía de un 3 %, tasa de interés de un 5 % y tasa de inflación del 1 %. La diferencia entre el incremento del ahorro y el incremento de la inversión manifestó su valor mínimo positivo para el espesor óptimo económico, de 0,1m; registrándose para este, el mínimo costo total de 40,816 CUC+CUP por metro de tubería.

RECOMENDACIONES

- Utilizar los modelos matemáticos establecidos, en futuras investigaciones donde se requiera seleccionar el espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor.
- Ampliar el método de selección de espesor de aislamiento térmico de tuberías con trazas de vapor, para otros tipos de combustible y fluidos.
- Analizar el comportamiento térmico de sistemas similares, para nuevos materiales aislantes y diferentes condiciones de explotación.
- Perfeccionar el procedimiento utilizado considerando criterios no valorados en la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Ávila, R. 1995.** *Química aplicada I*, Edición UPC, Primera edición, Barcelona.
- 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, I; Reyes, F; Rodríguez, A. 2004.** *Efecto de aditivos nacionales en las propiedades físicas del petróleo crudo cubano.* Tecnología Química. Vol 24. No 1. Pág.43-61.
- Bergman, T; Lavine, A; Incropera, F; Dewit, D. 2011.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* John Wiley & Sons, New Jersey. ISBN 13 978-0470-50197-9. 1039 Pág.
- Bomberg, M. 2013.** *Glows and shadows of thermal insulation.* Frontiers of architectural research. Vol 2. Pág.263-266.
- Bombino, E; Roca, G; Lesme, R. 2010.** *Principales elementos teórico-prácticos para el estudio del secado neumático vorticial de bagazo de caña.* Tecnología Química. Vol 30. No 2. Pág. 74 - 81.
- 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.

Brito-Vallina, M; Alemán-Romero, I; Fraga-Guerra, E; Para-García, J; Arias-De Tapia, R. 2011. *Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros*. Ingeniería Mecánica. Vol 14. No 2. Pág.129 - 139.

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. 2005. *El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO₂ en viviendas mediante incremento del aislamiento*. Consultado: 16 de marzo de 2015. Disponible en: www.cener.com.

Chen, T; Mohammed, R; Bailey, A; Luckham, P; Taylor, S. 1994. *Dewatwring 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.

Choudhary, M; Karki, C; Patankar, S. 2004. *Mathematical modelling of heat transfer, condensation, and capillary flow in porous insulation on a cold pipe*. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol 47. Pág. 5629-5638.

- 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.
- CONUEE, PYME, SENER. 2008.** *Beneficios del aislamiento en la industria.* 52 Pág. Consultado: 20 de febrero de 2015. Disponible en: www.conuee.gob.mx.
- Cruz, M; Toro, A. 2011.** *Reingeniería del sistema de distribución de vapor al área de lavandería y cocina del hospital gineco obstétrico Isidro Ayora.* Quito : Tesis de grado. Escuela politécnica nacional. 151 Pág.
- 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.
- Elsafty, A; Joumaa, C; Abo-elazm, M; Elharidi, A. 2013.** *Case study analysis for building envelop and its effect on environment.* Energy Procedia. Vol 36. Pág 958-966.

- 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.
- Freund, J; Miller, I; Jonson, R. 2006.** *Probabilidades y estadísticas para ingenieros.* 2 t. La Habana: Editorial Félix Varela. 624 Pág.
- Galdámez, V; Guzmán, H. 2011.** *Evaluación térmica, energética y económica del uso de aislantes térmicos.* Tesis de grado. Universidad centroamericana José Simeón Cañas. 61 Pág.
- 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.
- Gilli, A. 2005.** *Cálculo del aislamiento óptimo en tuberías aplicando 3E Plus® v 4.0.* Córdoba, Argentina. 4 Pág.
- Góngora, E; Guzmán, D; Columbié, A; Marrero, S; Retirado, Y. 2007.** *Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales.* Energética. Vol 28. No 2. Pág.15 - 25.
- Góngora, E; Guzmán, D; Columbié, A; Marrero, S; Retirado, Y; Lamorú, M. 2008.** *Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales.* 5to Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos. ISBN: 978-959-257-186-0.
- Góngora, E; Lamorú, M; Columbié, A; Retirado, Y; Legrá, A; Spencer, Y. 2009.** *Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto.* Minería y Geología, Vol 25. No 3. Pág. 1-18.
- 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.
- IDAE. 2007.** *Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.* Madrid. ISBN: 978-84-96680-08-1. 59 Pág.
- IDAE. 2014.** *Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria.* 32 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. 2004.** *Manual de aislamiento en la industria.* Madrid : Saint-Gobain Isover España. 148 Pág.
- ISOVER. 2004.** *Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios y sus instrucciones técnicas complementarias.* Madrid : Saint-Gobain Isover España. 52 Pág.

- ISOVER. 2004.** *Manual de conductos de aire acondicionado Climaver.* Madrid : Saint-Gobain Isover España.128 Pág.
- ISOVER. 2004.** *Manual de aislamiento en la edificación.* Madrid : Saint-Gobain Isover España. 161 Pág.
- ISOVER. 2014.** *Lista de precios.* Madrid : Saint-Gobain Isover España. 53 Pág.
- ISOVER. 2015.** *Lista de precios.* Madrid : Saint-Gobain Isover España. 53 Pág.
- Izquierdo, M; Gavira, M; Alfaro, J; Lecuona, A. 2005.** *Espesor óptimo del aislante térmico para las viviendas de Madrid.*
- 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.
- Jichniakov, V. 1976.** *Praktichieskiie raschio-tü tieplovoi izolliasü,* Energía, Moskva.
- Jiménez, H. 1999.** *Modelamiento matemático de los procesos de transferencia de momentum, calor y masa en medios porosos.* Tesis Doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana. 289 Pág.
- Kern, D. 1999.** *Procesos de transferencia de calor.* 31 ed. México: Compañía Editorial Continental S.A.
- Koverdinsky, V, Korsgaard, V y Rode, C. 2006.** *The wick-concept for thermal insulation of cold piping.* Journal of building physics. Vol 29. No 4. Pág. 313-327.
- Laurencio, H. 2007.** *Propiedades reológicas de emulsiones de petróleo pesado en agua.* ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba.
- Laurencio, H; Delgado, Y. 2008.** *Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado.* Minería y Geología. Vol 24. No 2. ISSN 1993-8012. Pág. 56-77.
- Laurencio, H; Delgado, Y. 2008.** *Comportamiento reológico de emulsiones de petróleo pesado en agua.* Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. Vol 16. No 2. Pág. 244-250.

- Laurencio, H. 2010.** *Método para la obtención de la temperatura racional de bombeo de petróleos pesados.* ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba.
- Laurencio, H. 2012.** *Método para la determinación de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650.* Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 116 Pág.
- Legrá, A; Silva, O. 2011.** *La investigación científica: Conceptos y Reflexiones.* La Habana: Editorial Félix Varela, 445 Pág.
- Limone, C. 2012.** *Diseño e instalación de aislante térmico en tuberías y equipos.* Tesis de grado. Universidad Simón Bolívar. 48 Pág.
- 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.
- Luna, P. 2005.** *Aislamiento e instalación frigorífica.* Tesis de grado. Escuela universitaria de ingeniería técnica agrícola de Ciudad Real. 65 Pág.
- 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.
- Massó, Y. 2008.** *El aislamiento térmico en el nuevo RITE.* Pág. 22-24.
- Martín-Domingo, D. 2011.** *Apuntes de transmisión del calor.* España: UPM.
- Maruska, P; Rao, B. 1987.** *Estudio reológico y dieléctricos a los petróleos parafínicos y asfálticos.* Fuel Science and Technology. Vol 2. No 5. Pág.119-168.
- Mechetti, M; Zapana L. 2000.** *Estudio comparativo de actividad electrorreológica en petróleos argentinos.* I Encuentro Internacional de Física aplicada a la Industria del

Petróleo y IV Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada, Bucaramanga, Colombia.

Mechetti, M; Zapana, L. 2000. *Estudios electrorreológicos de fluidos basados en dispersiones de asfaltenos.* Congreso Producción 2000 y III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú, Misiones, Argentina.

Mechetti, M; Fornés, A; Maturano, S; Zapana, L. 2000. *Efecto electrorreológico en crudos argentinos.* Congreso Producción 2000 Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú, Argentina.

Mechetti, M; Rodríguez L; Castañeda, M; Pelaez, C. 2001. *Efecto electrorreológico en crudos pesados.* Informe ICP, Ecopetrol, Argentina.

Mironov, V. 1986. *Guía metodológica para el proyecto de curso de equipos de transferencia de calor.* La Habana : Editorial ISPJAE. 135 Pág.

Momemer, B. 2004. *El mito de la orimulsión: la valorización del petróleo extrapesado de la faja del Orinoco.* Oil & Gas Journal Latinoamérica. Vol 10. No 5. Pág. 44-56.

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.

Montgomery, D. 2004. *Diseño y análisis de experimentos.* La Habana: Editorial Félix Varela. 325 Pág.

Moring, V. 2006. *Termodinámica.* Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba.

Navarro, A. 2014. *Contaminación térmica en el agua.* Registro N° 188.540. Consultado: 17 de septiembre de 2014. Disponible en: www.profesorenlinea.cl.

Ochoa, O. 2011. *Procedimiento para el bombeo eficiente de petróleos pesados.* Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 85 Pág.

Om, N; Loginapaulo, V; Cavado, A. 2004. *Composición de los petróleos pesados cubanos".* Oil & Gas Journal Latinoamérica. Vol 10. No 1. Pág. 23-37.

- 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.
- Patsis, 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.
- Retirado, Y. 2012.** *Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas*. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 116 Pág.
- Romero, M. 2008.** *Mejora de la envolvente térmica de los edificios como herramienta para la reducción de emisiones de CO₂*. Pág. 50-52.
- Romo, L. 1993.** *Emulsiones*. Editorial Universitaria, Ecuador.
- Romo, L. 1998.** *Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua*. Petroecuador-ESPE, convenio 96-058.

- Somoza, J; García, A. 2002.** *Escenarios macroeconómicos a largo plazo del desarrollo energético y su impacto ambiental.* INIE.
- Tejela, J; San Martín, T. 2010.** *Impermeabilización y aislamiento. Técnicas de aislamiento térmico y acústico.* 3 ed. Madrid : Tornapunta Ediciones, S.L.U. ISBN: 978-84-92686-61-2. 35 Pág.
- Trapeznikov, S. 2011.** *Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente.* Tesis de Doctorado, Instituto de Minas de San Petersburgos, Rusia, 95 Pág.
- UNE-EN ISO 12241. 2010.** *Aislamiento térmico para equipos de edificación e instalaciones industriales. Método de cálculo.*
- 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.
- Wang, B; Dong, L. 1995.** *Paraffin characteristics of waxy crude oils in China and the methods of paraffin removal and inhibition.* SPE 29 954.
- Weston, J; Brigham, E. 2009.** *Fundamentos de administración financiera. Vol 3.* La Habana : Felix Varela.
- WWF. 2010.** *Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO₂ del parque residencial existente en España en 2020.* Madrid : WWF/Adena.
- 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.

Zavattoni, S; Gaetano, A; Montorfano, D; Barbato, M; Ambrosetti, G;Pedretti, A.
2014. *A novel CSP receiver based on airlight energy technology - optimization of the thermal insulation system by means of CFD analysis.* Energy Procedia. Vol 49. Pág.589-598.

ANEXO 1

Clasificación de los hidrocarburos

La génesis del petróleo, se ubica en el depósito y descomposición de organismos de origen vegetal y animal, que hace millones de años quedaron atrapados en rocas sedimentarias en ambientes marinos o próximos al mar y que fueron sometidos a enormes presiones y elevadas temperaturas. La palabra petróleo, proveniente del latín “petroleum” y significa aceite de piedra ([Momemer, 2004](#); [Laurencio, 2007](#)).

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

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

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

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

1- Petróleo de base parafínicas.

- Predominan los hidrocarburos saturados o parafínicos.

- Son muy fluidos de colores claros y bajo peso específico (aproximadamente 0,85 kg/l).
- Por destilación producen abundante parafina y poco asfalto.
- Proporcionan mayores porcentajes de nafta y aceite lubricante.

2- Petróleo de base asfáltica o nafténica.

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

3- Petróleo de base mixta.

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

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

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

ANEXO 2

Tabla 1. Propiedades termofísicas de metales (Fuente: Incropera y De Witt, 2007).

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

Tabla 2. Propiedades termofísicas del aire (Fuente: Incropera y De Witt, 2007).

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

Tabla 3. Conductividad térmica de aislamientos (Fuente: ISOVER, 2015; Bergman *et al.*, 2011).

Temperatura [°C]	Conductividad térmica [W/m·K]	
	<i>TECH Wired Mat MT 6.1</i>	<i>Fiber glass</i>
50	0,0400	0,0577
60	0,0412	0,0624
70	0,0424	0,0664
80	0,0436	0,0708
90	0,0448	0,0751
100	0,0460	0,0794
110	0,0472	0,0839
120	0,0484	0,0882
130	0,0496	0,0926
140	0,0508	0,0969
150	0,0520	0,1013
160	0,0532	0,1057
170	0,0544	0,11
180	0,0556	0,1144
190	0,0568	0,1188
200	0,0580	0,1231

Tabla 4. Comportamiento de la temperatura del Crudo Mejorado 650.

Material aislante	Longitud del oleoducto [m]								
	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
Lana de roca	333	332,96	332,91	332,87	332,83	332,79	332,74	332,70	332,66
Lana de vidrio	333	331,87	330,75	329,62	328,50	327,37	326,25	325,12	324,00

Tabla 5. Pérdida total de calor (W/m) para diferentes temperaturas del vapor.

tv [K]	Espesores [m]						
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1	0,12
411	52,262	44,017	38,203	33,878	30,532	25,689	22,349
424	52,852	44,513	38,632	34,257	30,873	25,974	22,595
437	53,449	45,015	39,067	34,641	31,218	26,262	22,844
450	54,054	45,524	39,506	35,030	31,567	26,554	23,096
463	54,665	46,038	39,951	35,423	31,920	26,849	23,352
476	55,283	46,557	40,400	35,820	32,276	27,147	23,609

Tabla 6. Pérdida total de calor (W/m) para diferentes temperaturas del petróleo.

tp [K]	Espesores [m]						
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1	0,12
313	24,445	20,708	18,042	16,043	14,486	12,219	10,646
323	39,741	33,547	29,158	25,882	23,342	19,655	17,107
333	55,283	46,557	40,401	35,820	32,277	27,148	23,609
343	70,984	59,676	51,724	45,821	41,262	34,675	30,138

Tabla 7. Pérdida total de calor (W/m) para diferentes temperaturas ambientes.

to [K]	Espesores [m]						
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1	0,12
291	70,894	59,675	51,767	45,887	41,341	34,763	30,229
296	63,086	53,114	46,083	40,853	36,808	30,955	26,919
301	55,283	46,557	40,401	35,820	32,277	27,148	23,609
306	47,466	39,990	34,712	30,782	27,741	23,337	20,298
311	39,668	33,436	29,032	25,751	23,211	19,531	16,989

Tabla 8. Pérdida total de calor (W/m) para diferentes velocidades del viento.

V [m/s]	Espesores [m]						
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1	0,12
0,5	49,643	42,575	37,423	33,499	30,409	25,851	22,647
1	52,753	44,789	39,088	34,802	31,461	26,585	23,193
2,2	55,285	46,558	40,401	35,821	32,277	27,148	23,609
4	56,639	47,493	41,090	36,351	32,700	27,437	23,822
8	57,755	48,257	41,649	36,780	33,042	27,670	23,993
16	58,516	48,775	42,027	37,069	33,271	27,826	24,107
20	58,704	48,903	42,119	37,140	33,327	27,864	24,135

Tabla 9. Distribución de la pérdida total de calor.

Pérdidas de calor	Valor	%	Valor acumulado	% acumulado
q^P [W/m]	18,146	66,880	18,146	66,880
q^E [W/m]	8,986	33,120	27,132	100,000

Tabla 10. Costo total por espesor de aislamiento.

δ [m]	V_A [CUP/m]	I [CUC/m]	Ct [CUP+CUC/m]
0,04	36,178	11,050	47,228
0,05	30,468	13,650	44,118
0,06	26,439	15,350	41,789
0,07	23,441	17,550	40,991
0,08	21,122	19,700	40,822
0,1	17,766	23,050	40,816
0,12	15,450	25,450	40,900

Tabla 11. Ahorro de energía y monetario asociados al espesor de aislante térmico.

	Ahorro energía [W/m]	Ahorro energía [%]	Ahorro [CUP/m]	Ahorro CUP
respecto a 0,04	28,137	104	18,413	58 921,6
respecto a 0,05	19,411	72	12,702	40 646,4
respecto a 0,06	13,254	49	8,673	27 753,6
respecto a 0,07	8,673	32	5,676	18 163,2
respecto a 0,08	5,130	19	3,357	10 742,4

Para convertir los valores de energía en emisiones de CO₂ es necesario definir valores de conversión. En este caso, los valores de conversión utilizados son los siguientes:

Tabla 12. Valores de conversión de CO₂.

Energía empleada	Valores de conversión [Kg CO ₂ /kWh]
Gas Natural	0,2
Electricidad	0,486

Tabla 13. Emisiones de CO₂ por espesores de aislamiento.

δ [m]	q^T [kW]	Z [h]	E [kW·h]	Masa [Ton CO ₂ /kW·h]
0,04	176,909	7 670	1 356 890,50	659,449
0,05	148,986		1 142 719,55	555,362
0,06	129,283		991 602,14	481,919
0,07	114,624		879 166,08	427,275
0,08	103,286		792 206,69	385,012
0,1	86,870		666 295,97	323,820