

*Universidad de Matanzas
Sede "Camilo Cienfuegos"
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química e Ingeniería Química*



*Evaluación de las pérdidas de energía por mal estado del
aislamiento térmico en las líneas de vapor en el área de
Tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudos*

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniera Química

Autor: Midiala García Reyes

Tutores: Dr.C. Yoney López Hervis

Matanzas, Cuba 2019

Declaración de autoridad

Yo, Midiala García Reyes, me declaro como única autora de este trabajo realizado en la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniera Química y autorizo que el mismo sea utilizado por la mencionada Institución como material de consulta. Para que así conste, debajo firma:

Midiala García Reyes

Nota de aceptación

Presidente del tribunal: Firma:

Miembro del tribunal: Firma:

Miembro del tribunal: Firma:

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”

Albert Einstein

A mis padres por estar siempre a mi lado de forma incondicional.

A mi hermano, por confiar en mí y por su apoyo.

A mi familia, por haber contribuido a que se hicieran realidad mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido cumplir mis sueños.

A los mejores padres del mundo, por hacer de mi lo que hoy soy.

A mi hermano, por estar siempre a mi lado y brindarme su afecto y apoyo incondicional, por ser mi inspiración.

A mi novio Michel, por escuchar mis pensamientos, comprender mis sueños.

A mi tutor Yoney López por todo su apoyo, confianza y dedicación.

A mi prima por ser un ejemplo a seguir, y por estar ahí cada vez que he necesitado

A todos los profesores que me brindaron sus conocimientos durante el transcurso de la carrera.

A mis compañeros de aula por su compañía y solidaridad.

A todas aquellas personas que contribuyeron con su sincero apoyo y no dudaron en que pudiera convertirme en un profesional.

A todos los que me dieron un buen consejo y creyeron en mí para hacerme mejor persona, a todos.

A TODOS MUCHAS GRACIAS

Resumen

El presente trabajo se realiza en la Planta de Procesamiento de Crudos (PPC) correspondiente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP Centro), el cual tiene como objetivo determinar las pérdidas de calor y la influencia de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el tipo de aislante sobre estas pérdidas y el espesor del aislante instalado en el área de Tratamiento de la PPC. Para ello se caracteriza el proceso de tratamiento de crudos, se realiza un análisis del estado del aislamiento en las líneas de vapor y se estiman las pérdidas de energía por mal estado del aislamiento. Se determina el espesor del aislante seleccionado en función de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el tipo de aislante. Se determina el ahorro de combustible por concepto del aislamiento en las tuberías de vapor. Según los cálculos realizados ya sea en convección libre o convección forzada, el aislante adecuado para las tuberías es el de Fibra de Vidrio, que es el que se utiliza en la planta, por ser el que menos pérdidas proporciona. Los espesores calculados son: 0,045 m para las tuberías de 3 pulgadas verticales, 0,05 m para las tuberías de 8 pulgadas verticales, 0,06 m para las tuberías de 10 pulgadas verticales y para todas las horizontales es de 0,06 m, pues con estos se garantiza la temperatura superficial (52 °C), según establece la norma ASTM F683-00 ante todas las condiciones analizadas. Se determina la reducción de las pérdidas de calor con el espesor del aislante instalado por convección libre (21 - 33%) y por convección forzada (6 - 17%). Con los espesores calculados se reducen las pérdidas por convección libre (12 - 21%) y por convección forzada (3 - 10%). Se genera un ahorro del gas combustible entregado por ENERGAS de más de 4 millones de CUC/a, con un beneficio bruto equivalente cercano a 3,5 millones de CUC/a.

Abstract

The present work is carried out in the Plant of Prosecution of Raw (PPC) corresponding to the Company of Perforation and Extraction of Petroleum of the Center (EPEP Center), which has as objective to determine the losses of heat and the influence of the ambient temperature, the speed of the wind and the type of insulating about these losses and the thickness of the insulating one installed in the area of Treatment of the PPC. For it is characterized it the treatment process of raw, it is carried out an analysis of the state of the isolation in the lines of vapor and they are considered the energy losses for not well state of the isolation. The thickness of the insulating one is determined selected in function of the ambient temperature, the speed of the wind and the type of insulating. The saving of fuel is determined by concept of the isolation in the pipes of vapor. According to the calculations, either carried out in free convection or forced convection, the insulating one appropriate for the pipes it is that of Fiber of Glass that is the one that is used in the plant, to be the one that less losses provide. The calculated thickness are: 0,045 m for the pipes of 3 vertical inches, 0,05 m for the pipes of 8 vertical inches, 0,06 m for the pipes of 10 vertical inches and for all the horizontal ones it is of 0,06 m, because with these the superficial temperature is guaranteed (52 °C), as it establishes the norm ASTM F683-00 before all the analyzed conditions. The reduction of the losses of heat is determined with the thickness of the insulating one installed by free convection (21 - 33%) and for forced convection (6 - 17%). With the calculated thickness they decrease the losses for free convection (12 - 21%) and for forced convection (3 - 10%). a saving of the combustible gas is generated surrendered by ENER GAS of more than 4 millions of CUC/a, with a near equivalent gross benefit at 3,5 millions of CUC/a.

Simbología:

- ECOFYS (Fundación Europea del Aislamiento Industrial)
- MW (Mega Watt)
- CO₂ (Dióxido de carbono)
- CONUEE (Comisión Nacional para el uso eficiente de la energía)
- BSW (Porcentaje de sólidos y sedimentos)
- API (Unidad de medida norteamericana utilizada para medir la densidad del crudo)
- ERE (Estaciones de Rebombeo Este)
- ERO (Estaciones de Rebombeo Oeste)
- ECO (Estación Cabecera del Oleoducto)
- EROVM (Estación de Rebombeo del Oleoducto Varadero Matanzas)
- SRV (Sustancia Reductora de Viscosidad)
- PPC (Planta de Procesamiento de Crudos)
- T_{S1} (Temperatura de superficie interior)
- T_{S2} (Temperatura de superficie exterior)
- q'' (Densidad de flujo de calor transferido, W/m²)
- L/k , (Resistencia a la transferencia de calor por conducción en paredes planas)
- r_1 (Radio interior, m)
- r_2 (Radio exterior, m)
- L (Longitud)
- k (Conductividad térmica, W/mK)
- T_2 (Temperatura entre las superficies de dos aislantes)
- Re (número de Reynolds)
- in V (Diámetro en pulgadas de tuberías verticales)
- in H (Diámetro en pulgadas de tuberías horizontales)

- q (flujo de calor, W)
- q' (Densidad de flujo de calor, W/m)
- h (Coeficiente convectivo de transferencia de calor, W/m²K)
- T_{∞} (Temperatura del medio, °C)
- A (Área de transferencia de calor)
- Nu (Número de Nusselt)
- Pr (Número de Prandtl)
- Ra (Número de Rayleigh)
- η_{gv} : (Eficiencia de los generadores de vapor)
- ΔB : (Sobreconsumo de combustible)
- VCI : (Valor calórico inferior del combustible, kJ/kg)
- ΔQ_{abs} : (Diferencia entre el calor perdido de las tuberías bien aisladas y las mal aisladas o sin aislantes, W)
- CU_{GN} : (Costo unitario de gas natural, CUC/Sm³)
- cn (Convección natural o libre)
- cf (Convección forzada)
- GV (Generador de vapor)

Índice

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico.....	4
1.1 Importancia del aislamiento térmico en las instalaciones industriales	4
1.1.1 Retos industriales sobre el consumo y recuperación de energía.....	5
1.1.2 Principales retos y algunas pautas para afrontarlos.....	6
1.1.3 Importancia del uso eficiente del vapor en la industria.....	7
1.2 Aislamiento térmico. Generalidades.....	9
1.3 Materiales aislantes. Características y Aplicaciones.....	11
1.3.1 Materiales aislantes y sus características.....	12
1.4 Mecanismos de Transferencia de calor. Ecuaciones fundamentales en la selección de aislamiento térmico.....	16
1.5 Conclusiones parciales del capítulo 1.....	18
Capítulo 2. Materiales y Métodos.....	19
2.1 Caracterización de la Planta de Procesamiento de Crudos	19
2.2 Descripción del proceso tecnológico de la Planta de Procesamiento de Crudos.....	20
2.3 Descripción del caso de estudio	22
2.4 Metodología para el cálculo del espesor del aislante a instalar.....	23
2.4.1 Conducción Unidimensional	23
2.4.2 Conducción unidimensional en estado estacionario	24
2.4.3 Paredes Cilíndricas.....	25
2.4.4 Paredes planas compuestas.....	26
2.4.5 Paredes cilíndricas compuestas.....	27
2.4.6 Características del flujo y la transferencia de calor en tubos con flujo transversal	28
2.4.7 Correlación para la convección	29
2.4.8 Correlaciones empíricas para estimar la transferencia de calor en tubos.....	30
2.4.9 Características del flujo y la transferencia de calor por convección natural o libre.....	31
2.4.10 Correlaciones empíricas	32
2.5 Guía Práctica Standard para la Selección y Aplicación de Aislamiento Térmico en Tuberías y Equipos de procesos según la norma ASTM F 683 – 00.	33
2.6 Análisis de las pérdidas económicas por el mal estado del de aislamiento	36
Capítulo 3: Resultados y discusión	38
3.1 Cálculo de las pérdidas de calor y la temperatura superficial del aislante.....	38

3.2 Análisis de las pérdidas económicas generadas por concepto del mal estado del aislante instalado	40
3.2.1 Evaluación de Generación Vapor en Sala de Calderas.....	40
3.3 Análisis de la Influencia de la temperatura ambiente sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante	45
3.4 Análisis de la Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante.....	47
3.5 Análisis de la Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante	49
3.6 Análisis de la Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante	50
3.7 Análisis de la Influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante ..	51
3.8 Análisis de la Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante.....	53
3.9 Resultados del cálculo del espesor del aislante propuesto para instalar.....	55
3.10 Beneficio bruto asociado a la instalación del espesor de aislante propuesto	57
3.11 Conclusiones parciales del capítulo 3.....	59
Conclusiones.....	60
Recomendaciones.....	61
Bibliografía.....	62
Anexos.....	66

Introducción

El petróleo es una mezcla en la que coexisten en fase sólida, líquida y gas, compuestos denominados hidrocarburos, con presencia de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. Su color varía entre ámbar y negro. La búsqueda de petróleo en Cuba comienza desde el siglo XIX. Sin embargo, fue después de 1959 que se trabajó en búsqueda de campos petroleros, con un enfoque serio y sistemático (REN21, 2018).

La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro) se funda en 1976. Se encuentra ubicada en la finca “La Cachurra” del poblado de Guásimas, Municipio Cárdenas, Provincia Matanzas. Los niveles de producción anual se encuentran alrededor de 1,5 millones de toneladas de petróleo y 438 millones de metros cúbicos de gas. Esta empresa es la encargada de supervisar y dirigir toda la actividad petrolífera en la región central de Cuba. Entre sus tareas fundamentales se encuentra la perforación y extracción de petróleo en los yacimientos ubicados en la región y el tratamiento del crudo para su posterior comercialización. La Planta de Procesamiento de Crudos (PPC) perteneciente a la UEB Producción en la que se tratan los crudos provenientes de los centros colectores y los pozos aislados (Periféricos) para alcanzar los parámetros de calidad requeridos para posteriormente enviarlos por el Oleoducto Magistral Varadero Matanzas hacia la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas. Para ello, en la PPC se aplica un tratamiento termoquímico basado en la adición de sustancias reductoras de viscosidad y desemulsionantes, para favorecer la separación de las fases agua-petróleo, y la elevación de temperatura hasta alrededor de 85°C. Este parámetro define la calidad y la eficiencia en el proceso de tratamiento, además de favorecer los procesos de coalescencia y floculación de la emulsión. La generación y transporte de vapor como agente de calentamiento es de vital importancia en el proceso descrito. Por esta razón, es imprescindible la utilización de aislamiento térmico en las líneas de vapor y crudo.

El aislamiento térmico se utiliza en la industria desde el comienzo de la era industrial, aunque el desarrollo se produjo a partir de la segunda década del siglo XX. Son materiales o combinaciones de éstos que se utilizan para aumentar la resistencia al paso del calor en equipos, depósitos, tuberías, entre otros; que se construyen con materiales metálicos con elevadas conductividades térmicas (IEA, 2018).

La reducción del flujo de calor aportada por el aislamiento, supone en primer lugar un ahorro importante en la partida correspondiente al costo energético, pero también posibilita el correcto desarrollo de los diferentes procesos industriales. Otra parte importante a considerar, como consecuencia de la reducción de las fugas térmicas, es el control de temperatura de la superficie exterior (cara fría) que pueden suponer un riesgo para las personas por quemaduras, así como evitar su incidencia sobre la temperatura ambiente, cuando los equipos se sitúan en locales con presencia de personas (mantenimiento u otra actividad).

Los materiales aislantes para esta aplicación, se presentan en forma de mantas o fieltros y en forma de paneles flexibles o semirrígidos, elegidos en cada caso de acuerdo con la temperatura de trabajo y su mejor adaptabilidad para el montaje, en función de las características geométricas y dimensiones de los equipos. Hay un elemento común que habría de tener en cuenta en todo tipo de montaje de aislamiento sobre chapa metálica: la preparación de la superficie a aislar; esta ha de estar, en la medida de lo posible, libre de humedad y de partículas sueltas provenientes del montaje (rebarbas, restos de soldadura, tierra y otros). Si se trata de superficie de acero inoxidable, es conveniente también hacer que se aplique previamente un tratamiento anticorrosivo adecuado, cuidando especialmente las bridas o zonas donde se prevea una interrupción del aislamiento y haya posibilidad de presencia de agua o humedades

Según Conuee, 2009, en la Planta de Procesamiento de Crudos, las pérdidas de energía en las tuberías de vapor, debido a la falta o mal estado del aislamiento, repercuten grandemente en el proceso de calentamiento de los tanques de tratamiento. Actualmente, todo proceso industrial contempla dentro de su entorno económico la reducción de los costos energéticos. En Cuba se trabaja intensamente para lograr una mejor gestión energética. Precisamente, a tono con la política de mejoramiento continuo y de alcanzar un crecimiento sostenido, se han tomado una serie de medidas que han permitido la superación de muchas de las dificultades existentes en las instalaciones energéticas en toda Cuba, y dentro de ellas en la Planta de Procesamiento de Crudos de la EPEP Centro, de ahí que se propone el siguiente **Problema Científico:**

¿Cómo influyen la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante de las tuberías de vapor sin aislamiento o mal aisladas en el área de tratamiento del crudo?

Para darle tratamiento y solución al problema, se propone la siguiente **Hipótesis**:

Si se determina la energía perdida en las tuberías sin aislamiento o mal aislado, y la influencia de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el tipo de aislante en las líneas de vapor del área de Tratamiento, se podrá determinar el espesor de aislante que cumpla con la temperatura superficial del aislante, según la norma vigente. Por lo anterior expuesto el **Objetivo General** es:

Determinar la influencia que trae para el proceso de calentamiento del crudo las pérdidas de energía en las tuberías de vapor del área de Tratamiento y el espesor del aislante que garantice la temperatura superficial según la norma vigente.

Para darle cumplimiento al objetivo propuesto se desarrollarán las siguientes **Objetivos específicos**:

1. Caracterizar el proceso de procesamiento del crudo que se lleva a cabo en EPEP – Centro.
2. Determinar las pérdidas de energía en las tuberías de vapor del área de Tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudos.
3. Estimar la influencia de las pérdidas de energía en la Generación de Vapor.
4. Determinar la influencia de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante.
5. Proponer el espesor de aislante en las tuberías de vapor del área de Tratamiento que garantice la temperatura superficial normada.
6. Determinar el ahorro por concepto de reducción de las pérdidas de calor al instalar el diámetro de aislante propuesto.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

En este capítulo se expondrán los fundamentos teóricos reportados en la literatura científica que sustentan la investigación que aborda el tema de la investigación, en lo que se refiere a aislamiento térmico en las líneas de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP-Centro.

1.1 Importancia del aislamiento térmico en las instalaciones industriales

Según el estudio ECOFYS de la Fundación Europea del Aislamiento Industrial EiiF realizado en 2014 (ECOFYS, 2014), las comprobaciones en plantas industriales realizadas por expertos, muestran que al menos un 10% de las instalaciones o no están aisladas, o lo están pero tienen el aislamiento en malas condiciones. Además, el aislamiento aplicado habitualmente se basa en una decisión de inversión mínima, teniendo en cuenta sólo la temperatura superficial para evitar daños personales, las necesidades mínimas del proceso industrial o los promedios genéricos de pérdidas de calor.

Según el estudio ECOFYS (2014), se estima que el potencial de ahorro en el sector industrial equivale a 15 plantas de generación de energía alimentadas por carbón (alrededor de 500 MW) o el consumo energético de 10 millones de viviendas. De esta manera, el potencial anual de reducción de emisiones de dióxido de carbono sería el equivalente a las emisiones de 18 millones de automóviles. A nivel de toda Europa, aislar superficies a niveles rentables y reparar aislamientos estropeados en instalaciones industriales, implica una inversión inicial de unos 900 millones de euros. Esta inversión inicial ahorraría a la industria unos 3,5 billones de euros cada año.

A menudo, los requisitos relacionados con la rentabilidad económica o la máxima eficiencia energética del sistema de aislamiento no están considerados. En el pasado, con los precios del petróleo más bajos, la eficiencia energética de la instalación no representaría una diferencia tan grande. Hoy día, el precio de la energía es mucho más alto e incluso se espera que continúe incrementándose (Afelma, 2016). Por esta razón, la brecha entre el aislamiento actual y el aislamiento económicamente rentable, se está incrementando. Los costos adicionales por emisiones de dióxido de carbono aceleran este potencial de ahorro.

1.1.1 Retos industriales sobre el consumo y recuperación de energía

La industria requiere de una gran cantidad de energía térmica y eléctrica para llevar a cabo sus procesos productivos. La energía se utiliza como un recurso necesario e insustituible para elaborar los productos con la calidad exigida. Por tanto, como cualquier otro servicio habrá que adquirirlo o transformarlo y adecuarlo a las necesidades de su utilización; transportarlo a los puntos de consumo y; por último, posibilitar su uso por los consumidores. Además, puesto que la energía no se destruye, habrá que recuperar la energía residual que quede tras su uso. Existen un conjunto de procesos que no están directamente implicados en la producción de combustibles, pero que tienen una misión auxiliar. Estos son los sistemas de producción de vapor, colectores de residuos, entre otros (Gary, 2012).

Sarco (2018) explica que posterior a la generación del vapor es necesario un medio para llevar la energía del vapor hacia los procesos que lo requieren. Este medio de transporte es conocido como la red de distribución de vapor y retorno de condensado, que a su vez está conformada por una serie de elementos. Líneas o redes, generalmente de acero, cuya función es llevar el vapor desde los generadores hacia los equipos consumidores. Estas líneas deben ser seleccionadas de acuerdo al flujo y presión que circula por ellas. Una mala selección ocasionará pérdidas de energía y daños en válvulas, trampas de vapor o equipos consumidores.

Según Gutiérrez (2013), el vapor de agua es un servicio muy común en la industria, que se utiliza para proporcionar energía térmica a los procesos de transformación de materias primas a productos, por lo que la eficiencia del sistema para generarlo, la distribución adecuada y el control de su consumo, tendrán un gran impacto en la eficiencia total de la planta. Esta situación se refleja en los costos de producción del vapor y, en consecuencia, en la competitividad y sustentabilidad de cualquier empresa.

Según Nordelo (2010) la aplicación más común es un intercambiador de calor. A parte de ser fácil de transportar por medio de una red de tuberías, el vapor es un excelente medio de transporte de energía, aunque también presenta algunas limitantes como la generación de condensado en las redes, en muchas ocasiones con problemas de corrosión.

Adicionalmente el agua con que se genera el vapor debe presentar determinadas características en cuanto a calidad, por lo que es necesario un pretratamiento antes de su uso para generar vapor. Un sistema típico de vapor está constituido por tres secciones, las cuales conforman un ciclo. La primera sección corresponde a la *Generación*. Durante esta etapa, en un generador de vapor, se aplica calor al agua de alimentación para elevar su temperatura. Después de que el agua se ha evaporado, pasa a la segunda etapa del ciclo de vapor: *Distribución*, esto es simplemente el movimiento del vapor de agua en un sistema cerrado a su punto de consumo. Finalmente la tercera y última sección que completa el ciclo de vapor es el *Retorno del condensado* (Bautista, 2012).

Según Thermal Insulation (1997) la calidad del agua de alimentación al generador de vapor repercute directamente sobre el buen funcionamiento del mismo, así como sobre la vida de muchos de los elementos que lo conforman.

Los generadores de vapor más utilizados en la industria petrolera tienen una eficiencia entre 85 y 89%, de acuerdo a la ASME Power test code (*PTC*) para pruebas de potencia en unidades de generación de vapor, y eficiencia en generadores de vapor de *Council of Industrial Boiler Owners, Energy Efficiency Handbook* (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2015).

1.1.2 Principales retos y algunas pautas para afrontarlos

García (2017) alega que la gestión y compromiso frente al cambio climático, y su consiguiente necesidad drástica de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es un reto global y, como tal, debe abordarse a escala mundial. Es fundamental que se consigan compromisos firmes de todos los países, principalmente de los mayores emisores (China, India, Rusia y EEUU). Los mercados de derechos de emisión, como el europeo, desempeñan un papel clave en este sentido, pero, al igual que en otros mercados, es importante contar con reglas claras en su funcionamiento. Además, se requieren señales patentes de cómo se van a coordinar los diferentes mercados de emisión de distintas partes del mundo.

El papel del petróleo seguirá siendo principalmente relevante en los sectores del transporte, debido a la elevada densidad energética de esta fuente, y la petroquímica, en los que la sustitución por otras alternativas es más complicada según Cener, 2012 . Sin

embargo, irá disminuyendo su participación, como consecuencia del auge de otras fuentes energéticas como el gas natural, los biocombustibles y la electricidad, incluyendo además la hibridación de los vehículos, para el caso del transporte (GSR, 2018). La seguridad de suministro en el ámbito del petróleo dependerá de múltiples factores, como la estabilidad geopolítica de los países de origen de crudos y productos, los costos de transporte y la seguridad de las rutas principales, las infraestructuras necesarias para el refinado y las unidades de proceso que permitan operar con menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y atender a una demanda con especificaciones cada vez más exigentes. Es, por tanto, necesario que países como Cuba cuya dependencia de la inversión extranjera es muy elevada, fomenten y apoyen la producción autóctona de energías que sean competitivas, para lo cual resulta fundamental comenzar por el conocimiento de la existencia e importancia de estos recursos y los medios para obtenerlos, sin olvidar la necesidad de concienciar a la sociedad sobre su relevancia. Además, se deben adoptar medidas de diversificación del riesgo en lo que respecta a países de origen del petróleo y productos, buscar alternativas para el transporte hacia zonas más seguras (siempre con costos y tiempos aceptables), y proporcionar políticas flexibles para los almacenamientos de seguridad que permitan minimizar los costos. El aumento de la capacidad de interconexiones energéticas entre países, para la creación de un verdadero mercado único de la energía, también juega un papel clave en este sentido. En el ámbito de la distribución y comercialización, habrá que hacer importantes esfuerzos para modernizarse e ir adaptándose a los nuevos productos, y tecnologías, como ya se viene haciendo durante los últimos años, incorporando medidas adicionales de sistemas de control automático y de protección del medio ambiente.

1.1.3 Importancia del uso eficiente del vapor en la industria

La energía es un recurso vital en la actividad industrial y como tal debe ser considerado en la planificación, dirección y seguimiento por parte de la empresa. El ahorro y uso eficiente de la energía es el eje central de la estrategia en cualquier programa de ahorro de energía. La experiencia en la aplicación de programas de ahorro de energía ha demostrado que con el incremento de la eficiencia energética se obtienen beneficios económicos adicionales a la reducción en el costo de la energía, junto con la posibilidad de incrementar la producción y la reducción de emisiones contaminantes (Barriga, 2016).

El vapor de agua es uno de los medios de transmisión de energía calórica de mayor efectividad en la industria, se estima que este servicio es utilizado por el 95% de las industrias como medio de calentamiento, por su fácil generación, manejo y bajo costo comparado con otros sistemas (Betancur, 2017).

Tradicionalmente en los sistemas de vapor han centrado sus esfuerzos en aumentar o mejorar la eficiencia energética de los generadores y en las redes de distribución, por lo que se han implementado nuevas metodologías que permitan abordar de forma estructurada cada uno de estos aspectos. El problema energético y medioambiental que existe a nivel mundial, se manifiesta a través de un horizonte finito y cercano para los combustibles no renovables y el calentamiento del planeta a través del efecto invernadero. Esto ha llevado a las diferentes administraciones a implementar políticas energéticas dirigidas a fomentar el uso racional de la energía y la eficiencia energética como se muestra en la Figura 1.1:

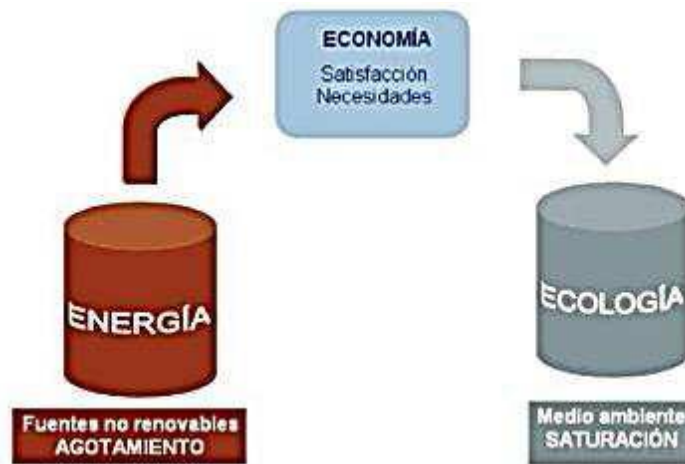


Figura 1.1: Resumen del Problema energético

Así, la estrategia global y local en el ámbito energético a desarrollar en cualquier país o región, debe primar el ahorro de energía, por su efecto favorable sobre el medio ambiente y de la economía de la empresa. La eficiencia energética, el ahorro y la diversificación de energía, el aprovechamiento de energías residuales y de las energías renovables, tienen como principal objetivo obtener un rendimiento energético óptimo para cada proceso o servicio en el que su uso sea indispensable, sin que ello signifique una disminución de la productividad, calidad o del nivel de confort del servicio. El objetivo es reducir la cantidad

de energía necesaria para mantener el equilibrio del proceso y evitar el flujo de calor a través del material. Esto se consigue, gracias a la instalación del aislamiento (Pemex, 2004).

1.2 Aislamiento térmico. Generalidades

El aislamiento térmico es con mucho el mejor método de ahorro de energía conocido. La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE; 2009) explica que los aislamientos térmicos son materiales o combinaciones de éstos que se usan para suministrar resistencia al flujo de calor. La mayor parte de ellos son materiales heterogéneos, los cuales tienen baja conductividad térmica y contienen bolsas de aire. Esto no es sorprendente, ya que el aire tiene una de las conductividades térmicas más bajas y se dispone de él con facilidad.

En ese mismo sentido, Gerdipac Industrial (2017) afirma que el aislamiento reduce la pérdida de calor y, de este modo, ahorra combustible y dinero. Por lo tanto, el aislamiento se paga por sí mismo gracias a la energía que ahorra. Aislar de manera apropiada requiere de inversión de capital, pero sus efectos son espectaculares y de largo plazo. El período de recuperación de la inversión a menudo es menor a un año. Aunado a estos ahorros, el aislamiento también ayuda al medio ambiente y combate la contaminación del aire y el efecto invernadero al reducir la cantidad de combustible que se quema y, de este modo, la cantidad de dióxido de carbono y otros gases que se liberan a la atmósfera.

Es fundamental la utilización del aislamiento térmico por:

- Las necesidades del proceso, debido a que deben evitarse transferencias térmicas que invaliden el proceso por diferencias de temperaturas no admisibles.
- Seguridad de las personas y bienes. Si no existe aislamiento térmico suficiente, las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar lesiones y accidentes en las personas. En el límite, producir efectos de combustión e incendio en materiales combustibles próximos a estas superficies.
- El aislamiento térmico reduce las pérdidas energéticas, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento. Es con

mucho el mejor método de ahorro de energía conocido, por lo que permite la amortización del material aislante instalado en períodos de tiempo muy bajos.

- Reduce 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. La composición química de los combustibles, debido a su origen orgánico, es mayoritaria en carbono (C), con porcentajes variables de hidrógeno (H), oxígeno (O), azufre (S) y nitrógeno (N), entre otros. Por ello, el contaminante atmosférico más abundante que se produce es el dióxido de carbono. En menores proporciones, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono.
- Prevención de la corrosión y la condensación.
- Efecto invernadero; el dióxido de carbono es un gas incoloro e incombustible. Representa el más alto porcentaje de efluentes atmosféricos en los procesos de combustión y tiene una alta capacidad calórica.
- La lluvia ácida; el dióxido de azufre emitido a la atmósfera por la combustión de algunas fuentes energéticas primarias (carbón, petróleo), es mucho menor en cantidad que el dióxido de carbono, pero sus valores anuales globales son importantes y sus consecuencias también muy graves. Además, el dióxido de azufre es un gas indeseable desde el punto de vista sanitario. En el mundo, millones de personas deben soportar problemas respiratorios a causa del dióxido de azufre. Por otra parte, el dióxido de azufre producido se difunde por la atmósfera y es arrastrado por los vientos. Mediante la humedad y la lluvia, se transforma sucesivamente en ácido sulfuroso y ácido sulfúrico diluidos, capaces de atacar los materiales con los que entre en contacto. Constituye la llamada "lluvia ácida". Uno de los aspectos más importantes de este fenómeno son las consecuencias de la "lluvia ácida" sobre las masas forestales y los cultivos (Isover, 2004).
- Reducción del ruido y la vibración; el aislamiento acústico en la industria tiene dos objetivos principales: proteger los oídos del personal que trabaja cerca o en las instalaciones y reducir el sonido ambiente en el entorno local, particularmente cuando está situado en áreas urbanas.

El aislamiento térmico es el método donde se recubre una superficie con materiales aislantes con la finalidad de proporcionar resistencia al flujo de calor y reducir la transferencia del mismo. Con este proceso se busca minimizar las pérdidas de energía por transferencia de calor, proteger al equipo, al personal y al medio ambiente.

Según Isover (2004b) existen diferentes ventajas para el aislamiento, entre las que se encuentran:

- Conservación de la energía.
- Protección y comodidad personales.
- Mantenimiento de la temperatura del proceso.
- Prevención de la corrosión y la condensación.
- Reducción del ruido y la vibración.

Según Conuee (2009) el sistema de aislamiento dependerá del tipo de requerimiento que se necesite en cada proceso; pueden utilizarse combinaciones para resguardar un mismo proceso.

1.3 Materiales aislantes. Características y Aplicaciones

Dentro de esta sección se definirán la tipología de materiales a utilizar para el aislamiento térmico. Todos los materiales a utilizar deberán ser nuevos, estar correctamente embalados y libres de humedad antes de su instalación. Es imprescindible que dichos materiales tengan certificado de origen, fichas técnicas y de seguridad. Las características y rango de aplicación de cada material serán los que aparezcan en la ficha técnica en su última revisión (Conuee, 2009).

Las características fundamentales que deben aportar los materiales aislantes son (Rodríguez, 2015):

- Ahorro de energía: Mediante un elevado aislamiento térmico, que dificulte el flujo de calor a través del material.
- Prestaciones acústicas óptimas: que facilite la transformación de energía acústica en energía cinética.
- Seguridad: No deben arder ni producir humos y mantener su capacidad de aislamiento térmico incluso a altas temperaturas.

1.3.1 Materiales aislantes y sus características

Dentro de esta sección se definirán la tipología de materiales a utilizar para el aislamiento térmico. Todos los materiales a utilizar deberán ser nuevos, estar correctamente embalados y libres de humedad antes de su instalación. Es imprescindible que dichos materiales tengan certificado de origen, fichas técnicas y de seguridad. Las características y rango de aplicación de cada material serán los que aparezcan en la ficha técnica en su última revisión (Conuee, 2009).

Existen diferentes tipos de materiales aislantes térmicos entre los que se encuentra:

1. Materias minerales fibrosas, como el vidrio, la sílice, las rocas, las escorias o el asbesto (ya en desuso).
2. Materiales orgánicos fibrosos, como la caña, el algodón, el caucho, la madera, la corteza de árbol y el corcho.
3. Plásticos, como el poliestireno o poliuretano.
4. Materiales que reflejan el calor (que deben dar a espacios vacíos o llenos de aire o gas).

Las formas físicas más comunes de los tipos de aislamiento industriales y de la construcción son:

- De relleno suelto y cemento: son polvos, gránulos o nódulos con los que se puede revestir. El cemento aislador es un material suelto que, cuando se mezcla con agua para obtener plasticidad o adhesividad, se puede aplicar sobre una superficie y dejar que se seque para que sirva como aislante.
- Flexible y semirrígido: se pueden obtener materiales con grados variables de compresibilidad y flexibilidad, bloques fibrosos, en láminas y rodillos de muchos tipos y variedades. Las cubiertas y las caras se pueden sujetar a uno o los dos lados y servir como refuerzos, barreras de protección contra el vapor, superficies de reflexión o acabados superficiales. Los aisladores se proporcionan en una gran variedad de tamaños y espesores estándares que facilitan su manejo.

- Rígido: estos materiales existen en bloques, placas o láminas, reconformados durante la fabricación, de espesores, anchuras y longitudes estándares. Están disponibles para tuberías y superficies curvas en segmentos o secciones medias, en los que los radios de curvatura se ajustan a los tamaños estándares de las tuberías y los tubos.
- De reflexión: se dispone de material de reflexión en láminas y rodillos de construcción de una o varias capas.
- Moldeados en el sitio: estos materiales existen como componentes líquidos que se pueden verter o rociar en el sitio para formar espumas aisladoras rígidas o semirrígidas.

Los materiales auxiliares para el aislamiento térmico incluyen sujetadores, tanto mecánicos como adhesivos; acabados, como forros y caras rectificadas, que pueden servir como protección o barrera contra el vapor; adhesivos retardados, selladores, membranas y compuestos de protección.

Los materiales más frecuentemente empleados en la industria del aislamiento son:

- **Silicato de calcio:** Es un aislamiento granular formado con silicato hidratado de calcio y sílice sin asbesto, reforzado con fibras orgánicas e inorgánicas. Mantiene integridad física a temperaturas muy altas y es incombustible. Es un material que se distingue por su durabilidad, resistencia y calidad en plantas industriales donde el abuso físico es un inconveniente. Una desventaja es que absorbe gran cantidad de agua aunque permite ser secado a la intemperie. Su rango de servicio térmico abarca desde los -18 °C hasta 650 °C, aproximadamente. En el Anexo 1 se muestra el Silicato de calcio.
- **Fibra de vidrio:** Este aislante se forma a partir de vidrio fundido con materiales inorgánicos y se aglutinan con resinas orgánicas. Es un material muy versátil debido a su gran eficiencia térmica, estabilidad dimensional, incombustible, gran absorción acústica y livianos (baja densidad). Su rango de servicio térmico es entre -40 y 540 °C. En el Anexo 2 se muestra la Fibra de vidrio.
- **Fibras minerales y lana de roca:** Se fabrican a partir de roca o escoria de hornos, sus fibras son cortas y pesadas por lo que necesitan mallas metálicas para mantener su integridad. Por su estructura permite el paso de vapor de agua, lo

cual reduce el riesgo de condensación en su interior. Puede utilizarse en un rango grande de temperatura, que abarca desde los 0 hasta 1000 °C, aproximadamente. En el Anexo 3 se muestra la Fibras minerales y lana de roca.

- **Perlita:** Es un producto vitrificado, fabricado a partir de cristales de roca volcánica y su estructura se mantiene por aglutinantes y fibras. Es un material muy frágil y abrasivo, no se pueden emplear en partes sometidas a vibraciones. Posee resistencia al fuego, no es inflamable ni tóxico. Su rango de servicio térmico va desde los 0 °C hasta los 750 °C aproximadamente (Afelma, 2016). En el Anexo 4 se muestra la Perlita.

Las propiedades de los materiales aislantes de mayor demanda según Pemex (2004) y (Fiber Glass Colombia C.A, 2013) son:

- Límites de temperaturas: el rango de temperatura donde el material conserva sus propiedades.
- Conductividad térmica: de ella depende la cantidad de calor que se transfiere a través del material.
- Alcalinidad o acidez: el material no debe contribuir con la corrosión.
- Coeficiente de expansión y contracción: determinar su comportamiento en operación.
- Combustibilidad: el material no debe contribuir con el riesgo de incendio.
- Resistencia a la compresión: deben ser capaces de soportar cargas y sufrir abuso mecánico.
- Emisividad: capacidad del material de transferir calor a través del mecanismo de radiación.
- Estabilidad dimensional: mantener sus propiedades a lo largo de grandes extensiones.
- Resistencia al fuego: no contribuir con la propagación de fuego y producción de humo.
- Resistencia al crecimiento de hongos y bacterias: no permitir el desarrollo de microorganismos.
- Impermeabilidad: capacidad de no permitir el paso de sustancias a través de él.
- Toxicidad: no debe contribuir al desprendimiento de gases tóxicos.

Según (Conuee, 2009) la calidad funcional de un material aislante depende de las propiedades del producto elegido y del montaje. Dado que los materiales aislantes se definen como tales por una propiedad física que expresa la facilidad o dificultad con que el calor atraviesa el material conductividad térmica y que ésta es bastante parecida para toda la oferta, las diferencias en el resultado final son debidas a los distintos sistemas de montaje. En función de los distintos comportamientos, los materiales deberán montarse de forma que se minimicen los puentes térmicos. Si un material tiene una variación dimensional entre el 5% y el 7% en volumen, deberá realizarse el montaje a través de machihembrado o la doble capa, evitando siempre la continuidad de las juntas. Los materiales minerales, lana de vidrio y lana de roca, están compuestos por silicatos y óxidos metálicos, lo que explica que las variaciones dimensionales expresadas en tanto por ciento en volumen sean del 0% (ni siquiera como métodos dilatométricos muy sofisticados se consigue la medición). El comportamiento al fuego exigirá el montaje de protecciones en obra o metálicos para evitar la combustión y destrucción del aislamiento. La estructura química de los materiales minerales asegurará, además, que no se desprenderán gases tóxicos sometidos al fuego directo. La temperatura máxima de utilización no está regulada como Norma UNE, pero como criterio se utiliza en el resto de Europa que la Temperatura máxima de empleo es aquella en la que el material alcanza una deformación del 5% del espesor bajo una carga uniforme constante de 1 kPa.

La determinación de un espesor de aislamiento térmico obedece, en algunos casos, a condiciones exclusivamente técnicas, pero las inversiones en aislamiento poseen un carácter económico. Por ello es necesario introducir criterios económicos en la selección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor, ya que el costo total será mínimo precisamente para el espesor óptimo económico (Isover 2004a; Isover 2004b; Idae 2007).

La existencia de un espesor óptimo de aislamiento para los sistemas radiales (tuberías sin trazas) es explicada por la presencia de efectos inversos asociados a un incremento del espesor; por tanto, el espesor óptimo de aislamiento es aquel que hace mínima la pérdida de calor maximizando la resistencia térmica total (Incropera *et al.* 2011).

De acuerdo con las expresiones Isover (2004a) plantea que las pérdidas de energía disminuyen con el aumento del espesor de aislamiento, lo cual coincide con lo expresado por diferentes autores (Haiqian et al, 2012; Luamkanchanaphan, 2012; Chotikaprakhan&Jarusombati 2012; Bomberg, 2013; Huang& Zhang, 2014; Zavattoni et al, 2014; Lulic et al, 2014). De ahí que se proceda a determinar para cada inversión en aislamiento el valor actualizado neto de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión.

1.4 Mecanismos de Transferencia de calor. Ecuaciones fundamentales en la selección de aislamiento térmico

La transferencia de calor se puede definir como la energía en tránsito que fluye debido a una diferencia de temperatura. Cuando existen dos o más cuerpos, ya sean fluidos o sólidos, que tengan diferencias de temperaturas debe ocurrir el intercambio de calor del medio que se encuentra a mayor temperatura hacia el de menor temperatura (Ley Cero de la Termodinámica). La tendencia es a alcanzar el equilibrio térmico definido éste como el estado que se alcanza debido a la igualación de temperatura de ambos cuerpos o medios (Incropera, 2011).

El calor no se puede observar o medir de manera directa, sin embargo, sus efectos se pueden identificar y cuantificar mediante mediciones y análisis. El flujo de calor, al igual que la realización de trabajo, es un proceso mediante el cual se cambia la energía interna de un sistema. La rama de la ciencia que trata sobre la relación entre el calor y otras formas de energía, incluyendo el trabajo mecánico en particular, se denomina termodinámica (Kreith et. al, 2012).

Desde el punto de vista de la Ingeniería, el problema es determinar, dada una diferencia de temperatura, cuánto calor se transfiere. En ese sentido, se reconocen tres modos distintos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Kahan, 2002); aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

Conducción: Es la transferencia de calor que ocurre desde partículas con más energía hacia partículas con menos energía debido a la interacción o contacto entre ellas. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia debe ocurrir en la dirección

en la que decrece la temperatura. Es un fenómeno de tipo difusivo. La ecuación que describe este mecanismo de transferencia de calor se conoce como Ley de Fourier. Su forma matemática generalizada es la siguiente ecuación 1.1:

$$q = -k * \Delta T \quad (1.1)$$

Donde q es la densidad superficial de flujo de calor (W/m^2), ΔT es el gradiente de temperatura, k es el coeficiente de conductividad térmica.

Si se considera que el material es isotrópico y que el flujo de calor ocurre en una dirección, la ecuación anterior se simplifica, en coordenadas cartesianas, ecuación 1.2:

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

Donde q'' es el flujo de calor por unidad de área de transferencia, $\frac{dT}{dx}$ es el diferencial de temperatura que se tiene en un diferencial de distancia, k es la conductividad térmica para un material homogéneo (isotrópico). El signo negativo de la ecuación se debe a una convención de signo, donde para que el flujo de calor sea positivo, se agrega el signo para compensar el signo negativo que se deriva del gradiente de temperatura (Incropera, 2011).

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. Se sabe que al envolver un tanque de agua caliente con fibra de vidrio (un material aislante) se reduce la razón de la pérdida de calor de ese tanque. Entre más grueso sea el aislamiento, menor será la pérdida de calor (Cengel, 2007).

Convección: Es la transferencia de calor que se realiza a través del contacto entre una superficie y un fluido en movimiento (gas o líquido), cuando se encuentran a temperaturas diferentes. La convección puede ser clasificada de acuerdo a la naturaleza del flujo (convección forzada y convección libre). La convección forzada se define cuando el flujo es causado por medios externos, tales como: ventilador, bomba o vientos atmosféricos. La convección natural o libre, se refiere al flujo inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de la diferencia de densidad ocasionada por la variación de la temperatura en los

fluidos; por ejemplo, la transferencia de calor desde un pavimento caliente a la atmósfera durante el día. En la convección, un importante grupo de moléculas se mueve aleatoriamente como agregados lo cual, en presencia de un gradiente de temperatura, aumenta la transferencia de calor. Se puede describir entonces la transferencia de calor por convección como la transferencia de energía hacia o desde un fluido debido a efectos combinados de conducción y el movimiento del bulto del fluido.

La transferencia de calor por convección puede ser descrita a través de la siguiente ecuación 1.3:

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (1.3)$$

Donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, el cual depende de la geometría, régimen del flujo y propiedades del fluidos es la temperatura de la superficie, T_∞ es la temperatura del medio (Incropera, 2011).

1.5 Conclusiones parciales del capítulo 1

1. El ahorro y uso eficiente de la energía es el eje central de la estrategia en cualquier programa de ahorro. Es importante el uso del aislamiento dentro de la industria porque es el mejor método ya que su función es suministrar resistencia al flujo de calor y de este modo ahorrar combustible y dinero.
2. Es importante la selección del aislante ya que deben evitarse transferencias térmicas que disfunción en el proceso por diferencias de temperaturas no admisibles, además reduce la contaminación ambiental.
3. La pérdida de calor en las líneas de vapor vienen dadas fundamentalmente por conducción y convección, pues las pérdidas por radiación son mitigadas mediante el recubrimiento de la línea de vapor con una lámina de aluminio.

Capítulo 2. Materiales y Métodos

En el presente capítulo se caracteriza el área caso objeto de estudio y se detalla la metodología que se utiliza para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto en esta investigación

2.1 Caracterización de la Planta de Procesamiento de Crudos

La Planta de Procesamiento de Crudos se inauguró el día 26 de julio de 1986. La instalación se proyectó para procesar alrededor de 2 000 m³ diarios, al comienzo solo contaba con un diseño de seis tanques de 2 000 m³, dos tanques de 10 000 m³, dos piscinas de recepción, para recibir el crudo procedente del campo, de donde bombeaban hacia los tanques con tres bombas Itur de 120 m³/h, para los trasiegos internos se utilizaban tres bombas Sigma. Existían dos cargaderos para trasegar el producto final en calidad hacia la Batería de Cárdenas en carros cisternas, contaba además con dos Calderas de vapor, una de 4,5 t/h y otra de 7,5 t/h y una Planta de tratamiento del agua que utilizaban dichas calderas para producir el vapor para el proceso. En el año 1987 se comienza a bombear por oleoducto petróleo en calidad (2% de BSW) desde la Batería Central hacia la Batería ya existente en Cárdenas, cerca del Puerto de la Ciudad, desde donde se embarcaba el petróleo en buques hacia la estación de Matanzas. En 1992 se termina la inversión de dos tanques de 5 000 m³ de capacidad para el tratamiento dinámico con lo que se mejora la calidad del petróleo ya que disminuye el porcentaje de sólidos y sedimentos (BSW) para la venta y se inaugura además otra nueva etapa, la Segunda Etapa de Separación, en este nuevo proceso se logra una mayor desgasificación del gas acompañante que viene con el petróleo. En los años 1992-93 se ponen en funcionamiento las Estaciones de Rebombeo este (ERE) y oeste (ERO), a partir de este momento se minimiza el envío de crudo por pailas y se envía por dos oleoductos que se unen a la entrada de la Batería. En mayo de 1996 comienza una nueva era en los sistemas de medición en la Instalación cuando se comienza a instalar un nuevo sistema de información computarizado llamado AIMAX. El 24 de Julio de 1998 se inaugura el tanque 14 de 20 000 m³ con la característica que se puede operar dinámica o estáticamente en dependencia de las necesidades del proceso productivo. El 25 de octubre del año 2000 a las 7:15 pm se cierra la válvula del oleoducto a Cárdenas y se

pone en funcionamiento la Estación cabecera del Oleoducto a Matanzas, obra insigne de la Empresa. Esto trajo consigo una disminución notable del costo de la tonelada de petróleo por concepto de transportación ya que se dejó de utilizar el transporte por buque. Esta inversión quedó inaugurada oficialmente el 17 de diciembre del 2000 a la 1:00 pm por nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz. El día 7 de septiembre del 2010 se pone en marcha la Estación de Rebombear del Oleoducto Varadero – Matanzas (EROVM), lo que aseguró muy buenos resultados en cuanto al ahorro de Sustancia Reductora de Viscosidad (SRV) y la mejora del régimen de bombeo y la presión de bombeo por oleoducto. La planta, hace más de 15 años, cumple el compromiso de entregar más de un millón de toneladas de petróleo con la calidad contratada.

2.2 Descripción del proceso tecnológico de la Planta de Procesamiento de Crudos

Con el fin de garantizar los índices de calidad requeridos para posteriormente bombearlo por el Oleoducto Magistral hacia la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas la instalación tiene por objetivo la aplicación de un tratamiento adecuado a los crudos provenientes de los pozos de producción.

Al crudo extraído de los pozos del yacimiento Varadero en los Centros Colectores se le adiciona cierta cantidad de sustancia reductora de viscosidad, según disponibilidad de la Empresa, para garantizar una mejor transportación del mismo. Con el objetivo de eliminar el alto contenido de impurezas, agua, sedimentos y gas del crudo la empresa aplica un tratamiento termoquímico, inyectando sustancias reductoras de viscosidad y desemulsionantes. Esto favorece la separación de las fases agua-petróleo y elevando la temperatura del crudo en los intercambiadores de calor de la Planta de Procesamiento de Crudo (PPC).

El crudo llega al intercambiador de calor con el objetivo de elevar su temperatura a la entrada del proceso; con valores aproximados de 28 a 32°C y en esta etapa se eleva la temperatura hasta 85°C, para garantizar una mejor separación del gas en las balsas separadoras, y posteriormente continuar el trasiego por gravedad hacia el tanque de tratamiento dinámico (Tanque 6); aquí, entra a la columna desgasificadora central de este, y elimina los vapores remanentes en el crudo a presiones muy bajas. Estos vapores van por una línea de 8 pulgadas hacia un separador horizontal de arrastre de 25 m³ y de

ahí salen por una línea independiente; una parte hacia el compresor de ENERGAS, para proceder a su tratamiento, y la otra va hacia el separador de arrastre del *flare*, para proceder a su quema.

El petróleo entra al tanque 6 por la columna central, con un proceso de calentamiento continuo y se mantiene un nivel prefijado mínimo de 4 m, que supera la carga neta de succión positiva de la bomba (NPSH), y un nivel máximo de operación del tanque. Luego el crudo es bombeado del tanque 6 a uno de los tanques de tratamiento estáticos de diferentes capacidades (5 000 m³, 10 000 m³ y 20 000 m³), según en los tanques en que se esté realizando el tratamiento por condiciones del proceso.

El agua libre, conjuntamente con el agua liberada producto de la ruptura de la emulsión agua - petróleo, sufre un proceso de decantación durante el llenado de los tanques que se completa durante el reposo de los mismos. Esa agua depositada en el fondo de los tanques es extraída por gravedad hacia el sistema de residuales de la instalación, esta operación se realiza una vez concluido el llenado de los tanques y haber terminado el calentamiento de mismo, aunque puede hacerse simultáneamente con el llenado pero con el vapor cerrado si hace falta ganar en capacidad. El proceso finaliza cuando comienza a observarse el enturbiamiento del agua.

Una vez que se da por concluido el llenado de un tanque y que previamente se haya cerrado el vapor, este se deja en reposo hasta que alcance el BSW requerido para trasegarlo hacia la ECO, al término del llenado se toma una muestra de este. A esta muestra se le realizan análisis para determinar BSW, °API y viscosidad, durante el reposo se toman muestras cada 2 horas o 4 horas en dependencia del resultado obtenido anteriormente, se realiza análisis de BSW hasta tanto se obtenga 2%, una vez que el crudo alcanza este valor de BSW se procede al trasiego hacia la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO).

En los tanques estáticos de la sección de tratamiento se encuentra el petróleo en calidad que es bombeado hacia los tanques de la estación cabecera donde se almacena para su venta por el oleoducto hacia Matanzas.

El crudo almacenado en los tanques de la estación cabecera es bombeado por las bombas Booster hacia un colector de succión de las bombas magistrales de la ECO a través de los intercambiadores de calor, donde se le corrige la viscosidad, de ser necesario hasta el parámetro de calidad pactado (1 500 cSt). Las bombas magistrales a

su vez impulsan el petróleo a través del oleoducto hasta la Estación de Rebombéo Oleoducto Varadero Matanzas (EROVM) y de ahí hacia la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas.

2.3 Descripción del caso de estudio

Se toma como caso de estudio las líneas de vapor del área de Tratamiento. En esta área existe un total de 2168,41m de tuberías; de ellas, 507,8m tienen un diámetro de 3 pulgadas, 423,11 m de 8 pulgadas y 1237,5m de 10 pulgadas.

Tabla 2.1: Características de las tuberías y el estado del aislamiento térmico en la sección de la planta caso de estudio

Sección	Diámetro (Pulgadas)	Longitud (m)	Posición	Estado	
Desde Sala de Calderas hasta Tanque 6	10	8	Vertical	Bien Aislado	
		16			
		16			
		6			
		360,2	Horizontal		Bien Aislado
50,5	Mal Aislado				
Recuperación de condensado desde el Tanque 6 hasta Tanque de Condensado	3	6	Vertical	Bien Aislado	
		6			
		16			
		228,9	Horizontal		Bien Aislado
		130,9			Mal Aislado
Desde Sala de Calderas hasta Tanque 14	10	16	Vertical	Bien Aislado	
		16			
		6			
		375,4	Horizontal		Bien Aislado
		95,5			Mal Aislado
Desde Sala de Calderas hasta Tanques 15 y 16	8	13	Vertical	Mal Aislado	
	10	4		Bien Aislado	
	8	240	Horizontal	Bien Aislado	
		170,11		Mal Aislado	
Desde Sala de Calderas hasta Tanque 7	10	8	Vertical	Bien Aislado	
		4		Mal Aislado	
		200	Horizontal	Bien Aislado	
		55,9		Mal Aislado	
	3	10	Vertical	Mal Aislado	

Recuperación de condensado desde Tanque 7 hasta la piscina de recepción de crudo		110	Horizontal	Mal Aislado
--	--	-----	------------	-------------

En esta área el 30,5% de las líneas de vapor tienen en mal estado el aislamiento térmico o no tienen. El aislante que se usa es de Fibra de Vidrio.

La planta de procesamiento está sometida a condiciones climáticas que, según INSMET (2019), la velocidad promedio del viento es de 20 km/h y la temperatura promedio durante la noche es de 20 °C. En la tabla 2.1 se muestra el levantamiento con las características de las tuberías y el estado del aislamiento térmico en la sección de la planta caso de estudio.

2.4 Metodología para el cálculo del espesor del aislante a instalar

2.4.1 Conducción Unidimensional

La conducción del calor es un mecanismo que está asociado a un amplio rango de sistemas y dispositivos. A diferencia de la convección, que corresponde al transporte de energía debido al movimiento de un fluido y de la radiación, que se puede propagar perfectamente en el vacío, la conducción requiere de la presencia de un sólido o un fluido en estado de reposo perfecto.

A nivel microscópico, en un fluido estacionario, la conducción es consecuencia de la interacción de las moléculas de mayor temperatura y su intercambio de energía con las moléculas de menor temperatura. En un sólido no conductor, el transporte de energía es exclusivamente provocado por las ondas de la red cristalina inducidas por el movimiento de los átomos. Si el sólido es un conductor, la transferencia de energía está asociada además con el movimiento de traslación de los electrones libres.

En la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, se adecuan al enfoque macroscópico basados en la Ley de Fourier. En esta parte de la conferencia trataremos exclusivamente la teoría de la transferencia de calor unidimensional a nivel macroscópico.

2.4.2 Conducción unidimensional en estado estacionario

En esta sección consideraremos la conducción estacionaria unidimensional en una pared plana. Un cilindro horadado y en una esfera horadada. El objetivo es desarrollar las expresiones para la distribución de temperatura y el flujo de calor transferido a través de estas geometrías.

El concepto de resistencia térmica se utiliza para extender el análisis a sistemas compuestos cuando ocurre el mecanismo de convección en sus fronteras.

Paredes Planas

Considere una pared plana de espesor L , construida de un material con una conductividad térmica k , como se muestra en la figura 2.1:

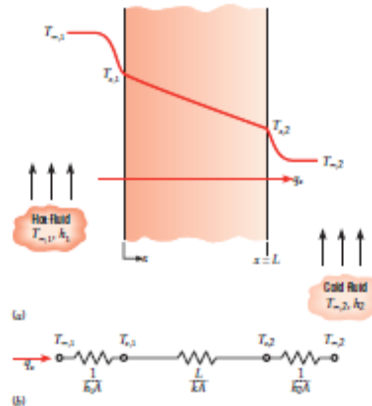


Figura 2.1: Conducción en paredes planas. Fuente: Incropera, 2011

Las temperaturas de las dos caras de la pared están fijadas como T_{S1} y T_{S2} , con $T_{S1} > T_{S2}$. Para condiciones estacionarias sin generación interno de calor y conductividad térmica constante, la forma apropiada de la ecuación general de conducción del calor es (ecuación 2.1):

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (2.1)$$

Con las condiciones de frontera expresadas como:

$$T_{x=0} = T_{S1} \quad y \quad T_{x=L} = T_{S2}$$

Integrado la ecuación (2.1) y aplicando las condiciones de frontera, la distribución lineal de la temperatura queda de la siguiente forma (ecuación 2.2):

$$T = T_{S1} + (T_{S2} - T_{S1}) \frac{x}{L}; K \quad (2.2)$$

Y al aplicar la Ley de Fourier nos da (ecuación 2.3):

$$q = \frac{kA(T_{S1} - T_{S2})}{L}; W \quad (2.3)$$

Donde **A** es el área de la pared normal a la dirección del flujo de calor transferido.

La ecuación (2.3) se puede reescribir de la siguiente forma (ecuación 2.4):

$$q'' \equiv \frac{q}{A} = \frac{(T_{S1} - T_{S2})}{(L/k)}; W/m^2 \quad (2.4)$$

Donde **q''** es la densidad de flujo de calor transferido (W/m^2) y **L/k**, representa la resistencia a la transferencia de calor por conducción en paredes planas.

2.4.3 Paredes Cilíndricas

La figura 2.2 muestra un cilindro agujereado (paredes cilíndricas) de radio interior r_1 , radio exterior r_2 , longitud L y conductividad térmica k . Las superficies interior y exterior se mantienen a temperaturas constantes T_{S1} y T_{S2} , respectivamente con $T_{S1} > T_{S2}$.

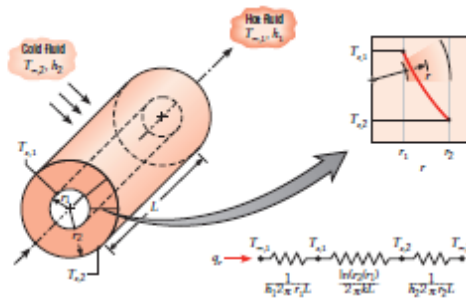


Figura 2.2: Paredes Cilíndricas. Fuente: Incropera, 2011

Para conducción unidimensional en estado estacionario en la dirección radial sin generación interna de calor y conductividad térmica constante, la forma apropiada de la ecuación general de la conducción del calor es (ecuación 2.5):

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Donde las condiciones de frontera son:

$$T_{(r=r_1)} = T_{S1} \quad y \quad T_{(r=r_2)} = T_{S2}$$

Si se sigue el mismo procedimiento que se utilizó para paredes planas, la distribución de temperaturas en este caso queda (ecuación 2.6):

$$T = T_{S1} + \frac{T_{S1} - T_{S2}}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \ln \left(\frac{r}{r_1} \right) \quad (2.6)$$

Y el flujo de calor (ecuación 2.7):

$$q = \frac{2\pi kL(T_{S1} - T_{S2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, W \quad (2.7)$$

Donde L es la longitud del cilindro.

La ecuación (2.7) se puede reescribir de la siguiente forma (ecuación 2.8):

$$q' \equiv \frac{q}{L} = \frac{\pi(T_{S1} - T_{S2})}{\left[\frac{1}{2k} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)\right]}, W/m \quad (2.8)$$

Donde q' es la densidad de flujo de calor transferido (W/m) y $\left[\frac{1}{2k} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)\right]$, representa la resistencia a la transferencia de calor por conducción en paredes cilíndricas.

2.4.4 Paredes planas compuestas

Para una serie de paredes planas compuestas como la que se muestra en la figura 2.3:

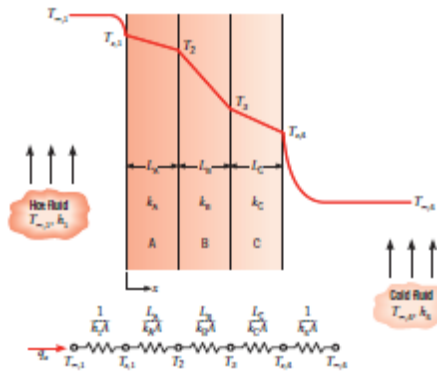


Figura 2.3: Paredes planas compuestas. Fuente; Incropera, 2011.

La densidad de flujo de calor sería (ecuación 2.9):

$$q'' = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{\left[\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{1}{h_2}\right]}; W/m^2 \quad (2.9)$$

Donde, una vez determinada la densidad de flujo de calor transferido, las temperaturas superficiales (T_{S1} y T_{S2}) y la de la interface (T_2) pueden ser calculadas, si se considera flujo de calor constante (ecuaciones 2.10 – 2.12):

$$T_{S1} = T_{\infty 1} - q'' \frac{1}{h_1}; K \quad (2.10)$$

$$T_2 = T_{\infty 1} - q'' \left(\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1}\right); K \quad (2.11)$$

$$T_{S2} = T_{\infty 1} - q'' \left(\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \right); K \quad (2.12)$$

2.4.5 Paredes cilíndricas compuestas

El ejemplo típico de paredes cilíndricas compuestas se muestra en la figura 2.4 donde se incluye la transferencia de calor por convección para los fluidos que van por el interior del tubo central y el que incide directamente sobre la superficie exterior del cilindro compuesto.

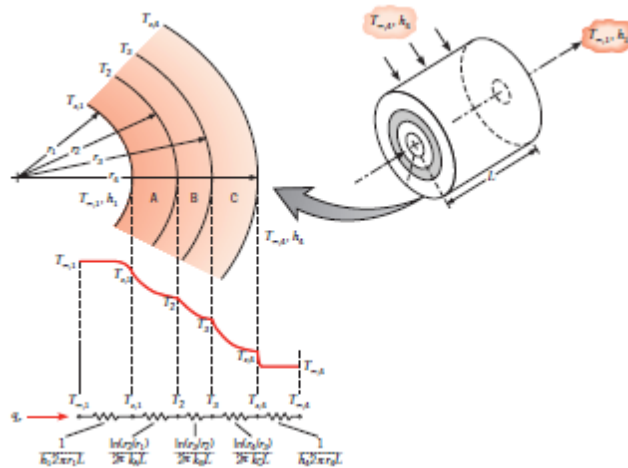


Figura 2.4: Paredes cilíndricas compuestas. Fuente: Incropera, 2011

Para este caso, la densidad de flujo de calor se estima según la ecuación (2.13):

$$q' = \frac{\pi(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{\left[\frac{1}{h_1 d_1} + \frac{1}{2k_1} \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{1}{2k_2} \ln \left(\frac{d_3}{d_2} \right) + \frac{1}{h_2 d_3} \right]}; W/m \quad (2.13)$$

Entonces, una vez determinada la densidad de flujo de calor, se pueden estimar la temperatura interfacial (T_2) y de las superficies interior (T_{S1}) y exterior (T_{S2}) del cilindro (ecuaciones 2.14 – 2.16):

$$T_{S1} = T_{\infty 1} - q' \frac{1}{\pi h_1 d_1}; K \quad (2.14)$$

$$T_2 = T_{\infty 1} - q' \left[\frac{1}{\pi h_1 d_1} + \frac{1}{2\pi k_1} \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \right]; K \quad (2.15)$$

$$T_{S2} = T_{\infty 2} + q' \left[\frac{1}{\pi h_2 d_3} \right]; K \quad (2.16)$$

2.4.6 Características del flujo y la transferencia de calor en tubos con flujo transversal

Transferencia de calor sobre un tubo con flujo transversal

La transferencia de calor sobre un tubo con flujo transversal tiene ciertas características particulares. Solo para números de Reynolds próximos a $Re < 5$, el flujo del fluido no se separa después del tubo Figura 2.5:

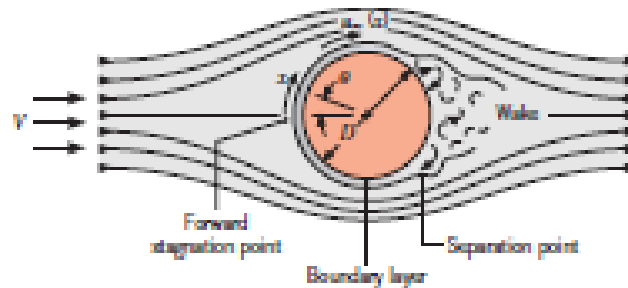


Figura 2.5 Transferencia de calor sobre un tubo con flujo transversal. Fuente: Incropera, 2011

Con $Re > 5$ el cilindro ya no es un cuerpo aerodinámico. La capa límite del fluido que se forma en la mitad frontal del tubo se separa de su superficie en la mitad posterior, formándose detrás del cilindro dos remolinos simétricos. Estos remolinos desaparecen a cierta distancia del cilindro, que aumenta con el número de Reynolds.

Para $Re > 1\,000$, los remolinos se separan periódicamente del tubo extendiéndose aguas abajo y forman detrás del cilindro una zona turbulenta Figura 2.6:

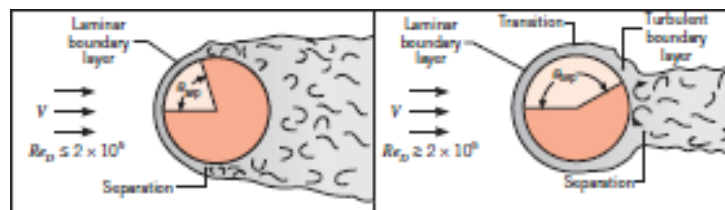


Figura 2.6 Efecto de separación en la Zona turbulenta. Fuente: Incropera, 2011

Para $Re < 200\,000$ la capa límite se separa del tubo a un ángulo de 80 a 84° y para $Re > 200\,000$ la separación ocurre a un ángulo de 120 a 140° . La separación de la capa límite es una consecuencia del aumento de la presión a lo largo del flujo y de la desaceleración del fluido por la pared del cilindro. A medida que el fluido fluye sobre la mitad frontal del cilindro, disminuye la sección transversal de flujo y aumenta la velocidad.

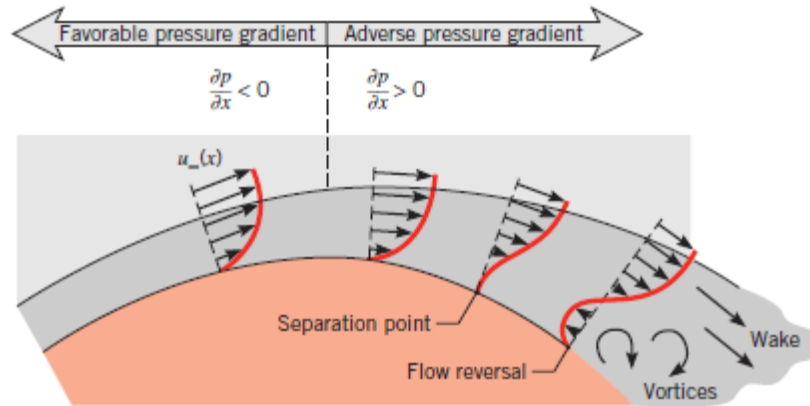


Figura 2.7 Perfil de velocidad asociado al flujo cruzado sobre un cilindro vertical.
Fuente: Incropera, 2011

La velocidad y, en consecuencia, la energía cinética del fluido en la superficie del cilindro, son pequeñas, debido al efecto de la viscosidad. El aumento de la velocidad que se observa a lo largo del flujo produce el estancamiento del fluido, lo que conduce a un flujo de retorno. Este flujo de retorno empuja a la capa laminar lejos de la superficie; con ello el flujo se separa y se forman remolinos (Figura 2.7).

Estas características del flujo de fluidos sobre un tubo influyen sobre el proceso de transferencia de calor. La disminución del coeficiente pelicular de transferencia de calor detrás del tubo se explica por el aumento de espesor de la capa límite laminar.

Para números de Reynolds bajos, la transferencia de calor en la zona posterior del cilindro es pequeña, aumenta con este y puede resultar igual que en la parte frontal del tubo. Para números de Reynolds altos el aumento del coeficiente de transferencia de calor puede ser del orden de dos a tres veces.

Según lo dicho, está claro que la transferencia de calor desde un cilindro está íntimamente ligada a la naturaleza del flujo en el cual se encuentra sumergido.

2.4.7 Correlación para la convección

La transferencia de energía por convección es un fenómeno complicado en donde participan un gran número de efectos. A través de correlaciones, cuya forma matemática es obtenida a través del análisis dimensional y del ajuste matemático de datos experimentales, pueden describirse los coeficientes convectivos de transferencia de calor. En las correlaciones para convección forzada participan tres números adimensionales: Nu (número de Nusselt), Re (número de Reynolds), Pr (número de

Prandtl). En el caso de la convección natural, las correlaciones incluyen tres números adimensionales: Nu , Pr y Ra (número de Rayleigh). La definición de los números de Reynolds, Prandtl y Rayleigh es la siguiente ecuación 2.17:

$$Re = \frac{vX}{\nu} \quad (2.17)$$

Donde V es la velocidad del fluido, X es la longitud característica y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Con la ecuación 2.18:

$$Pr = \frac{v\rho C_p}{K_f} \quad (2.18)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, C_p es el calor específico del fluido y K_f es la conductividad térmica del fluido. Con la ecuación 2.19:

$$Ra = \frac{g\beta\rho C_p(\Delta T)X^3}{\nu K_f} \quad (2.19)$$

Donde g es la gravedad y β es el coeficiente de expansión térmica volumétrica.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor se obtiene despejándolo de la expresión que define el número de Nusselt según (ASTM Norma C 680-08) y tiene ecuación 2.20:

$$h = \frac{NuK_f}{X} \quad (2.20)$$

Donde Nu es el número de Nusselt y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Dependiendo del régimen de flujo y de física del problema y de la geometría, se han propuesto diversas correlaciones para el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor.

2.4.8 Correlaciones empíricas para estimar la transferencia de calor en tubos

Para cilindros horizontales con flujo cruzado, una correlación para todas las condiciones, siempre que $Pr \geq 7$, es la propuesta por Hilpert (ecuación 2.21):

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{1/3} \quad (2.21)$$

Las constantes C y m se muestran en la **Tabla 2.2**

Tabla 2.2: Constantes C y m para la ecuación 2.21. Fuente: Incropera, 2011

Re_D	C	m
0.4–4	0.989	0.330
4–40	0.911	0.385
40–4000	0.683	0.466
4000–40,000	0.193	0.618
40,000–400,000	0.027	0.805

2.4.9 Características del flujo y la transferencia de calor por convección natural o libre

La convección natural se origina por las fuerzas de empuje: la gravedad, la fuerza centrífuga y las fuerzas inducidas en el fluido mediante un campo electromagnético de alta densidad. La convección libre mejor conocida es la originada por la gravedad.

Durante la transferencia de calor la temperatura del fluido varía, lo cual produce variaciones de densidad y, en consecuencia, diferencia en las fuerzas gravitatorias representadas por una fuerza de empuje descendente.

Cuando se trata el flujo libre gravitacional sobre cuerpos de geometría sencilla (placa vertical o cilindro horizontal), se supone que el volumen de fluido es tan grande que el flujo de convección natural originado por los cuerpos próximos al estudiado no afecta su propia convección natural. El flujo por convección libre puede ser laminar o turbulento, al igual que en la convección forzada (Figura 2.8).

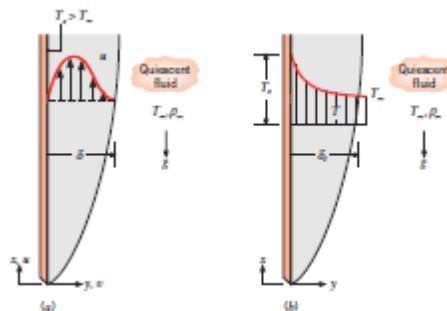


Figura 2.8: Flujo o transferencia de calor por convección natural o libre. Fuente: Incropera, 2011

El fluido cercano al borde de la superficie es laminar, como indica la capa de flujo bien ordenada, sin turbulencia apreciable. Sin embargo, como el fluido se mueve arriba y abajo verticalmente, el movimiento se va tornando desordenado y caótico a medida que se aleja

de la superficie. Esta condición se denomina flujo turbulento. La región entre el flujo laminar y el turbulento se conoce como región de transición. Esta transición se alcanza para $Ra_L > 10^9$.

La mayoría de los procesos encontrados en la naturaleza son turbulentos. Sin embargo, el flujo en muchas aplicaciones industriales es generalmente laminar o en el régimen de transición.

2.4.10 Correlaciones empíricas

De manera general, las correlaciones empíricas para estimar el coeficiente de transferencia de calor, h , para convección natural, relacionan el número de Nusselt con el número de Rayleigh (ecuación 2.22):

$$Nu = C Ra_L^n \quad (2.22)$$

Los valores de C y n dependen del régimen de flujo.

A continuación se presentan algunas de las expresiones que se utilizan comúnmente en aplicaciones de equipos y líneas de procesos (ASTM C 680-89).

Para la convección forzada en cilindros verticales y horizontales se tiene (ecuación 2.23)

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad Re_D Pr > 0,2, \quad (2.23)$$

Donde \overline{Nu}_D y Re_D es el número de Nusselt y Reynolds, respectivamente, donde la longitud característica viene definida por el diámetro del cilindro.

Para la convección natural en cilindros horizontales se tiene (ecuación 2.24)

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2, \quad Ra_D < 10^{12} \quad (2.24)$$

Donde Ra_D es el número de Rayleigh, donde la longitud característica viene definida por el diámetro del cilindro.

En la Figura 2.9 se muestra las decisiones para calcular el espesor del aislante.

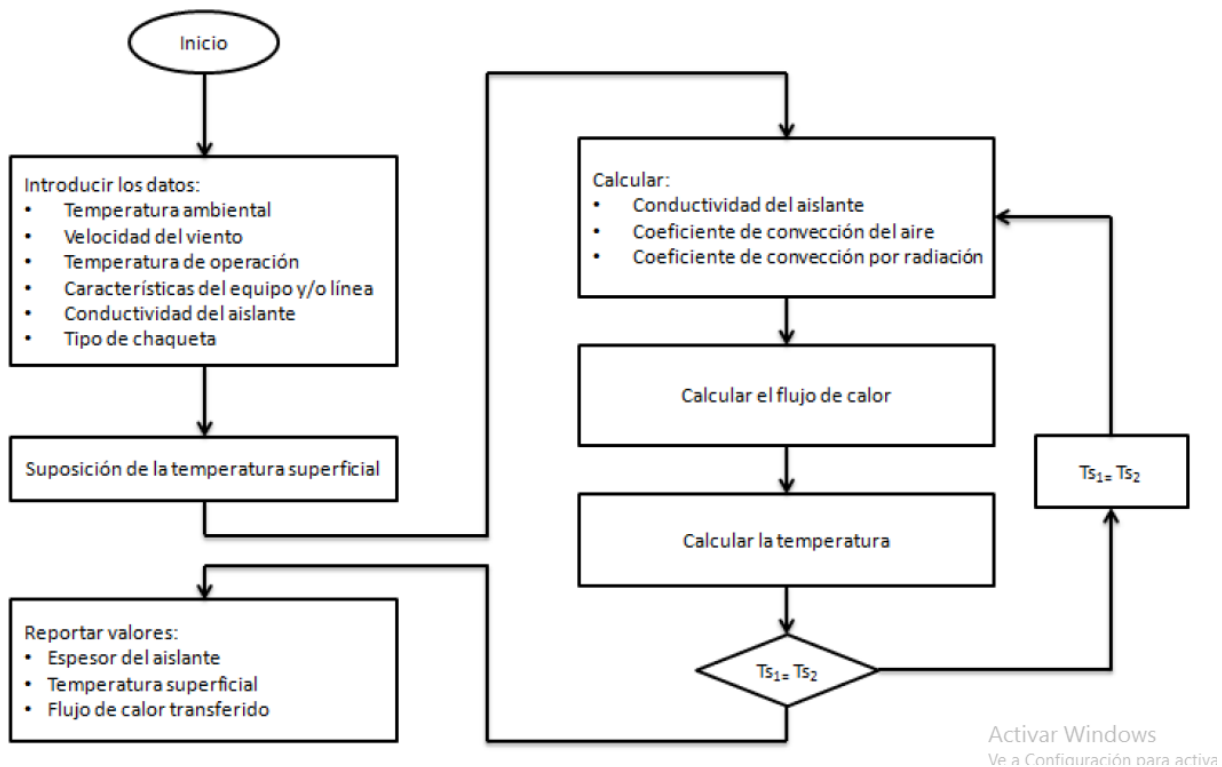


Figura 2.9: Diagrama de decisión para calcular el espesor del aislante. Fuente: Limone, 2012

2.5 Guía Práctica Standard para la Selección y Aplicación de Aislamiento Térmico en Tuberías y Equipos de procesos según la norma ASTM F 683 – 00.

1. Alcance

1.1 La norma **ASTM: F 683 – 00: Guía Práctica Standard para la Selección y Aplicación de Aislamiento Térmico en Tuberías y Equipos** es la que se toma como referencia en este trabajo. Esta norma provee una guía práctica para la selección del tipo y el espesor de los materiales aislantes para tuberías, maquinarias y equipos industriales. Se especifican, además, los métodos y los materiales de instalación, incluyendo el revestimiento.

5. Requisitos generales

5.1 Las tuberías, incluyendo válvulas, accesorios y bridas que transportan vapores, gases o líquidos que alcanzan temperaturas fuera del rango desde 13 a 52°C durante su operación normal, deben estar aislados excepto que se indique lo contrario.

5.2 El espesor del aislante especificado en esta guía está diseñado para mantener la temperatura superficial igual o menor que 52°C para fluidos que tengan temperaturas hasta 343°C con una temperatura ambiente de 29°C. Para fluidos con temperaturas por encima de 343°C, la superficie se debe mantener a una temperatura máxima de 56°C. En la tabla 2.3 se muestran los materiales aislantes utilizados en sistemas de tuberías expuestas al ambiente.

Tabla 2.3: Materiales aislantes utilizados en sistemas de tuberías expuestas al ambiente. Fuente: ASTM: F 683 – 00

Rango de Temperaturas	Aislamiento	Norma ASTM
38 a 232 °C	Vidrio celular	C 552, Tipo II
	Perlita	C 610
	Silicato de calcio	C 533 Tipo I
	Fibra mineral	C 547, Tipos II y III

Tabla 2.4: Espesor del vidrio celular aislante en tuberías.

Fuente: ASTM: F 683 – 00

Diámetro nominal (mm)	Temperatura máxima (°C) x espesor (mm)								
	-29 a 4	5 a 52	121	177	232	288	343	399	454
6 o más	63	25	---	---	---	---	---	---	---
38 o menos	---	---	25	25	38	51	63	63	76
51	---	---	25	38	51	51	76	76	89
63, 76	---	---	25	38	51	63	76	89	102
102	---	---	25	38	51	63	89	89	102
127, 152	---	---	25	38	51	76	89	89	114
203	---	---	38	38	51	76	89	102	127
254	---	---	38	38	51	76	102	102	127
305	---	---	38	38	63	76	102	114	140
356	---	---	38	38	63	89	102	114	140
406	---	---	38	38	63	89	114	114	140
457	---	---	38	38	63	89	114	114	140

Tabla 2.5: Espesor de la fibra de vidrio aislante en tuberías.

Fuente: ASTM: F 683 – 00

Diámetro nominal (mm)	Temperatura máxima (°C) x espesor (mm)							
	66	121	177	232	288	343	399	454
38 o menos	25	25	25	38	51	51	63	76
51	25	25	25	38	51	63	63	89
63, 76	25	25	25	38	51	76	89	89
102	25	25	25	38	51	76	89	102
127, 152	25	25	25	51	63	76	89	102
203	25	25	25	51	63	76	89	114
254	25	25	38	51	63	89	89	114
305	25	25	38	51	63	89	114	114
356, 406, 457	25	25	38	51	76	89	114	127

Tabla 2.6: Espesor de la lana mineral aislante en tuberías.

Fuente: ASTM: F 683 – 00

Diámetro nominal (mm)	Temperatura máxima (°C) x espesor (mm)									
	66	121	177	232	288	343	399	454	510	566
38 o menos	25	25	25	38	51	51	51	63	76	89
51	25	25	25	38	51	63	63	76	89	102
63, 76	25	25	25	38	51	63	76	89	102	114
102	25	25	25	38	51	63	76	89	102	114
127, 152	25	25	38	51	63	76	76	89	114	140
203	25	25	38	51	63	76	76	102	114	140
254	25	25	38	51	63	76	89	102	127	152
305	25	25	38	51	63	89	89	102	127	152
356	25	25	38	51	63	89	89	114	140	165
406	25	25	38	51	76	89	89	114	140	165
457	25	25	38	51	76	89	102	114	140	165

Tabla 2.7: Espesor del silicato de calcio aislante en tuberías.

Fuente: ASTM: F 683 – 00

Diámetro nominal (mm)	Temperatura máxima (°C) x espesor (mm)									
	66	121	177	232	288	343	399	454	510	566
38 o menos	25	25	25	38	51	63	63	63	76	89
51	25	25	25	38	51	63	63	76	89	102
63, 76 , 102	25	25	38	51	63	76	76	89	102	127
127, 152	38	38	38	51	63	89	89	102	114	140
203	38	38	38	51	63	89	89	102	127	140
254	38	38	38	51	76	89	89	114	127	152
305	38	38	38	51	76	89	89	114	140	152
356	38	38	38	63	76	102	102	114	140	165
406, 457	38	38	38	63	76	102	102	127	140	165

Tabla 2.8: Espesor de la perlita aislante en tuberías. Fuente: ASTM: F 683 – 00

Diámetro nominal (mm)	Temperatura máxima (°C) x espesor (mm)									
	66	121	177	232	288	343	399	454	510	566
38 o menos	25	25	25	38	51	63	63	63	76	89
51	25	25	25	38	51	63	63	76	89	102
63, 76 , 102	25	25	38	51	63	76	76	89	102	127
127, 152	38	38	38	51	63	89	89	102	114	140
203	38	38	38	51	63	89	89	102	127	140
254	38	38	38	51	76	89	89	114	127	152
305	38	38	38	51	76	89	89	114	140	152
356	38	38	38	63	76	102	102	114	140	165
406, 457	38	38	38	63	76	102	102	127	140	165

2.6 Análisis de las pérdidas económicas por el mal estado del de aislamiento

Para el cálculo de las pérdidas económicas por el mal estado de aislamiento en las líneas de vapor, se determina el sobreconsumo de combustible a partir de la diferencia del calor perdido entre las tuberías bien aisladas y las que tienen el aislante en mal estado o no aislado mediante la (ecuación 2.25).

$$\eta_{GV} = \frac{\Delta Q_{abs}}{\Delta B * VCI} \quad (2.25)$$

Dónde:

η_{GV} : Eficiencia de los generadores de vapor, %.

ΔB : Sobreconsumo de combustible, kg/s.

VCI: Valor calórico inferior del combustible, kJ/kg.

ΔQ abs: Diferencia entre el calor perdido de las tuberías bien aisladas y las mal aisladas o sin aislantes, W.

El combustible es gas natural procedente de la planta de ciclo combinado ENERGAS Varadero, después de eliminar el sulfuro de hidrógeno (gas dulce). El cual tiene un VCI es 43 314 kJ/kg.

Mediante la ecuación 2.26 se determina el valor perdido por concepto de sobre consumo de gas natural.

$$\text{Valor perdido} = CU_{GN} * \Delta B \quad (2.26)$$

Dónde:

CU_{GN} : Costo unitario de gas natural 0, 0497 CUC/Sm³.

ΔB : Sobreconsumo de combustible, kg/s.

Capítulo 3: Resultados y discusión

En este capítulo se ofrecen los resultados del cálculo del espesor del aislante las pérdidas de calor y el análisis de la influencia de la velocidad del viento y el tipo de aislante sobre el espesor del aislante. Además se realiza un análisis técnico-económico de la propuesta del aislante.

3.1 Cálculo de las pérdidas de calor y la temperatura superficial del aislante

Para los cálculos del espesor del aislante y el análisis de la influencia de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el tipo de aislante sobre el espesor del aislante a instalar se tomó como temperatura de saturación del vapor promedio 159°C (equivalente a 600 kPa, la presión del vapor saturado promedio en el período analizado) y el espesor del aislante instalado (0,02 m para la tubería de 3 pulgadas y 0,03 m para las tuberías de 8 y 10 pulgadas). En el estudio se compara de acuerdo a la posición (vertical u horizontal) de las tuberías y se tiene en cuenta el movimiento del aire a través del mecanismo de convección (natural y forzada).

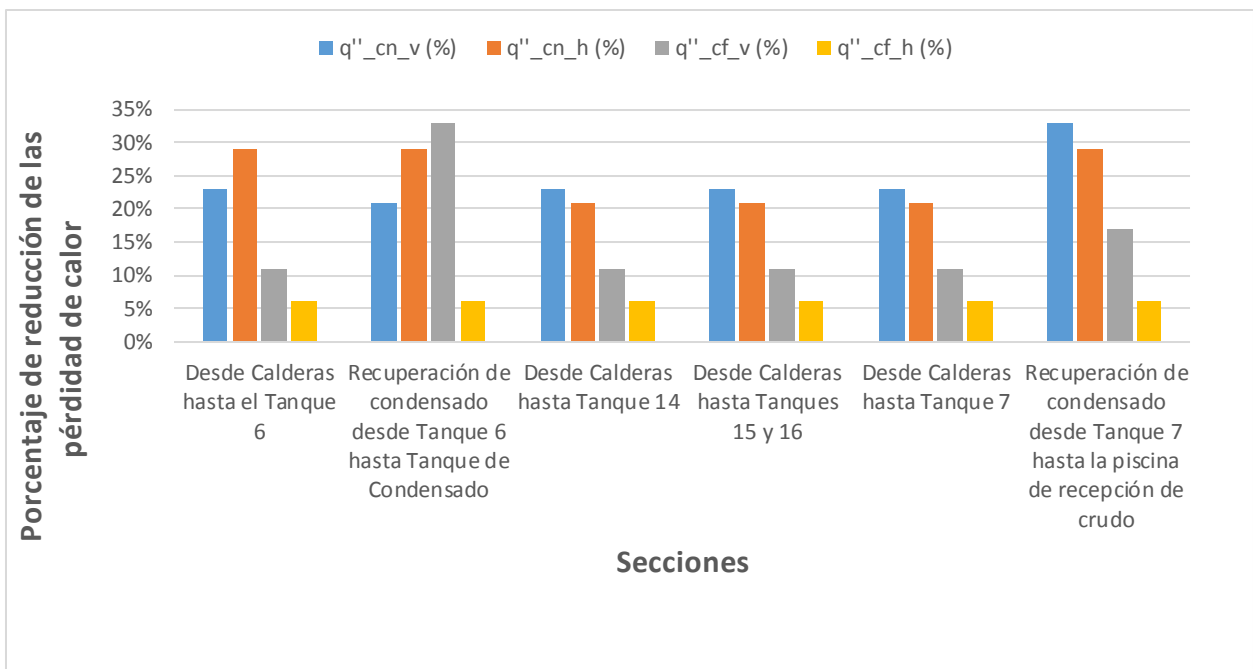


Figura 3.1: Reducción del flujo de calor en las tuberías aisladas del área de tratamiento. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 3.1, el flujo de calor perdido en todas las secciones del área de tratamiento se encuentra entre 21 y 33% cuando el aire está en reposo (convección natural-cn) y entre 6 y 17% considerando la velocidad del aire (convección

forzada-cf). Para este cálculo se tuvo en cuenta las pérdidas de calor de las tuberías aisladas y las que tienen el aislamiento en mal estado o no tienen.

Según la norma ASTM F-683, los aislantes deben diseñarse para disminuir las pérdidas de calor en tuberías por debajo de un 10% del calor transferido, aunque Gerdipac Industrial (2017) afirma que la reducción de las pérdidas de calor debe ser hasta un 2 – 3% del calor transferido. Además, para el aislante instalado (fibra de vidrio), según la norma, el espesor debe ser de 0,025 m para tuberías de 3 pulgadas y 8 pulgadas y de 0,038 m para las tuberías 10 pulgadas. Por tanto, en todos los casos, el espesor de aislante instalado no es el correcto.

De la misma manera, según la norma ASTM F 683 - 00, el espesor del aislante utilizado en sistemas de tuberías debe mantener una temperatura superficial del aislante de 52°C para los fluidos con temperaturas hasta 343°C, siempre que la temperatura ambiente sea alrededor de los 29°C.

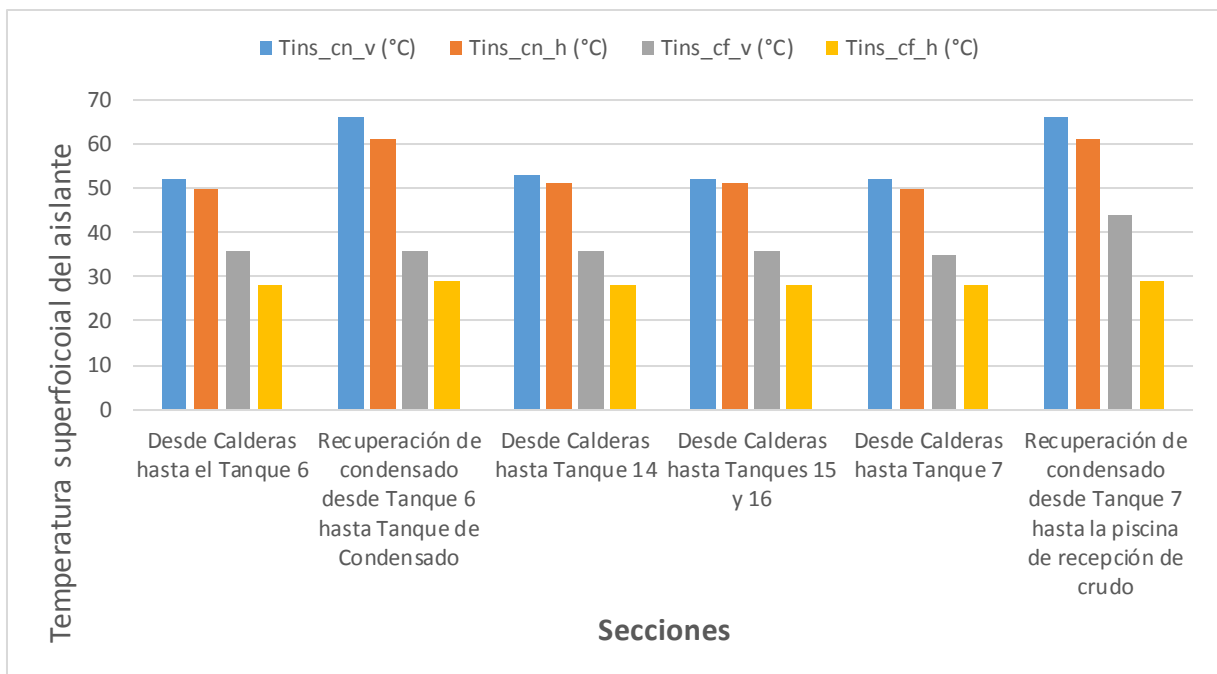


Figura 3.2: Temperatura superficial del aislante en las tuberías del área de tratamiento. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, en la Figura 3.2, la temperatura superficial según la norma, al calcularla con los valores promedio de temperatura ambiente y velocidad del viento, se cumple en toda la red menos en las líneas de recuperación de condensado, que en ambos casos alcanza 66°C cuando se analizan las pérdidas de energía con aire en

reposo (convección natural) y con aire en movimiento (convección forzada) la temperatura más alta alcanzada en la superficie del aislante es de 44°C en las tuberías de recuperación de condensado. Esto evidencia que no se garantiza la temperatura superficial normada en las tuberías de condensado.

3.2 Análisis de las pérdidas económicas generadas por concepto del mal estado del aislante instalado

El objetivo de cualquier evaluación que se realice sobre el estado del aislamiento térmico en redes de distribución de vapor es determinar el sobreconsumo de vapor, y por ende, el gasto innecesario de combustible en los generadores de vapor provocado por esa pérdida de energía y su correspondiente pérdida monetaria. En el momento de realizar este estudio se encontraban en funcionamiento tres de los cinco generadores de vapor (GV 1, GV 3 y GV 4) de la sala de calderas de la PPC, pues el generador de vapor 2 estaba presentando problemas con la instrumentación y la pizarra de control y el generador de vapor 5 se encontraba en Mantenimiento General Planificado.

Uno de los principales problemas de la Planta de Procesamiento de Crudos es la inestabilidad en el suministro de gas desde ENERGAS, debido a que todo el tratamiento del petróleo depende de la producción de vapor. Por esta razón, es imprescindible reducir las pérdidas de energía en el tratamiento del petróleo. De aquí deriva la importancia de conocer cuánto se pierde por concepto de sobreconsumo de gas.

3.2.1 Evaluación de Generación Vapor en Sala de Calderas

Por la salida de Mantenimiento de la Planta ENERGAS, del 2 al 7 de marzo de 2019 se garantiza un flujo estable y de mayor caudal hacia la Sala de Calderas, lo que permite el ajuste del consumo de gas de los generadores bajo estas condiciones.

El suministro de presión de gas desde ENERGAS puede verse la figura 3.3 oscilando sobre 90 y 100 kPa antes de la parada de la Planta; posteriormente el día 7, se incrementa la presión de suministro en valores entre 300- 400 kPa.

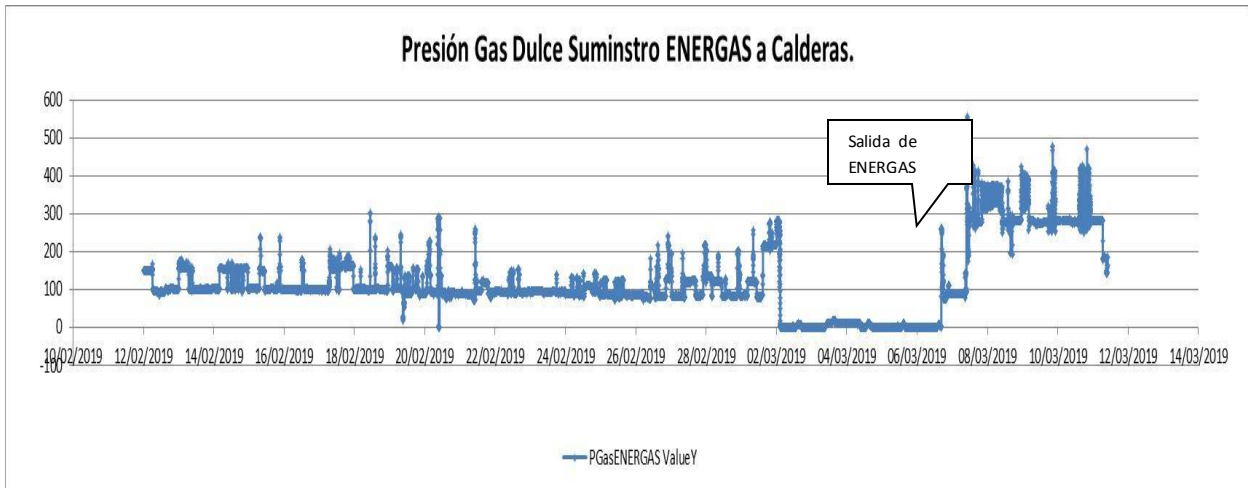


Figura 3.3: Presión de gas dulce suministrado de ENERGAS a las Calderas. Fuente: Grupo de Tecnología de EPEP Centro.

Al analizar los valores de flujo en intervalos diarios en el resto de los días de suministro de gas desde el día (7 al 11 de marzo) se puede observar que la presión de gas en los generadores de vapor se ha mantenido en 200 kPa, ya en la actualidad hay otro escenario y los valores han disminuido sobre los 140 kPa.

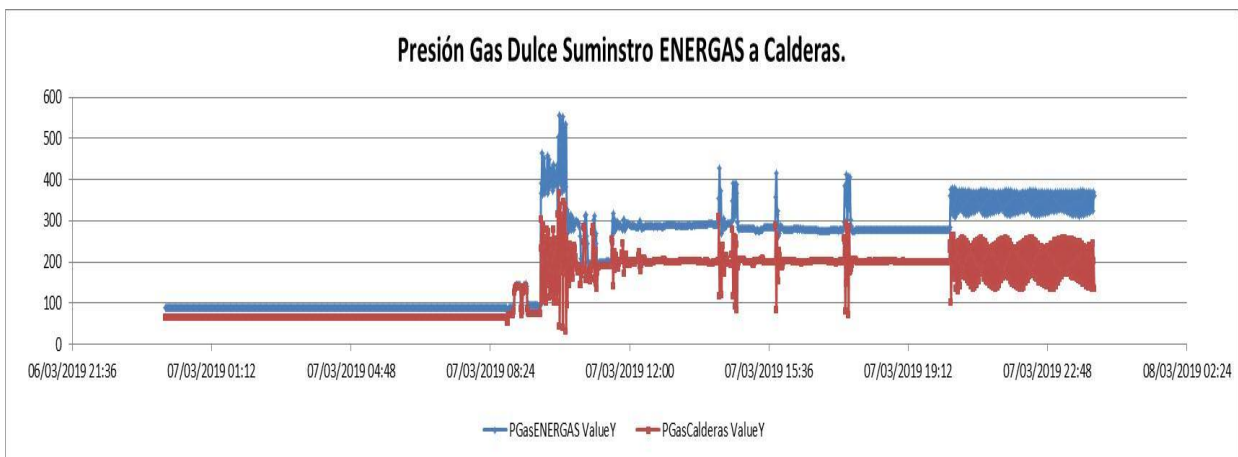


Figura 3.4: Presión de gas dulce suministro ENERGAS a Calderas. Fuente: Grupo de Tecnología de EPEP Centro.

Si se analiza la tendencia del suministro de gas del día 7 (día pactado con ENERGAS para hacer la evaluación), se observa (figura 3.4) el incremento de la presión cuando se contacta con ENERGAS para comenzar la evaluación. Están graficadas la presión de suministro (Pgas ENERGAS) y la presión de regulación (Pgas calderas) posterior a la válvula que está fijada a 200 kPa. Los gráficos con el comportamiento del suministro de

gas desde el día 8 al 11 de marzo se muestran en el Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 y Anexo 8.

Con 3 generadores de vapor en servicio la presión de entrada a la Sala de Calderas posterior a la válvula de regulación oscilaba sobre 200 kPa, con estabilidad de flujo durante la prueba.

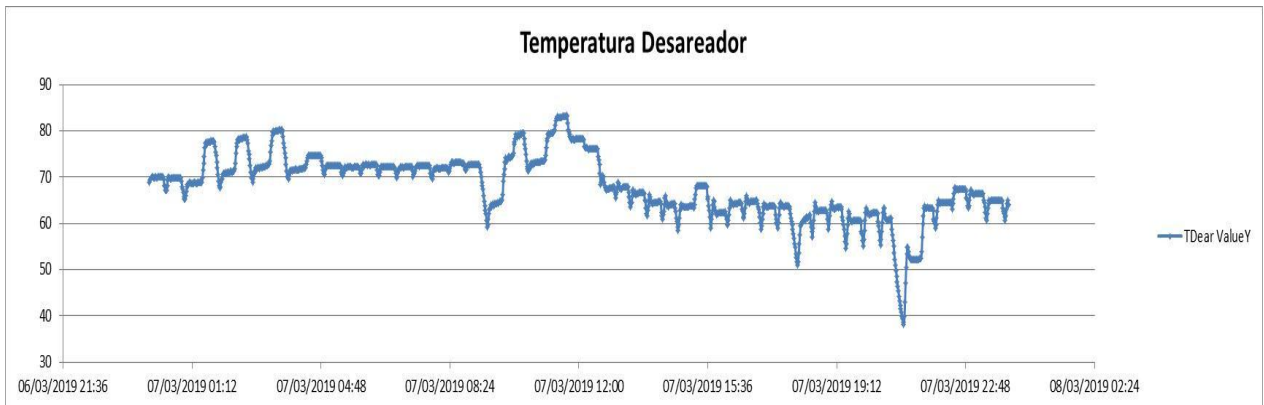


Figura 3.5: Registro de temperaturas del Desareador en los días de estudio. Fuente: Grupo de Tecnología de EPEP Centro.

Se fueron regulando las válvulas de entrada del tren de gas de cada generador de vapor y recogiendo los datos de las distintas variables, para poder estimar el flujo de vapor generado.

El Desareador Térmico se encuentra fuera de servicio por afectaciones en la válvula de suministro de vapor por lo que la temperatura del agua de alimentación en calderas oscila sobre 60-64 0C. En la figura 3.5 se muestran las temperaturas del Desareador.

Las presiones de ajuste del tren de gas de cada generador de vapor se llevan en la parada al límite máximo de 140 mbar porque ya en 150 mbar se para el generador de vapor por alta presión de gas. Como se puede observar este ajuste del tren de gas ya cuando se ponen en alto fuego se queda entre 115 -120 mbar y no permite subir más esta regulación. El flujo de vapor es calculado porque por afectaciones en la instrumentación y automática no es posible medirlo con las placas orificio instaladas, pero los valores obtenidos muestran que se encuentran trabajando por debajo de sus valores de diseño (10 t de vapor/h); siendo el generador de vapor 1 el de mayor generación con 7 t/h y el generador de vapor 3 el de menor con 6 t/h (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Datos Promedios de las mediciones efectuadas el día 7 de marzo de 2019 con presión de entrada de 200 kPa y temperatura del agua de alimentación 64 °C.

Mediciones	Parámetros	GV 1	GV 3	GV 4
1	Temperatura gases (°C)	185	168	253
	Consumo Gas (m ³ /h)	600	486	576
	Presión ajuste gas tren (mbar)	115	115	120
	Flujo vapor generado (t/h)	7,28	5,90	6,99
2	Temp gases (°C)	206	201	254.7
	Consumo Gas (m ³ /h)	596	486	570
	Presión ajuste gas tren (mbar)	115	115	120
	Flujo vapor generado (t/h)	7,23	5,90	6,91
3	Temp gases (°C)	209	202	255
	Consumo Gas (m ³ /h)	600	486	570
	Presión ajuste gas tren (mbar)	115	115	120
	Flujo vapor generado (t/h)	7,28	5,90	6,91
Promedio Flujo vapor generado (t/h)		7,26	5,90	6,94

Fuente: Grupo de Tecnología de EPEP Centro.

Al determinar las pérdidas de calor por concepto del mal estado del aislamiento se puede analizar el efecto que tienen estas pérdidas sobre la producción de vapor y la influencia de la temperatura ambiente y la velocidad del viento.

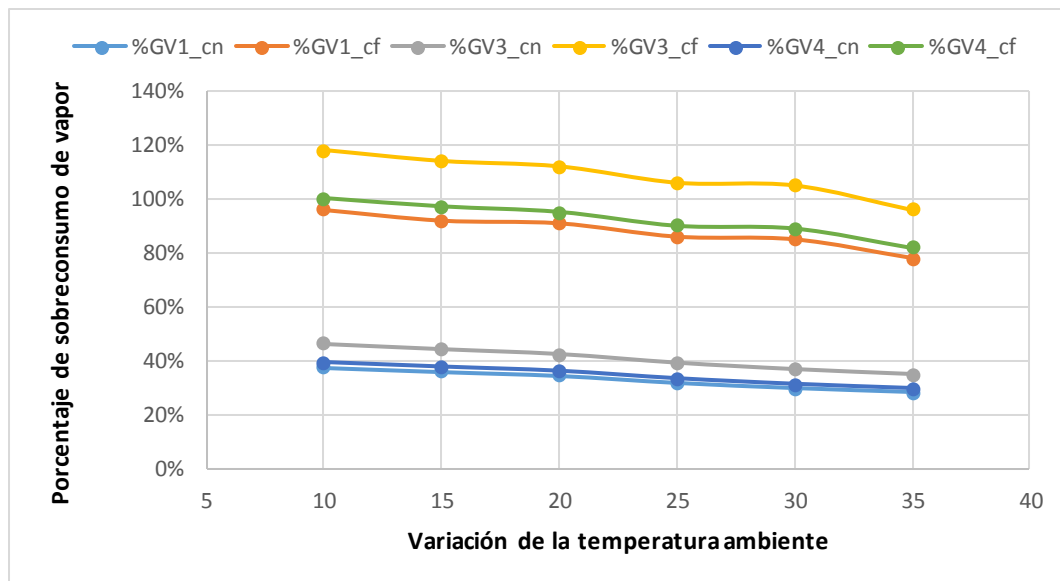


Figura 3.6: Porcentaje de sobreconsumo de vapor ante la variación de la temperatura ambiente. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3.6 se puede observar que cuando el aire está en reposo el sobreconsumo de vapor se encuentra entre 30 y 50% de la generación de los tres generadores

estudiados y cuando el aire está en movimiento entre el 80 y 120%. De aquí destaca que, en noches muy frías (10°C) los tres generadores no cubren la demanda de vapor de la planta. Añadido a este análisis está la pérdida monetaria por concepto de sobreconsumo de gas dulce procedente de ENERGAS S.A.

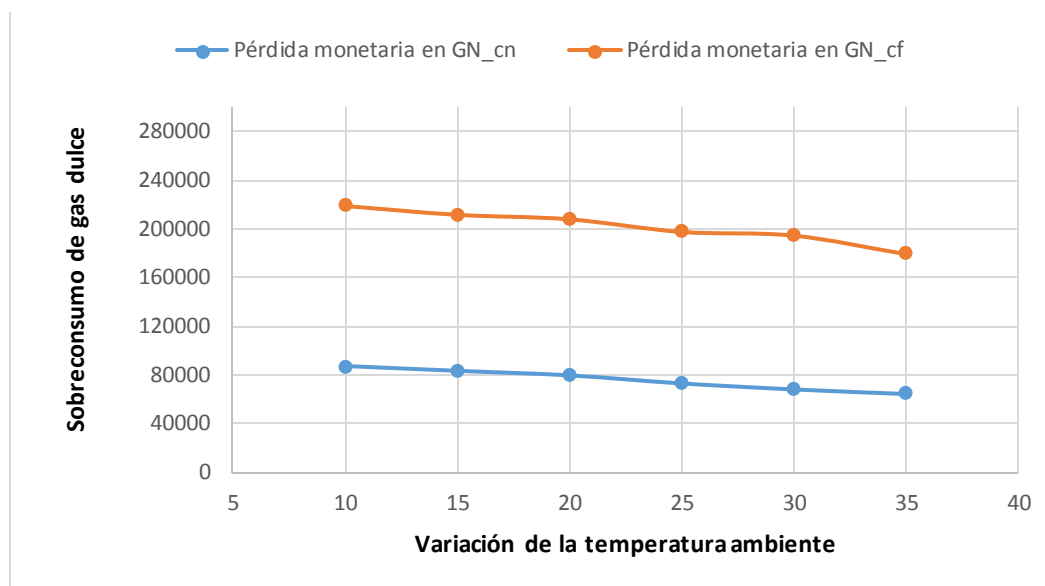


Figura 3.7: Pérdida monetaria asociada al sobreconsumo de gas dulce ante la variación de la temperatura ambiente. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3.7 se puede observar que se pierden entre 65 000 y 87 000 CUC/a cuando el aire se encuentra en reposo y entre 180 000 y 220 000 CUC/a cuando el aire esta en movimiento por este concepto ante la variación de la temperatura ambiente.

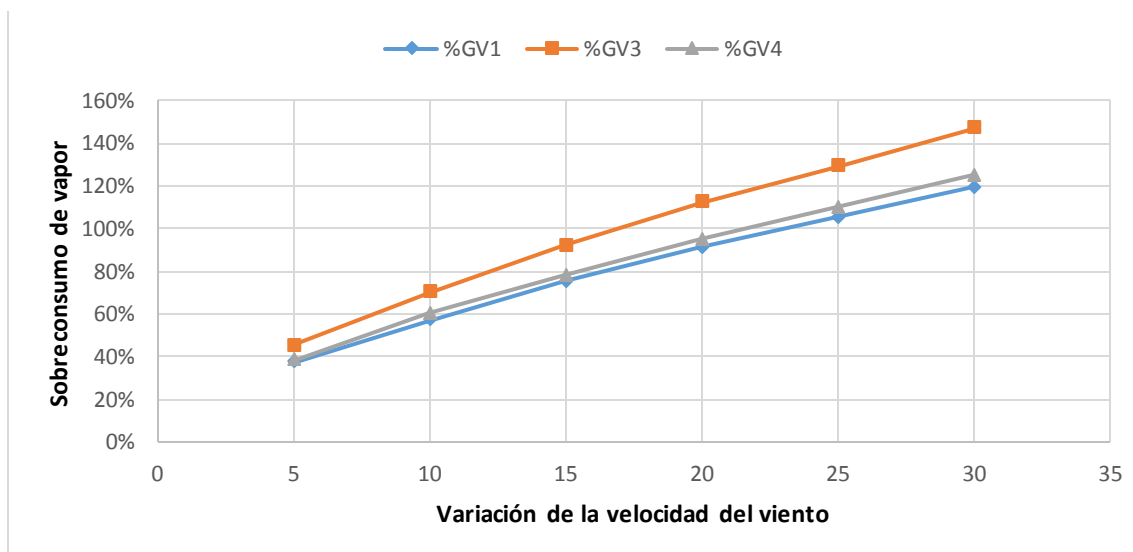


Figura 3.8: Porcentaje de sobreconsumo de vapor ante la variación de la velocidad del viento. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, si se considera la variación de la velocidad del viento se observa que (Figura 3.8) el sobreconsumo de vapor va desde 38 a 150% de los generadores de vapor analizados. De aquí se destaca que, cuando la velocidad del viento está entre 17 y 23 km/h se pierde el 100% del vapor generado.

Asociado a esto se puede determinar (Figura 3.9) que la pérdida monetaria asociada a la variación de la velocidad del viento se encuentra entre 84 000 y 275 000 CUC/a.

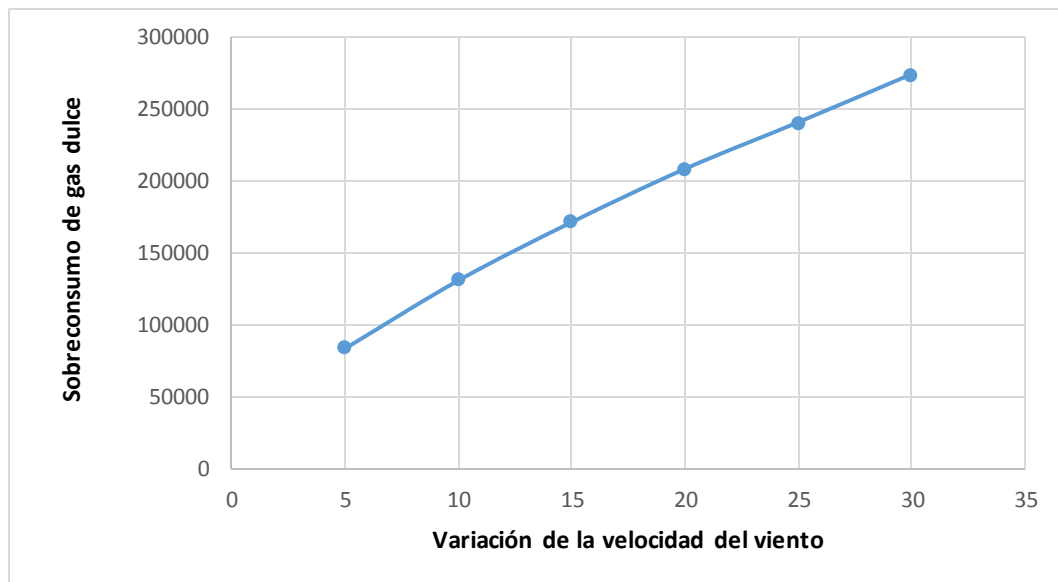


Figura 3.9: Pérdida monetaria asociada al sobreconsumo de gas dulce ante la variación de la velocidad del viento. Fuente: elaboración propia.

3.3 Análisis de la Influencia de la temperatura ambiente sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante

Para analizar la influencia de la temperatura ambiente sobre el espesor del aislante, se muestra en la figura 3.10 la variación de las pérdidas de calor en la tubería verticales de 10 pulgadas.

Como se observa, independientemente del movimiento del aire, ante la variación de la temperatura ambiente, las pérdidas de calor al medio toman un comportamiento asintótico sobre 0,06 m de espesor de aislante para todos los diámetros de tubería, independientemente de la posición. Esto significa que no tiene sentido, en las condiciones en el Proceso de calentamiento de los Tanques de Tratamiento, poner aislamiento térmico con espesores por encima de este valor en ninguna de las tuberías.

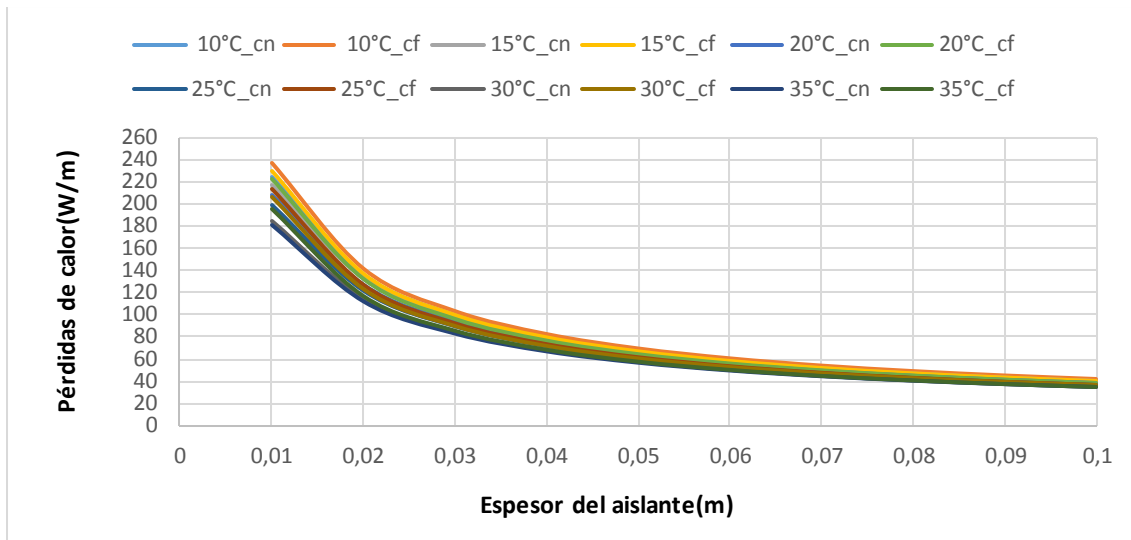


Figura 3.10: Variación de las pérdidas de calor (W/m) en las tuberías. Fuente: elaboración propia.

Las pérdidas de calor en las tuberías en función del diámetro y la posición se muestran en la tabla 3.2. La tendencia de las pérdidas de calor ante la variación de la temperatura ambiente para las tuberías de 3 y 8 pulgadas en posición vertical y convección libre se muestran en el Anexo: A-9.1 para las tuberías de 3 pulgadas posición vertical, Anexo: A-9.2 para las tuberías de 8 pulgadas posición vertical, Anexo: A-9.3 para las tuberías de 10 pulgadas posición horizontal, Anexo: A-9.4 para las tuberías de 8 pulgadas posición horizontal, Anexo: A-9.4 para las tuberías de 3 pulgadas posición horizontal.

Tabla 3.2: Pérdidas de calor (W/m) ante la variación de la temperatura ambiente y el espesor del aislante en Convección Libre. Fuente: elaboración propia.

Posición/diámetro	3 in cn	8 in cn	10 in cn
Vertical	50 – 280	35 – 220	260 – 2 200
Horizontal	20 – 100	30 – 230	135 – 850

Fuente: elaboración propia

De manera general, se puede asegurar que la temperatura ambiente influyen considerablemente en las perdidas de calor en las tuberías verticales de 10 pulgadas (260 – 2 200W/m) y en las tuberías de 3 y 8 pulgadas influye la temperatura ambiente, pero con respecto a las de 10 pulgadas estas son 10 veces menores. Las pérdidas en las tuberías en función del diámetro y la posición se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Pérdidas de calor (W/m) ante la variación de la temperatura ambiente y el espesor del aislante en Convección Forzada.

Posición/diámetro	3 in cn	8 in cn	10 in cn
Vertical	120 – 910	30 – 240	300 –2370
Horizontal	20 – 125	35 – 280	110 – 1000

Fuente: elaboración propia

De manera general, se puede asegurar que la temperatura ambiente influye considerablemente en las pérdidas de calor de las tuberías horizontales y verticales de 10 pulgadas, independientemente del movimiento del aire. En las tuberías de 3 y 8 pulgadas influyen pero en un rango mucho menor que en las tuberías de 10 pulgadas.

3.4 Análisis de la Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante.

Como se refirió anteriormente, la temperatura superficial del aislante debe ser 52°C según la norma ASTM F 683-00. Cuando se analiza la influencia de la temperatura ambiente sobre dicha temperatura se puede observar primeramente que cuando el aire está en reposo (convección libre) la temperatura superficial del aislante es 5°C superior que cuando está en movimiento (convección forzada) para las tuberías verticales de 8 y 10 pulgadas, y 10°C superior para las tuberías de 3 pulgadas, en todo el intervalo de estudio. En la figura 3.11 se observa el comportamiento para las tuberías de 10 pulgadas, posición vertical (convección libre y convección forzada).

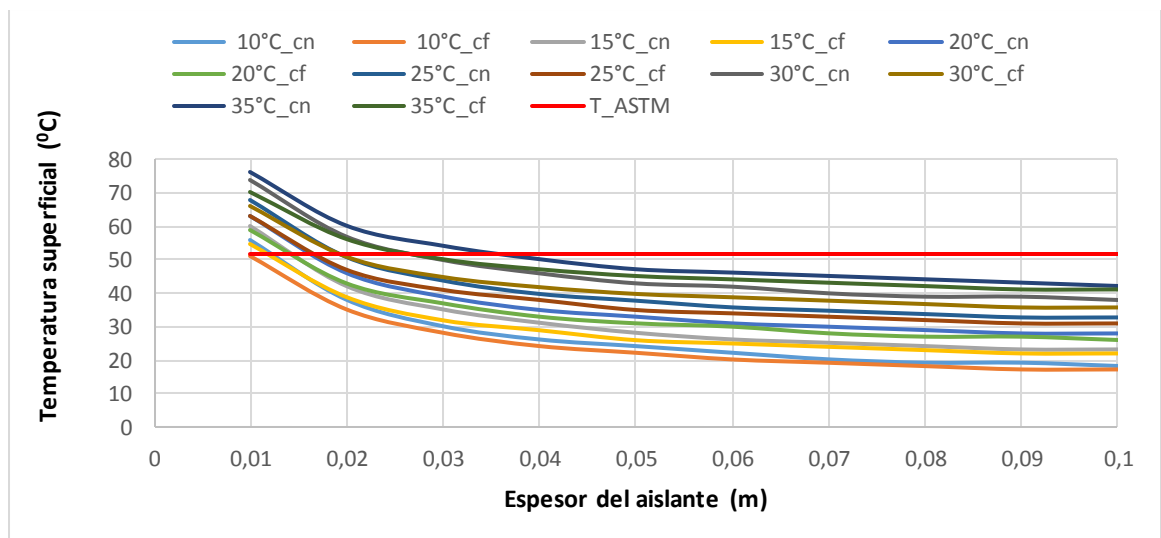


Figura 3.11: Temperatura ambiente (°C) sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante (m) para tuberías de 10 pulgadas, posición Vertical. Fuente: elaboración propia

En el caso de las tuberías horizontales la temperatura superficial del aislante varía de 4 a 20°C en las tuberías de 8 y 10 pulgadas y de 6 a 25°C en las de 3 pulgadas, en todo el intervalo de estudio, por lo que se corrobora que el movimiento del aire afecta directamente la temperatura superficial del aislante, observar Anexo A-10.1 influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in Convección Libre y Convección forzada. Anexo A-10.2 tuberías Verticales de 8 in Convección Libre y Convección forzada. Anexo A-10.3 tuberías Horizontales de 10 in Convección Libre y Convección forzada. Anexo A-10.4 tuberías Horizontales de 3 in Convección Libre y Convección forzada. Anexo A-10.5 tuberías Horizontales de 8 in Convección Libre y Convección forzada.

Tabla 3.4: Espesor del aislante calculado (m) para satisfacer la temperatura superficial según la norma ASTM F 683 ante la variación de la temperatura ambiente. Convección Libre.

Posición/diámetro	3 in	8 in	10 in
Vertical	0,04	0,035	0,035
Horizontal	0,03	0,03	0,03

Fuente: elaboración propia

Por otra parte, se puede definir, de acuerdo a la influencia sobre el espesor del aislante que los diámetros que garantizan la temperatura normada son 0,03 m para las tuberías horizontales y de 0,035 a 0,04 m para las tuberías verticales como se refleja en la tabla 3.4, contrariamente a lo que recomienda la norma.

Tabla 3.5: Espesor del aislante calculado (m) para satisfacer la temperatura superficial según la norma ASTM F 683 ante la variación de la temperatura ambiente. Convección Forzada.

Posición/diámetro	3 in	8 in	10 in
Vertical	0,03	0,03	0,035
Horizontal	0,03	0,03	0,03

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 3.5, se puede definir, de acuerdo a la influencia sobre el espesor del aislante que los diámetros que garantizan la temperatura superficial normada son 0,03 m para 3 y 8 pulgadas y 0,035 m para 10 pulgadas en tuberías verticales. Para todas las tuberías horizontales, 0,03 m.

3.5 Análisis de la Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante

Como quedó constatado anteriormente, la variación de la velocidad del viento incide significativamente sobre las pérdidas de calor al medio y toman un comportamiento asintótico sobre 0,06 m de espesor de aislante para todo el rango estudiado. (Figura 3.12)

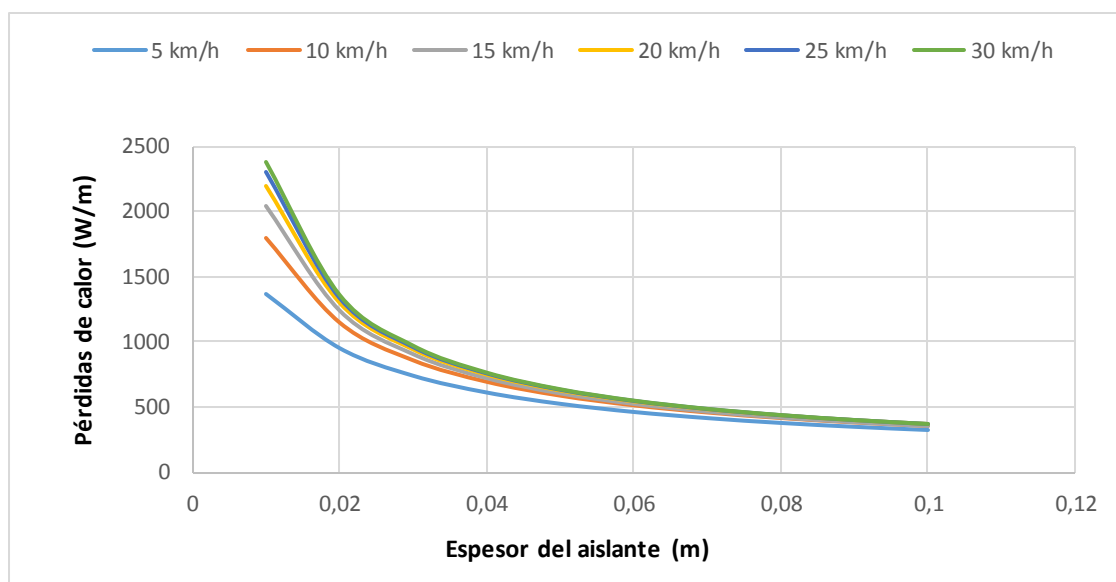


Figura 3.12: Velocidad del viento (km/h) sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) para tuberías de 10 pulgadas Convección Libre, posición Vertical. Fuente: elaboración propia

Esto significa que no tiene sentido, en las condiciones del área de tratamiento, poner aislamiento térmico con espesores por encima de este valor en todas las tuberías, independientemente de la posición. En la tabla 3.6 se muestra el rango de las pérdidas de calor en las tuberías de acuerdo a su posición y diámetro. Como se puede observar, las pérdidas más significativas son en las tuberías verticales de 3 y 10 pulgadas y en las horizontales de 10 pulgadas.

Tabla 3.6: Pérdidas de calor (W/m) ante la variación de la velocidad del viento y el espesor del aislante.

Posición/diámetro	3 in	8 in	10 in
Vertical	200 – 900	50 – 250	500 – 2 500
Horizontal	30 – 120	50 – 250	200 – 1 000

Fuente: elaboración propia

Observar Anexos: A-11.1 Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in. A-11.2 para tuberías verticales 8 in. A-11.3 para tuberías horizontales 10 in. A-11.4 para tuberías horizontales 3 in. A-11.5 para tuberías horizontales 8 in.

3.6 Análisis de la Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante.

Por otra parte podemos observar en la figura 3.13 la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en las tuberías verticales de 10 pulgadas.

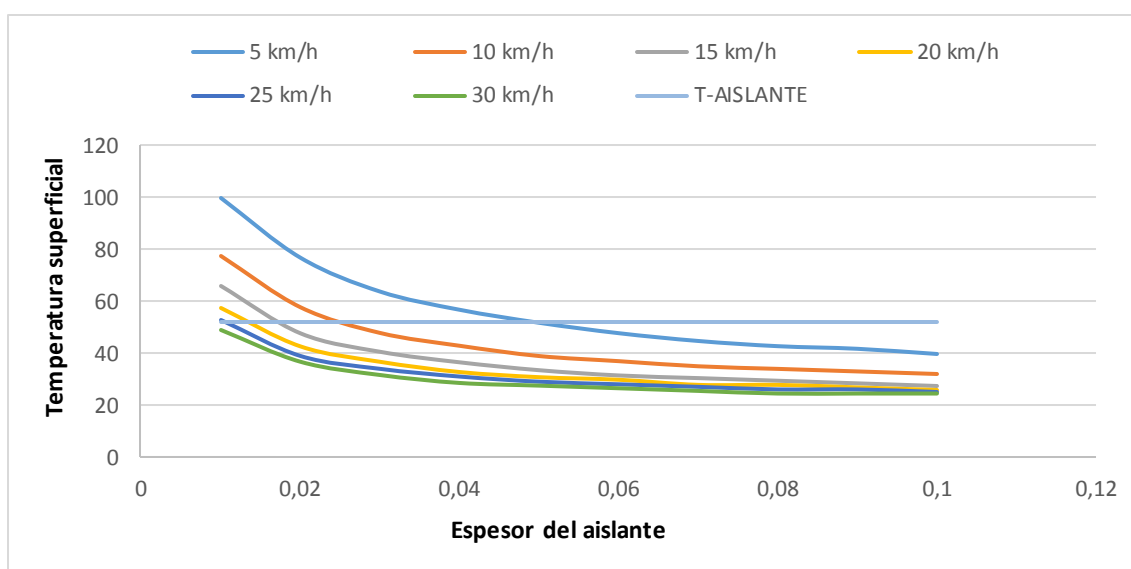


Figura 3.13: velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en las tuberías verticales de 10 pulgadas. Fuente: elaboración propia

Para las tuberías verticales de 3 pulgadas se muestran en el Anexo: A-12.1 y las de 8 pulgadas en el Anexo: A12-2. En el caso de las tuberías horizontales para 10 pulgadas se encuentran en el Anexo: A12-3, para las 3 pulgadas en el Anexo: A12-4 y para las de 8 pulgadas en el Anexo: A12-5.

Al determinar el espesor de aislante necesario calculado para satisfacer la temperatura superficial según la norma se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Espesor del aislante calculado (m) para satisfacer la temperatura superficial según la norma ASTM F 683-00 ante la variación de la velocidad del viento.

Posición/diámetro	3 in	8 in	10 in
Vertical	0,04	0,05	0,05
Horizontal	---	0,015	0,015

Fuente: elaboración propia

Como se observa, para las tuberías verticales el espesor debe ser de 0,04 m para las tuberías verticales de 3 pulgadas y de 0,05 m para las de 8 y 10 pulgadas. En el caso de las tuberías horizontales, se satisface la temperatura normada con todo el rango de espesor estudiado para las tuberías de 3 pulgadas y con 0,015 m para las tuberías de 8 y 10 pulgadas.

3.7 Análisis de la Influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante

Para analizar la influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante, se muestra en la figura 3.14 la tendencia en las tuberías verticales de 10 in cuando el aire está en reposo (convección natural) y con el aire en movimiento (convección forzada). Como se observa, independientemente del tipo de mecanismo, las pérdidas de calor al medio toman un comportamiento asintótico sobre 0,06 m de espesor del aislante, independientemente de la posición. Esto significa que no tiene sentido, en las condiciones del área de tratamiento, poner aislamiento térmico con espesores por encima de este valor en ninguna de las tuberías.

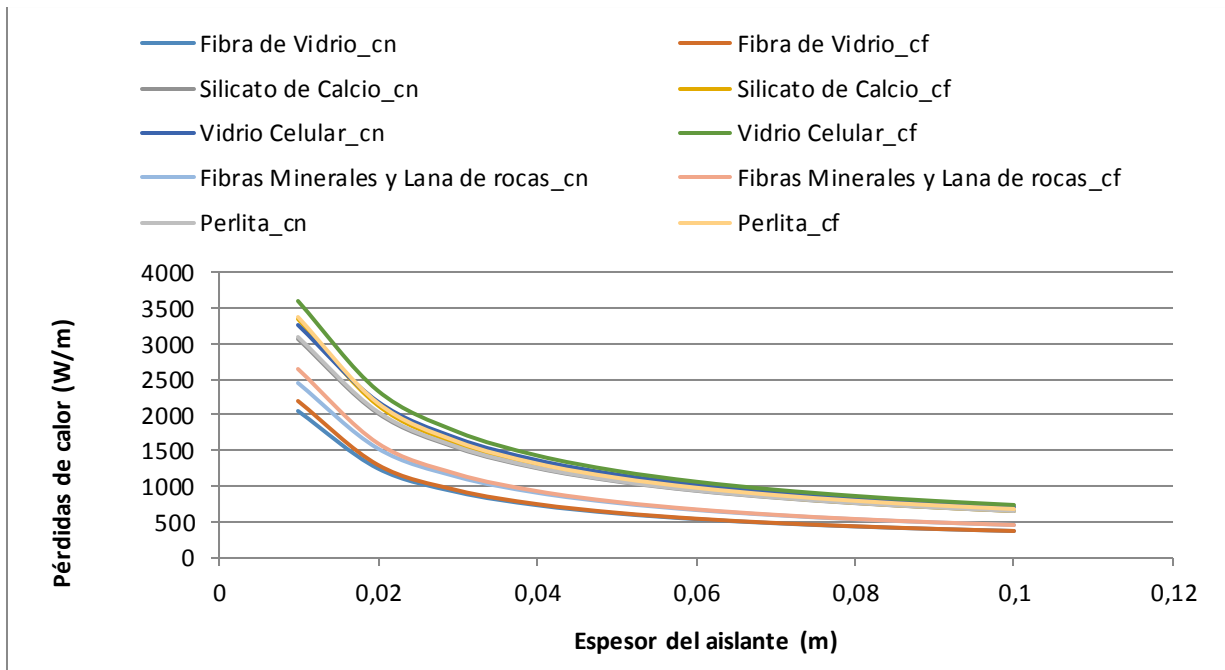


Figura 3.14: Tipo de aislante sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m). Fuente: elaboración propia.

Para las tuberías de 3 pulgadas posición vertical se muestran en el Anexo: A-13.1, para las de 8 pulgadas posición vertical Anexo: A-13.2. En el caso de las tuberías de 10 pulgadas, posición horizontal Anexo: A-13.3, para las tuberías de 3 pulgadas, posición horizontal Anexo: A-13.4 y para las de 8 pulgadas posición horizontal Anexo: A-13.5.

Las pérdidas de las tuberías en función del diámetro y la posición se muestran en la tabla 3.8 y la tabla 3.9.

Tabla 3.8: Pérdidas de calor (W/m) mediante la influencia del tipo de aislante sobre el espesor del aislante (m), Convección Natural.

Posición/diámetro	3 in		8 in		10 in	
	V	H	V	H	V	H
Fibra de Vidrio	60-270	50-210	45-210	20-95	400-2 100	180-800
Silicato de Calcio	120-400	70-330	70-310	40-140	700-3 000	220-1 200
Vidrio Celular	135-435	75-350	75-340	45-155	700-3 350	225-1 300
Fibras Minerales y Lana de rocas	70-335	50-260	50-250	25-115	500-2 500	200-990
Perlita	110-400	70-330	70-320	40-140	700-3 100	220-1 200

Fuente: elaboración propia.

De manera general, en la tabla 3.8 se puede ver que con el aire en reposo (convección natural) el aislante que proporciona menos pérdida es: Fibra de Vidrio ya que la medida de la variación de los rangos son mucho menores que la del Fibras Minerales y Lana de

rocas, Silicato de Calcio, Vidrio Celular y Perlita, además se observa que donde existe más pérdidas de calor es en las tuberías de 10 pulgadas, donde tienen un amplio rango de variación, sobre todo en la posición vertical.

Tabla 3.9: Pérdidas de calor (W/m) mediante la influencia del tipo de aislante sobre el espesor del aislante (m), Convección Forzada.

Posición/ diámetro	3 in		8 in		10 in	
	V	H	V	H	V	H
Fibra de Vidrio	180-810	30-130	49-260	50-250	490-2 350	200-1 000
Silicato de Calcio	220-1 220	45-200	70-350	70-445	700-3 490	300-1 600
Vidrio Celular	225-1 390	50-230	75-360	75-480	700-3 600	350-1 790
Fibras Minerales y Lana de rocas	200-1 000	30-150	50-345	500-2 600	200-1 200	200-1 200
Perlita	210-1 300	40-200	70-350	70-450	700-3 500	300-1 600

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que con el aire en movimiento (convección forzada) el aislante que más pérdidas proporciona es el de Vidrio Celular dicho sea en las tuberías verticales de 3 pulgadas es de (225-1 390 W/m), en las de 10 pulgadas verticales (700-3 600 W/m), en las tuberías horizontales de 3 pulgadas (50-230 W/m) y en las de 10 pulgadas horizontales (350-1 790 W/m). El aislante adecuado para las tuberías es el de Fibra de Vidrio al ser el que menos pérdidas proporciona, siendo este el aislante que se usa en la Planta de Procesamiento de Crudo.

3.8 Análisis de la Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante

La temperatura superficial del aislante debe ser 52°C según la norma ASTM F683-00. Por lo tanto para analizar la influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en las tuberías verticales de 10 pulgadas, se muestra la (figura 3.15) que cuando el aire esta en reposo (convección natural) y con el aire en movimiento (convección forzada), se observa, independientemente del tipo de mecanismo, las pérdidas de temperatura toman un comportamiento asintótico sobre 0,07 m de espesor del aislante, independientemente de la posición. Al determinar el espesor de aislante necesario para los valores promedios de la temperatura ambiente (20 °C) y la velocidad

del viento (20 km/h) calculado para satisfacer la temperatura superficial según la norma se muestra en la tabla 3.10.

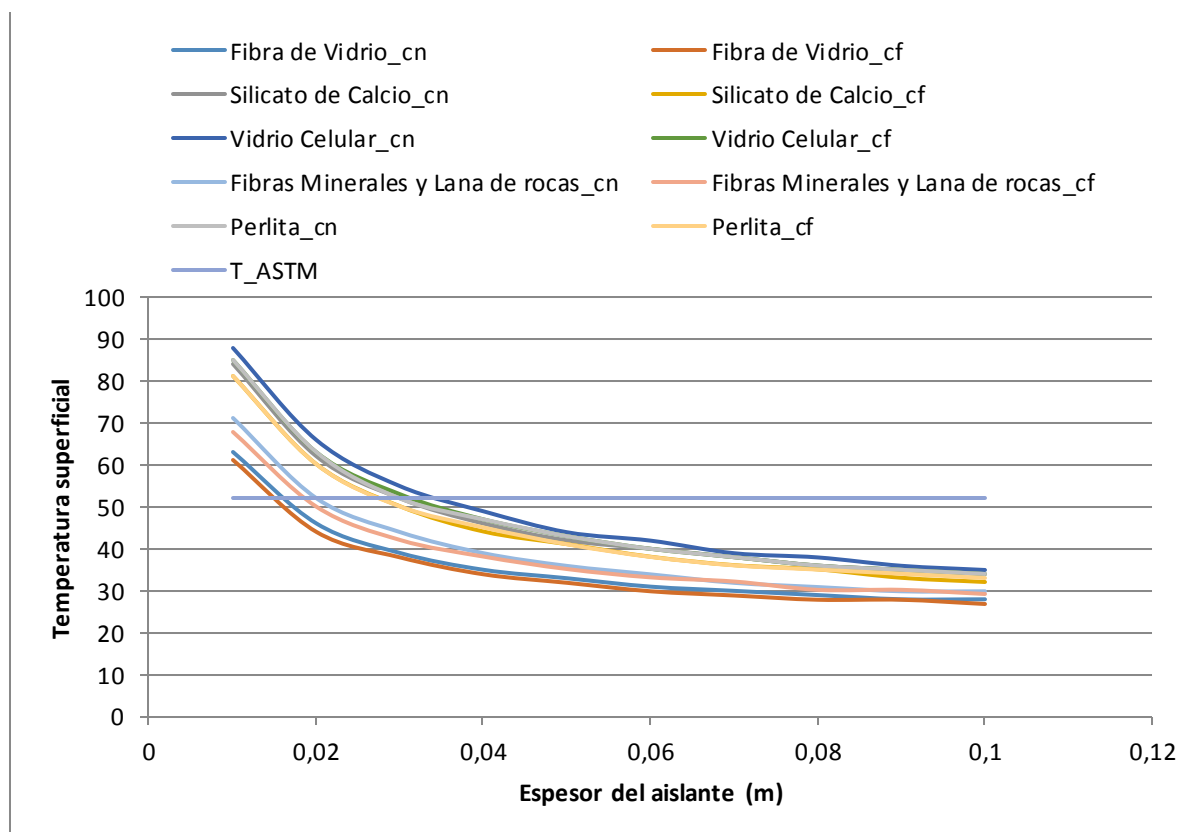


Figura 3.15: Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante. Fuente: elaboración propia.

Para las tuberías de 3 pulgadas, posición vertical Anexo: A-13.6, tuberías de 8 pulgadas, posición vertical Anexo: A-13.7. Para las tuberías de 10 pulgadas, posición horizontal Anexo: A-13.8, tuberías de 3 pulgadas, posición horizontal Anexo: A-13.9 y para las tuberías de 8 pulgadas, posición horizontal Anexo: A-13.10.

Tabla 3.10: Espesor del tipo de aislante calculado (m) para satisfacer la temperatura superficial según la norma ASTM F 683 - 00 ante la variación de la temperatura ambiente (°C). Convección Natural.

Posición/diámetro	3 in		8 in		10 in	
	V	H	V	H	V	H
Fibra de Vidrio	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06
Silicato de Calcio	0,045	0,045	0,05	0,05	0,05	0,06
Vidrio Celular	0,045	0,045	0,05	0,05	0,05	0,06
Fibras Minerales y Lana de rocas	0,045	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07

Perlita	0,045	0,06	0,05	0,06	0,06	0,07
----------------	-------	------	------	------	------	------

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla 3.10 en presencia de la convección natural, se puede definir los diferentes tipos de espesores que garantizan la temperatura normada, teniendo en cuenta que para cada tipo de aislante varían; siendo el de mayor valor de espesor la Perlita y Fibras Minerales y Lana de rocas en líneas de 10 pulgadas, posición horizontal y el aislante que presenta menor valor de espesor es el de Fibra de Vidrio, excepto las líneas de 8 y 10 pulgadas posición horizontal. Por lo tanto ninguno de los aislantes tiene un espesor correspondiente que con lo que indica la norma ASTM F-683-00 para las tuberías de 3,8 y 10 pulgadas.

Tabla 3.11: Espesor del tipo de aislante calculado (m) para satisfacer la temperatura superficial según la norma ASTM F 683 - 00 ante la variación de la temperatura ambiente (°C). Convección Forzada.

Posición/diámetro	3 in		8 in		10 in	
	V	H	V	H	V	H
Fibra de Vidrio	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Silicato de Calcio	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Vidrio Celular	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Fibras Minerales y Lana de rocas	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Perlita	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Fuente: elaboración propia.

Se puede definir que de acuerdo al efecto del tipo de aislante sobre el espesor del aislante, los espesores que garantizan la temperatura normada en presencia de la convección forzada es de 0,04 m para los cinco aislantes propuesto. Por tanto, según lo analizado hasta aquí se puede afirmar que los espesores recomendados por la norma ASTM F 683-00 no garantizan ni las pérdidas de calor ni la temperatura superficial del aislante recomendados por la propia norma.

3.9 Resultados del cálculo del espesor del aislante propuesto para instalar

Una vez determinado los espesores que garantizan la temperatura superficial del aislante según la norma ASTM F-683-00 ante todas las condiciones analizadas de temperatura ambiente (10°C a 35°C) y velocidad del viento (5km/h a 35 km/h), se determina las pérdidas de calor que deberían tener las tuberías con la propuesta de aislante realizada en la figura 3.16.

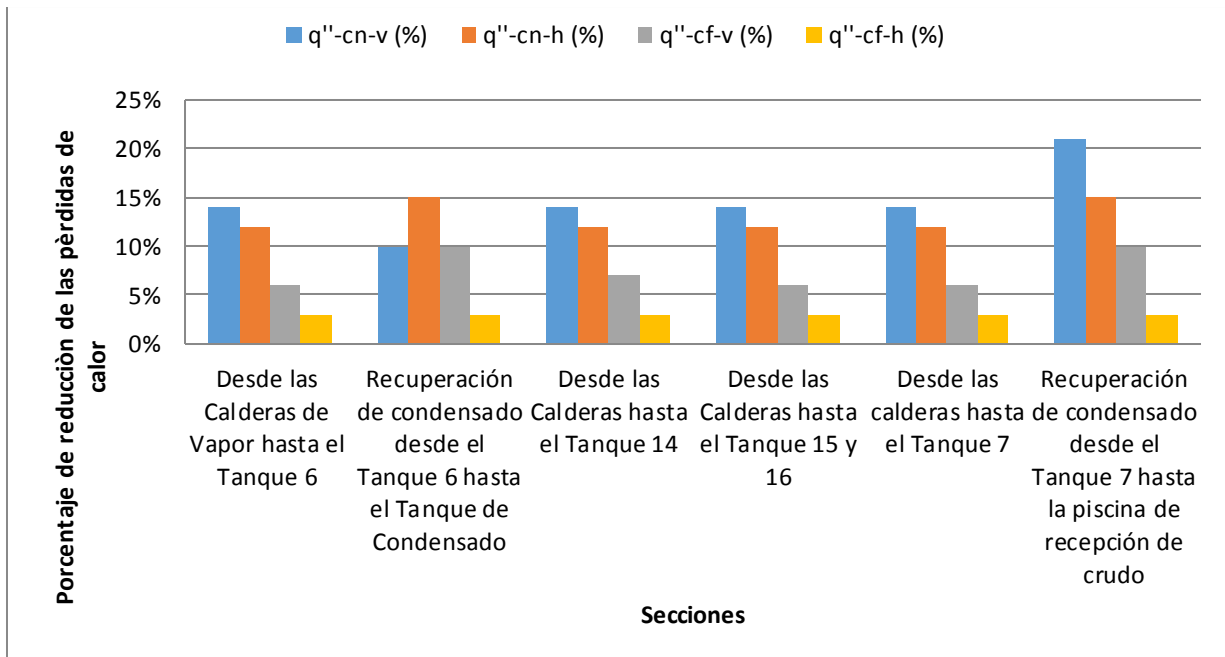


Figura 3.16: Reducción del flujo de calor en las tuberías con el espesor del aislante propuesto. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 3.16, el flujo de calor perdido en todas las secciones del área de tratamiento se encuentra entre 12 y 21% cuando el aire está en reposo (convección natural-cn) y entre 3 y 10% considerando la velocidad del aire (convección forzada-cf), por lo que se observa con el nuevo espesor del aislante propuesto, se obtienen mejores resultados con respecto al espesor del aislante que se encuentra instalado ya que el flujo de calor perdido en convección forzada se encuentra entre un 6 y 17% y en convección libre entre un 21 y 33%. Por tanto, en los dos casos, el espesor del aislante propuesto va a dar mejores resultados con respecto al ahorro de energía.

De la misma manera, según la norma ASTM F-683-00, la temperatura superficial del aislante para este tipo de sistema de tuberías es de 52°C. Como se puede observar, en la Figura 3.17, la temperatura superficial según la norma se cumple en toda la red, cuando se analizan las pérdidas de energía con aire en reposo (convección natural) y con aire en movimiento (convección forzada) la temperatura más alta alcanzada en la superficie del aislante es de 45°C en las tuberías de recuperación de condensado, observando los resultados obtenidos se evidencia que hay una reducción de la temperatura superficial del espesor del aislante propuesto con el que está instalado en 16°C. Por tanto, el

espesor del aislante propuesto va a dar mejores resultados con respecto a la reducción de temperatura.

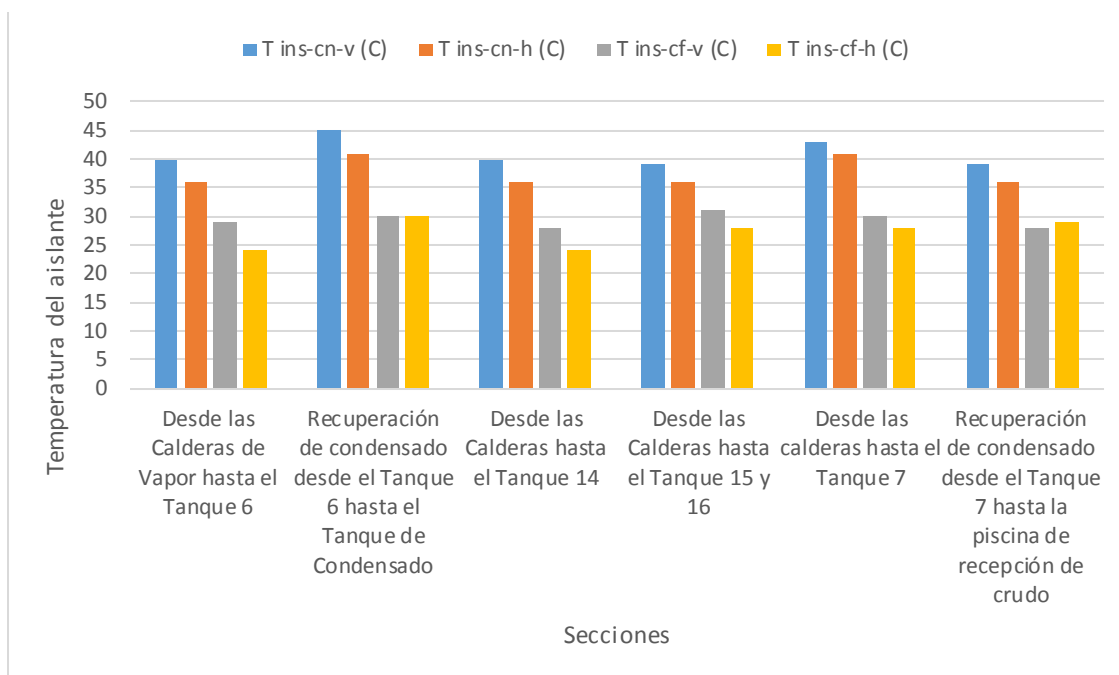


Figura 3.17: Reducción de la Temperatura superficial en las tuberías con el espesor del aislante propuesto. Fuente: Elaboración propia

3.10 Beneficio bruto asociado a la instalación del espesor de aislante propuesto

Una vez determinado el espesor de cada aislante se puede determinar la ganancia que reporta recubrir las tuberías con 0,045 m para las tuberías verticales de 3 pulgadas; 0,05 m para las tuberías verticales de 8 pulgadas y 0,06 m para las tuberías verticales de 10 pulgadas. Para las tuberías horizontales de 3 pulgadas y 8 pulgadas con 0,06 m y en el caso de las de 10 pulgadas 0,07 m. En la tabla 3.10 se observa el ahorro por concepto de consumo de gas natural.

Tabla 3.10: Ganancia que reporta recubrir las tuberías y ahorro por concepto de consumo de gas natural

Tipo de aislante	Ahorro de gas natural (CUC/a)	Costo del aislante total (USD/a)	Beneficio bruto(CUC/a)
Fibra de Vidrio	4 201 342	2 241	3 469 214
Silicato de Calcio	7 126 461	2 776	7 212 236
Vidrio Celular	9 112 804	3 456	8 569 927
Fibras Minerales y Lana de rocas	6 789 781	2 896	6 458 465
Perlita	8 124 591	2 326	8 123 045

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar si se instala la Fibra de Vidrio se ahorraría 4 201 342 CUC/a en gas natural, pero si se instala el Silicato de Calcio se ahorra un 70% más que si se pone Fibra de Vidrio, con Vidrio Celular se ahorra un 117%, Fibras Minerales y Lana de rocas se ahorra un 62% y Perlita se ahorra un 93% comparado con la instalación de Fibra de Vidrio. Como se puede ver todos los aislantes ahorrarían más gas que la Fibra de Vidrio. Teniendo en cuenta los gráficos analizados anteriormente en el Anexo 13, se observa que la Fibra de Vidrio es el que menor pérdida de calor proporciona al medio con respecto a los demás aislantes analizados. Por lo que aun así se recomienda por razones de seguridad que se mantenga la Fibra de Vidrio como el aislante a utilizar en la industria.

Con respecto al costo si se realiza este mismo análisis con Silicato de Calcio costa un 24%, Vidrio Celular un 54%, Fibras Minerales y Lana de rocas 29% y con Perlita 3% más que la Fibra de Vidrio, lo que ratifica que con respecto al costo, es más factible seguir manteniendo la Fibra de Vidrio como el aislante instalado en la industria ver Anexo 13: Costos de los aislantes utilizados en el caso de estudio.

3.11 Conclusiones parciales del capítulo 3

1. El espesor de aislante instalado en las líneas de vapor no se corresponde con la norma ASTM F683-00
2. Cuando el aire está en reposo el sobreconsumo de vapor se encuentra entre 30 y 50% de la generación de los tres generadores estudiados y cuando el aire está en movimiento entre el 80 y 120%. De aquí destaca que, en noches muy frías (10°C) se desperdicia casi en su totalidad el vapor producido por los tres generadores de vapor. Asociado a esto se pierden entre 65 000 y 87 000 CUC/a cuando el aire se encuentra en reposo y, cuando el aire está en movimiento, entre 180 000 y 220 000 CUC/a ante la variación de la temperatura ambiente.
3. Ante la variación de la velocidad del viento se observa que el sobreconsumo de vapor va desde 38 a 150% de los generadores de vapor analizados. De aquí se destaca que, cuando la velocidad del viento está entre 17 y 23 km/h se pierde el 100% del vapor generado. La pérdida monetaria asociada a la variación de la velocidad del viento se encuentra entre 84 000 y 275 000 CUC/a.
4. En las tuberías verticales de 10 pulgadas las pérdidas de calor son considerablemente mayores que en el resto de las tuberías estudiadas.
5. Las pérdidas de calor con el espesor del aislante instalado son de 21-33% en convección natural y de 6-17% en convección forzada. Con la propuesta del espesor del aislante a instalar se reduce para convección natural hasta 12-21% y para convección forzada de 3-10%
6. Con el espesor del aislante instalado la temperatura del aislante para convección natural obtiene un valor 65⁰C y para convección forzada 35⁰C. Con la propuesta del espesor del aislante la temperatura del aislante para convección natural se reduce en 45⁰C y para convección forzada en 30⁰C por lo que cumple con la norma ASTM F-683-00.
7. Se recomienda que se mantenga la Fibra de Vidrio como el aislante instalado.
8. Con la instalación del espesor de aislante recomendado, para Fibra de Vidrio, se ahorran 4 201 342 CUC/a por concepto de dejar de consumir gas natural; lo que equivale a un beneficio bruto de 3 469 214 CUC/a.

Conclusiones

1. Las pérdidas de calor en las líneas de vapor en el proceso de calentamiento del crudo de los Tanques de Tratamiento se encuentra entre 21 y 33% cuando el aire está en reposo (convección natural-cn) y entre 6 y 17% considerando la velocidad del aire (convección forzada-cf).
2. El sobreconsumo de vapor cuando el aire está en reposo se encuentra entre 30 y 50%, con una pérdida monetaria de 65 000 y 87 000 CUC/a y cuando el aire está en movimiento entre el 80 y 120%, con una pérdida monetaria entre 180 000 y 220 000 CUC/a.
3. Las mayores pérdidas de calor son en las tuberías verticales de 10 pulgadas en el rango de (260-2 200) convección natural y de (300-2 370) convección forzada.
4. El espesor del aislante que se debe instalar para garantizar la temperatura superficial según la norma ASTM F-683-00, en las tuberías verticales deben ser de 0,045 m en las de 3 pulgadas, 0, 05 m en las de 8 pulgadas y 0, 06 m en las de 10 pulgadas. En el caso las tuberías horizontales para las tuberías de 3 y 8 pulgadas es de 0,06 m y para las de 10 pulgadas 0,07 m.
5. El ahorro por concepto de instalar el espesor de aislante recomendado (Fibra de vidrio) es de 3469 214 CUC/a.

Recomendaciones

1. Evaluar las pérdidas de energía por mal estado del aislamiento térmico en las líneas de vapor en el área de Sala de Calderas hasta la Segunda Etapa de Separación y Estación Cabecera del Oleoducto.
2. Evaluar las pérdidas de energía por mal estado del aislamiento térmico en las líneas de crudo de la Planta de Procesamiento de Crudos.

Bibliografía

1. ASTM C 547 – 95 (2019). Standard Specification for Mineral Fiber Pipe Insulation". Annual Book of ASTM Standards vol. 0406.
2. ASTM C 552 – 00 (2019). Standard Specification for Cellular Glass Thermal Insulation. Annual Book of ASTM Standards vol. 0406.
3. ASTM C 553 – 99 (2019). Specification for Mineral Fiber Blanket Thermal Insulation for Commercial and Industrial Applications. Annual Book of ASTM Standards vol. 0406.
4. ASTM C 610 – 99 (2019). Standard Specification for Molded Expanded Perlite Block and Pipe Thermal Insulation. Annual Book of ASTM Standards vol. 0406.
5. ASTM C 680-89 (2019). "Standard Practice for Estimate of the Heat Gain or Loss and the Surface Temperatures of Insulated Flat, Cylindrical, and Spherical Systems by Use Computer Programs". Annual Book of ASTM Standards vol. 0406.
6. ASTM F 683-00 (2019). Standard Practice for Selection and Application of Thermal Insulation for Piping and Machinery. Annual Book of ASTM Standards vol. 0406.
7. Barriga Alfred, 2016 Dirección de Energía Alternativa y eficiencia Energética, Ministerio de Minas y Energía. Auditoría Energética de un Sistema de Vapor. Recuperado de
8. Bautista Vargas Gabriela (2012). Mejora continua de un sistema de alimentación de agua y generación de vapor. Tesis de Licenciatura publicada Capítulo 4. Descripción de un sistema generador de vapor. Universidad de las Américas, México.
9. Betancur Mesa Santiago, 2017. Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía. Sistemas de Vapor. Recuperado de <http://www.si3ea.gov.co/Eure/5/inicio.html>
10. Bomberg, M. 2013: Glows and shadows of thermal insulation. Frontiers of architecturalresearch.
11. BP, "Thermal Insulation", Doc. N° RP 52-1, 1997.

12. Cener. 2012: El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO₂ en viviendas mediante incremento del aislamiento.
13. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2015. Recuperado de <http://www.conuee.gob.mx/wb/>
14. Conuee, "Beneficios del aislamiento térmico en la industria," 2009.
15. Diego Almeida, Ruslán (2013). Evaluación del Sistema de Generación de Vapor de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. La Habana. Tesis en opción al título de Máster en Instalaciones Energéticas y Nucleares. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
16. F. Kreith, R. Manglik, and M. Bon 2012, Principios de transferencia de calor, 7th ed. Learning, Cengage.
17. Fiber Glass Colombia C.A. 2013 "Industrial División: Aislamientos", Notas Técnicas.
18. García de la Cruz, J. M. (2017). La energía. Retos y problemas
19. Gary J.H 2012, Handwerk G.E. Petroleum Refining, Technology and Economics. Editorial Reverté, páginas 195, 231.
20. Gerdipac Industrial 2017, "Que es el Aislamiento Térmico".
21. Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial Afelma 2016, Dirección General de Industria, Energía y Minas
22. Gutiérrez Juan Ignacio, 2013 Calderas para generar vapor - Operación y Mantenimiento Medellín.
23. 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 16: 1 466-1 471.
24. 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
25. Idae. 2007: Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. Madrid, 59 p.
26. Incropera, Bergman, T. LAVINE, A, F. & DEWIT, D. 2011: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, New Jersey, 1 039 p.

27. INSMET (2019) Sitio oficial del Instituto de Meteorología de la República de Cuba. Disponible en Internet www.insmet.cu
28. International Energy Agency. International Energy Outlook Report. 2018
29. ISOVER. 2004A: Manual de aislamiento en la industria. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 148 p.
30. Isover. 2004B: Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios y sus instrucciones técnicas complementarias. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 52 p.
31. Limone, C. 2012. Diseño e instalación de aislante térmico en tuberías y equipos, para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Simón Bolívar.
32. 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*1: 46- 52.
33. LULIC, H.; CIVIC, A.; PASIC, M.; OMERSPAHIC, A. & DZAFEROVIC, E. 2014: Optimization of thermal insulation and regression analysis of fuel consumption. *ProcediaEngineering*69: 902-910.
34. Nordelo, A. & Rubio, A. 2010. Combustión y generación de vapor. Universo Sur. ISBN.
35. PEMEX, 2004. "Aislamientos Térmicos para Altas Temperaturas en Equipos, Recipientes y Tubería Superficial", N° de Documento NFR-034-PEMEX-2004.
36. REN21 2018. Renewable Energy Network for the 21st Century. Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat and Washington, DC: Worldwatch Institute.
37. Rodríguez, Jorge A (2015). Ciclos de Vapor. En su: Introducción a la Termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería. Universidad Tecnológica Nacional. 369-428 p.
38. S. Kahan, 2002 "Transferencia de calor," Fis. Conceitual.
39. Spirax Sarco (2018) Distribución del vapor. Guía Técnica.
40. Y. Cengel, 2007 Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico, 3rd ed. McGRAW HILL/Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
41. Y. Cengel and M. Boles, 2012 Termodinámica, 7th ed. McGRAW HILL/Interamericana Editores, S.A. DE C.V.

42. 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 49: 589-598.

Anexos

Anexo 1: Silicato de calcio



Anexo 2: Fibra de Vidrio



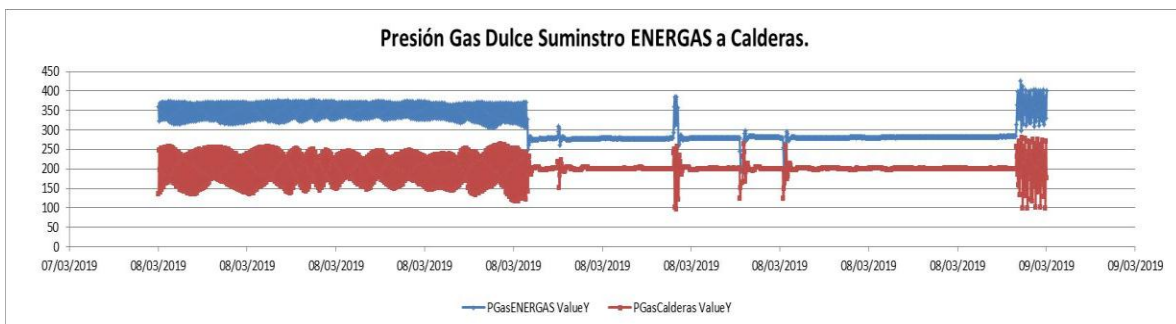
Anexo 3: Fibras minerales y lana de roca



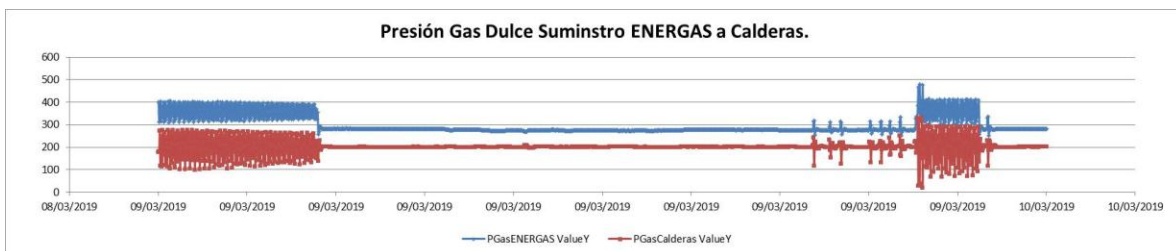
Anexo 4: Perlita



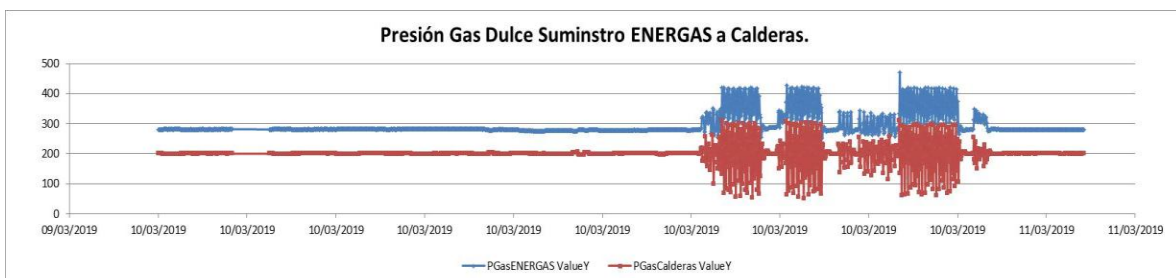
Anexo 5: Presión de gas dulce suministro ENERGAS a Caldera día 8/3



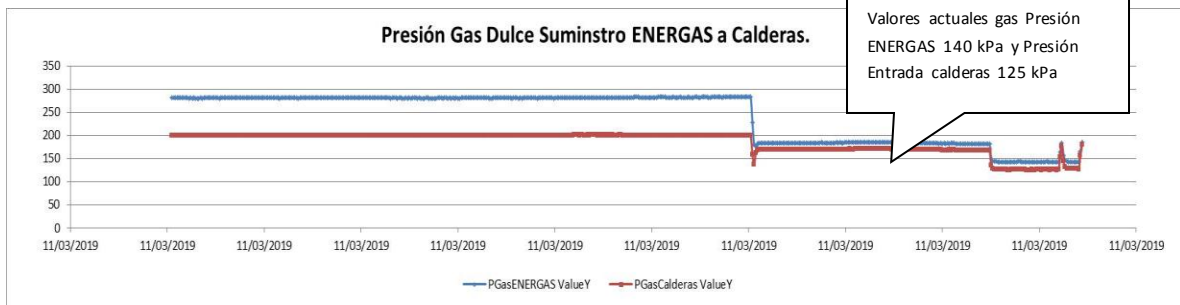
Anexo 6: Presión de gas dulce suministro ENERGAS a Caldera día 9/3



Anexo 7: Presión de gas dulce suministro ENERGAS a Caldera día 10/3

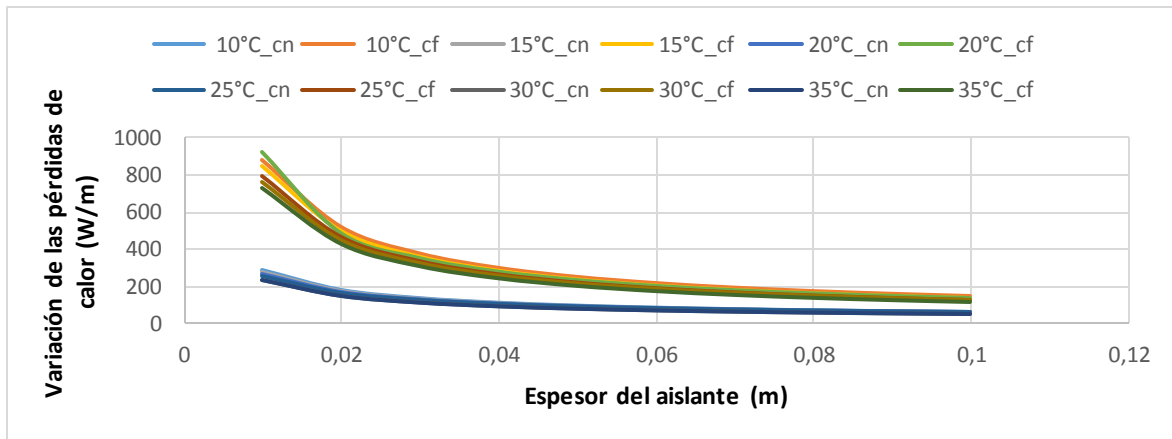


Anexo 8: Presión de gas dulce suministro ENERGAS a Caldera día 11/3



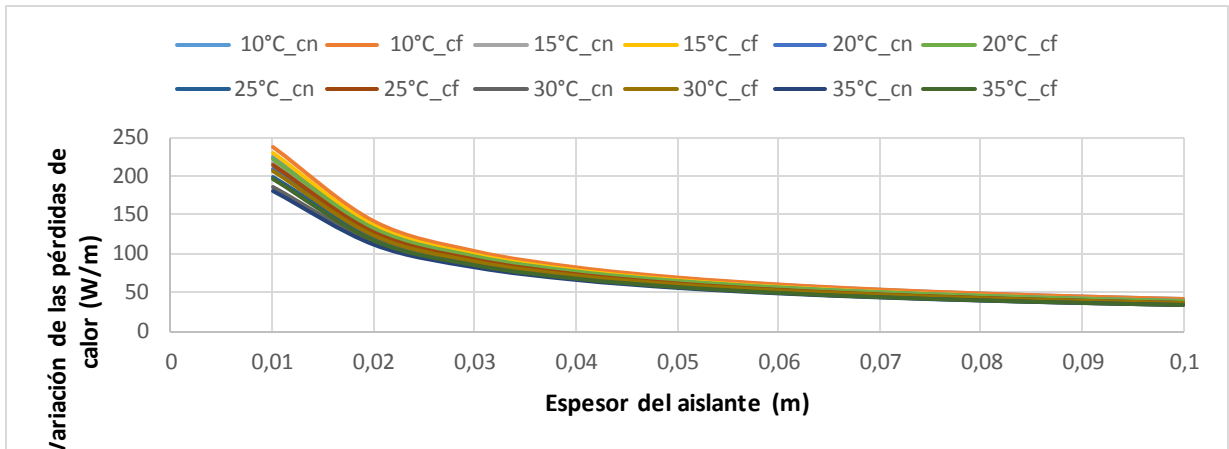
Anexo 9:

A-9.1 Variación de las pérdidas de calor en la tubería Verticales de 3 in.



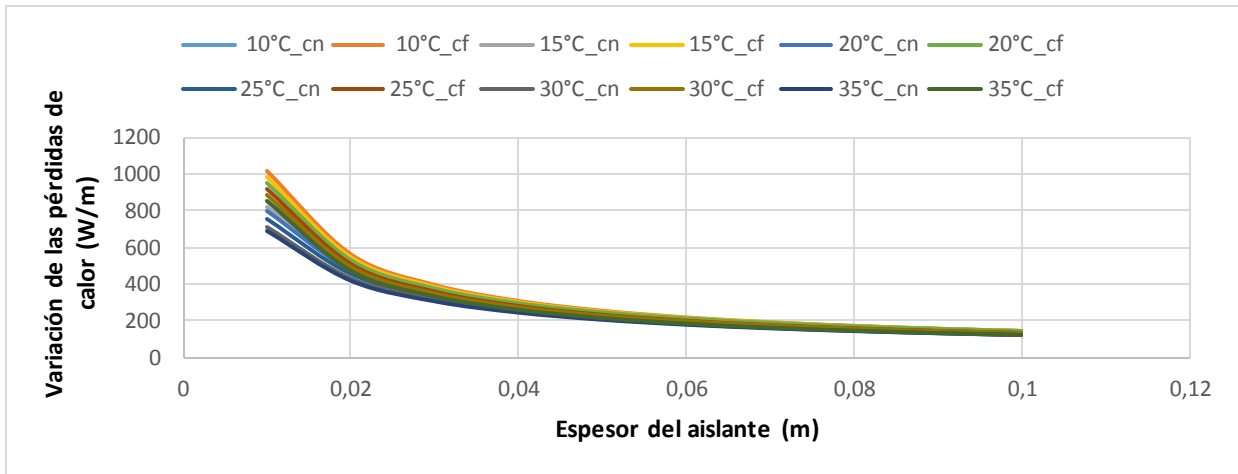
Variación de las pérdidas de calor (W/m) sobre el espesor del aislante (m) en tuberías Verticales de 3 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-9.2 Variación de las pérdidas de calor en la tubería Verticales de 8 in.



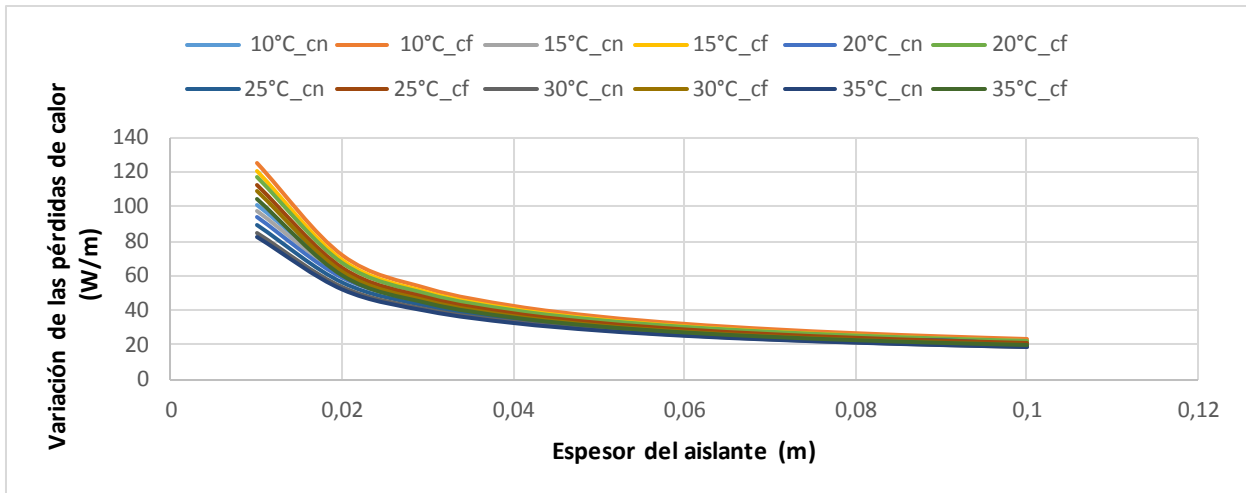
Variación de las pérdidas de calor (W/m) sobre el espesor del aislante (m) en tuberías Verticales de 8 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-9.3 Variación de las pérdidas de calor en la tubería Horizontales de 10 in.



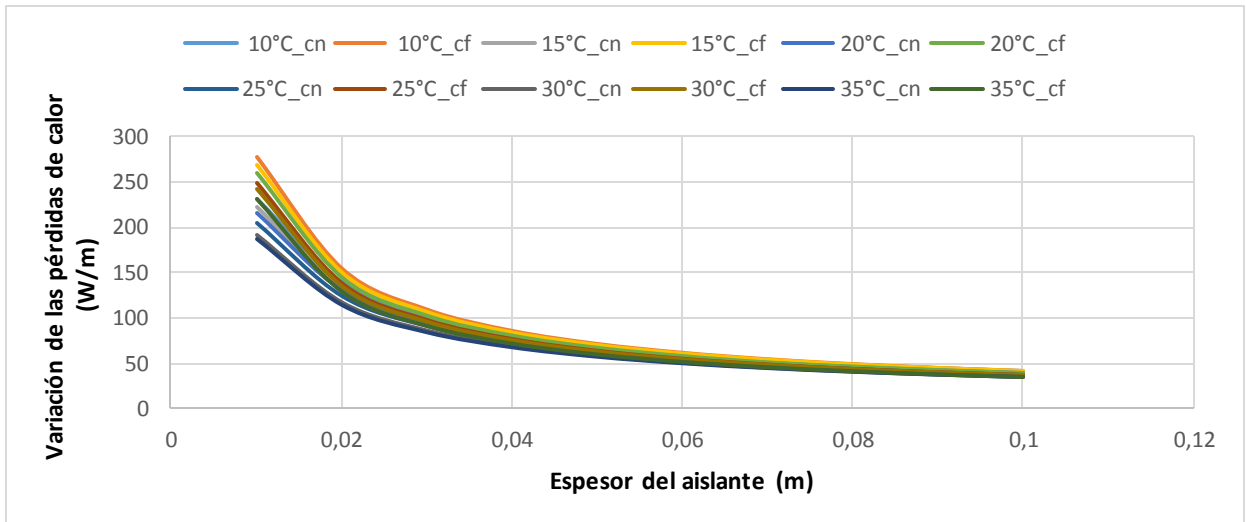
Variación de las pérdidas de calor (W/m) sobre el espesor del aislante (m) en tuberías Horizontales de 10 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-9.3 Variación de las pérdidas de calor en la tubería Horizontales de 3 in.



Variación de las pérdidas de calor (W/m) sobre el espesor del aislante (m) en tuberías Horizontales de 3 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

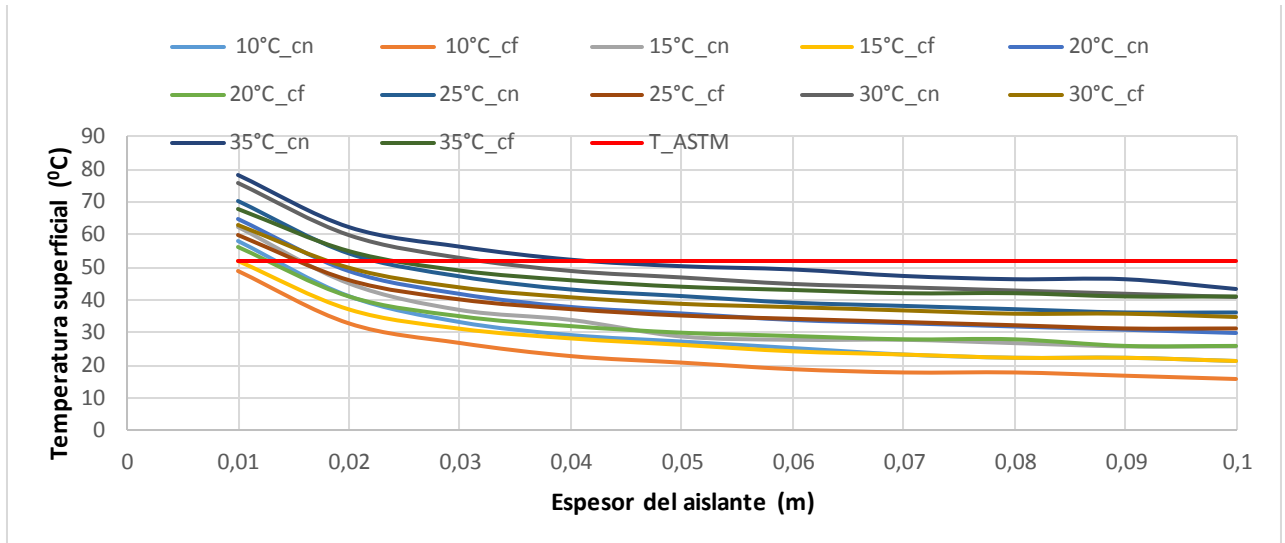
A-9.4 Variación de las pérdidas de calor en la tubería Horizontales de 8 in.



Variación de las pérdidas de calor (W/m) sobre el espesor del aislante (m) en tuberías Horizontales de 8 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

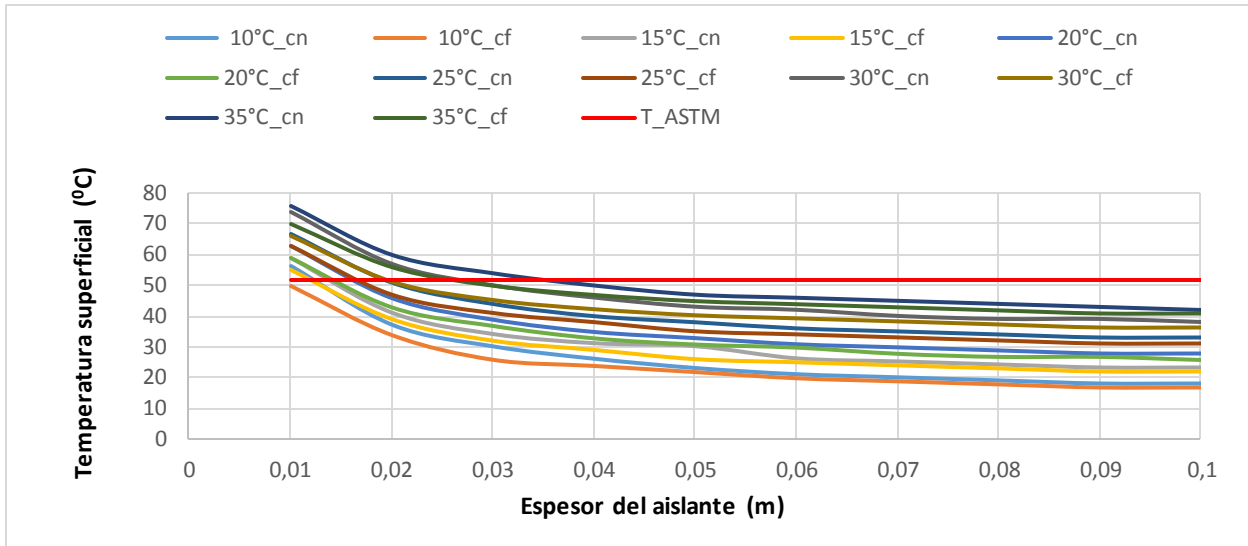
Anexo 10:

A-10.1 Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en 3 in.



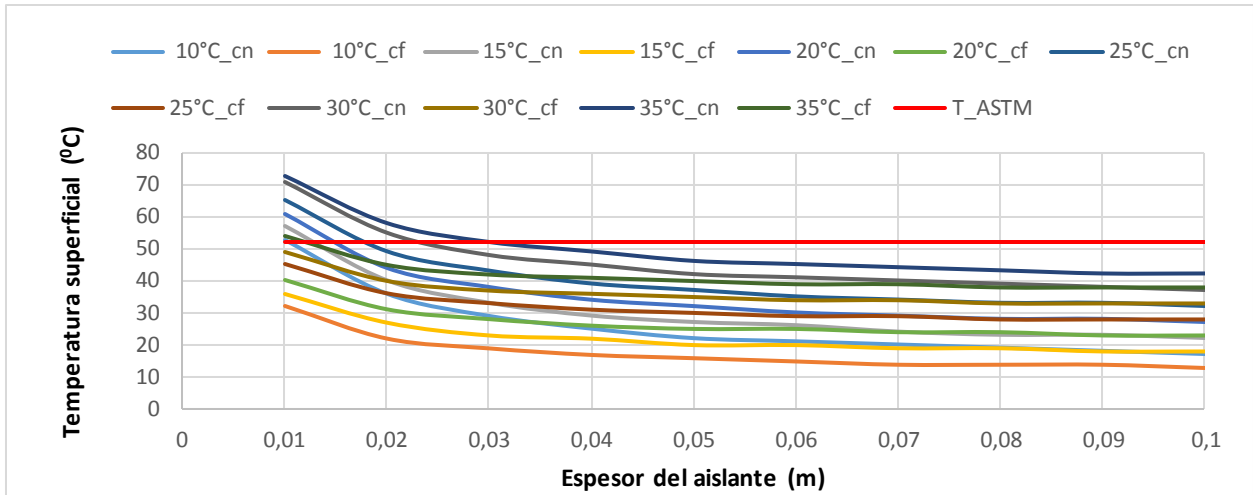
Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia.

A-10.2 Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en 8 in.



Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 8 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia.

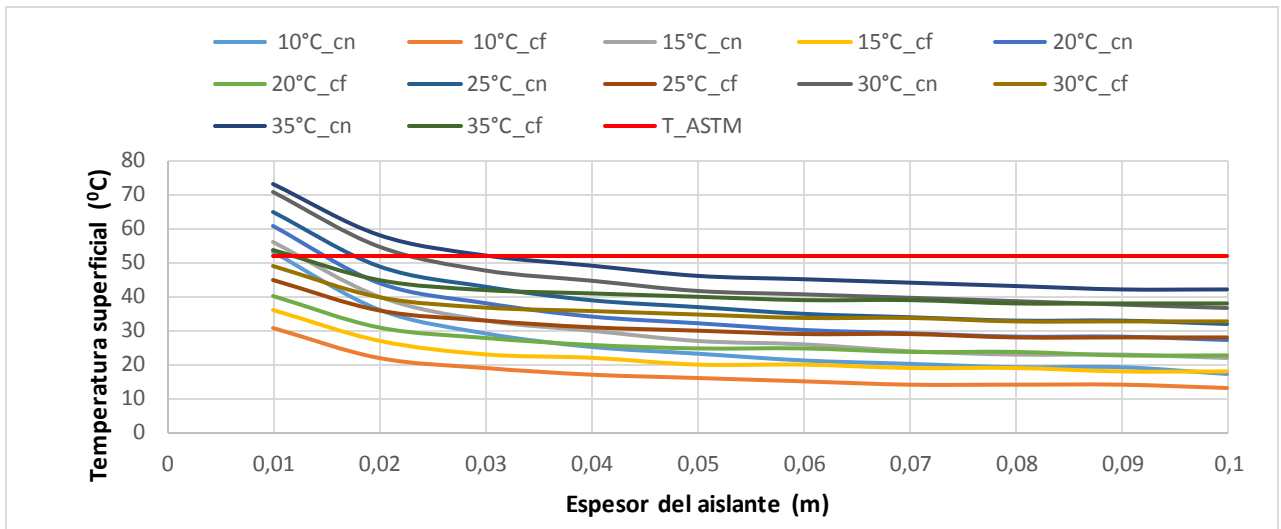
A-10.3 Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en 10 in.



Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 10 in Convección Libre y Convección forzada.

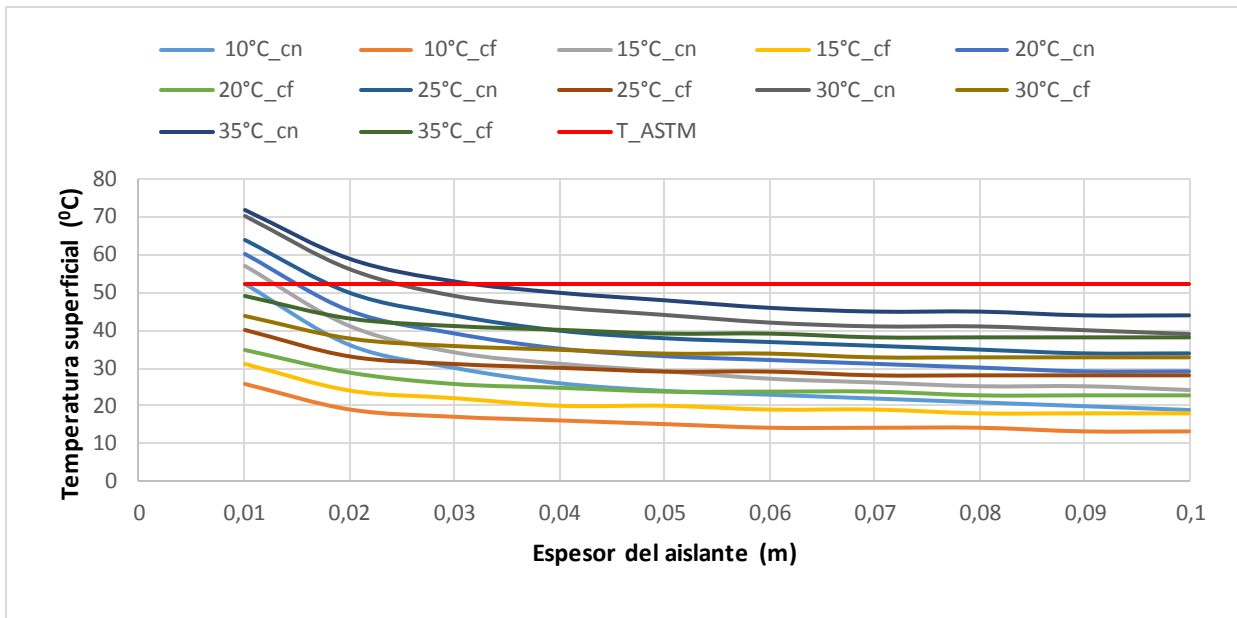
Fuente: elaboración propia.

A-10.4 Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en 3 in.



Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 3 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

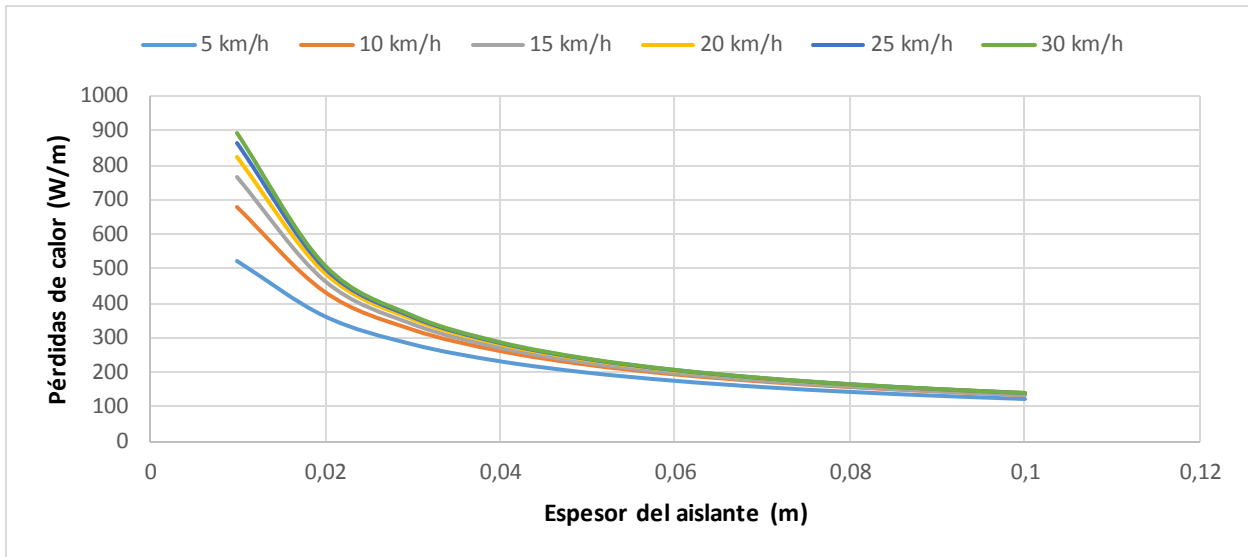
A-10.5 Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en 8 in.



Influencia de la temperatura ambiente sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 8 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia.

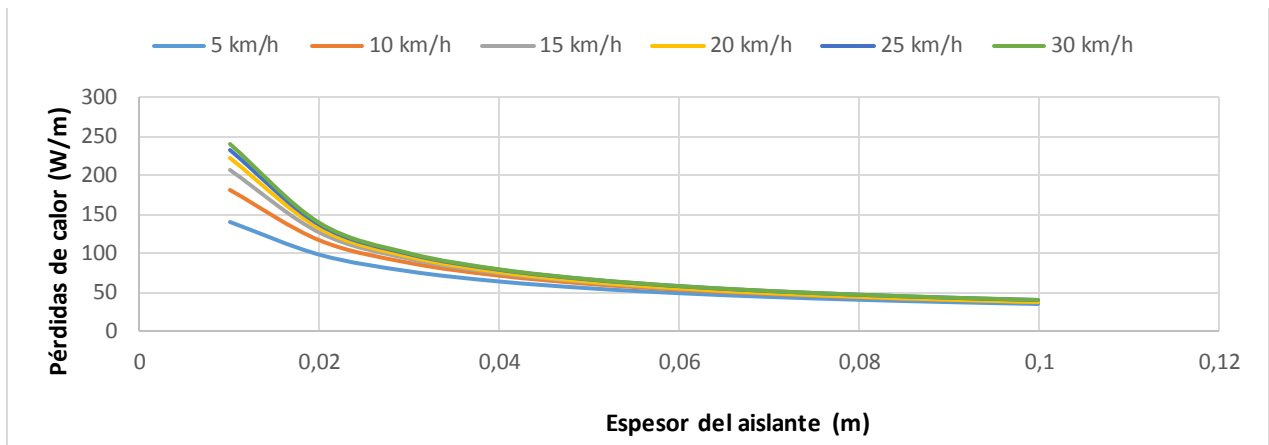
Anexo 11:

A-11.1 Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in.



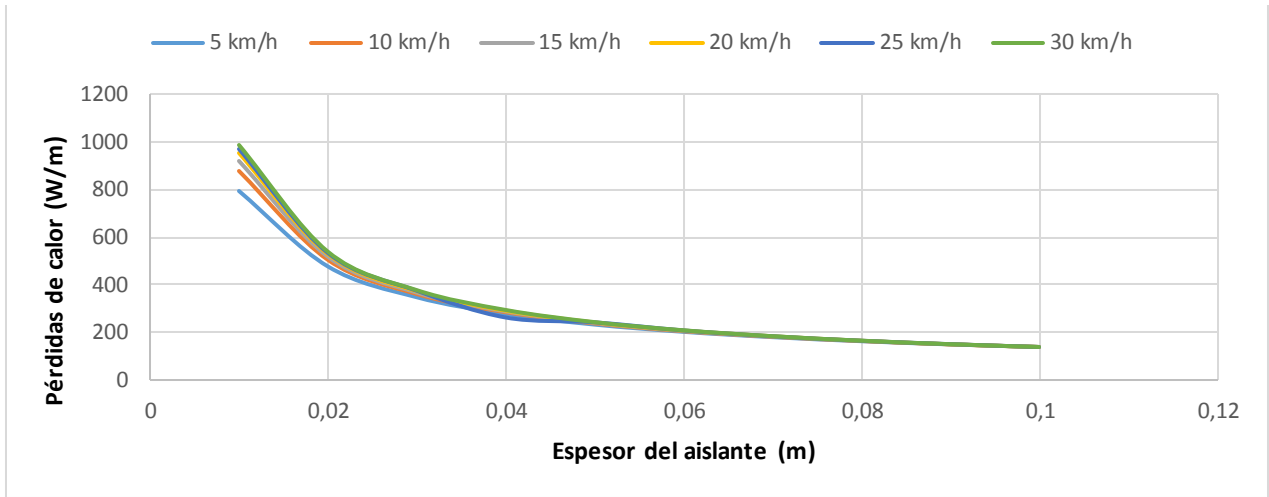
Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías de 3 in en Convección Forzada, posición Vertical. Fuente: elaboración propia

A-11.2 Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 8 in.



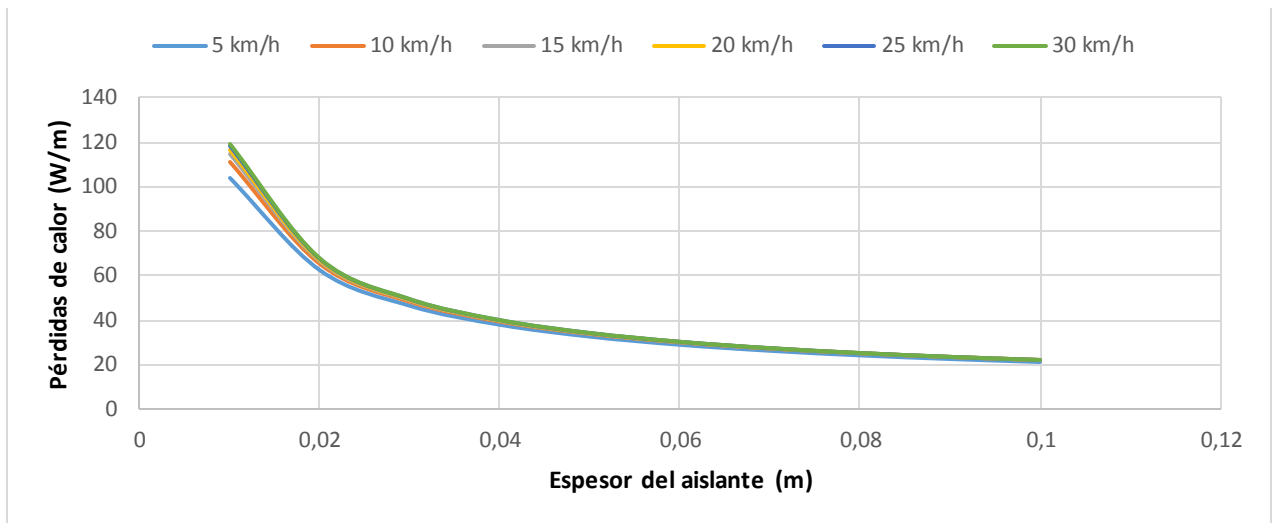
Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías de 8 in en Convección Forzada, posición Vertical. Fuente: elaboración propia

A-11.3 Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 10 in.



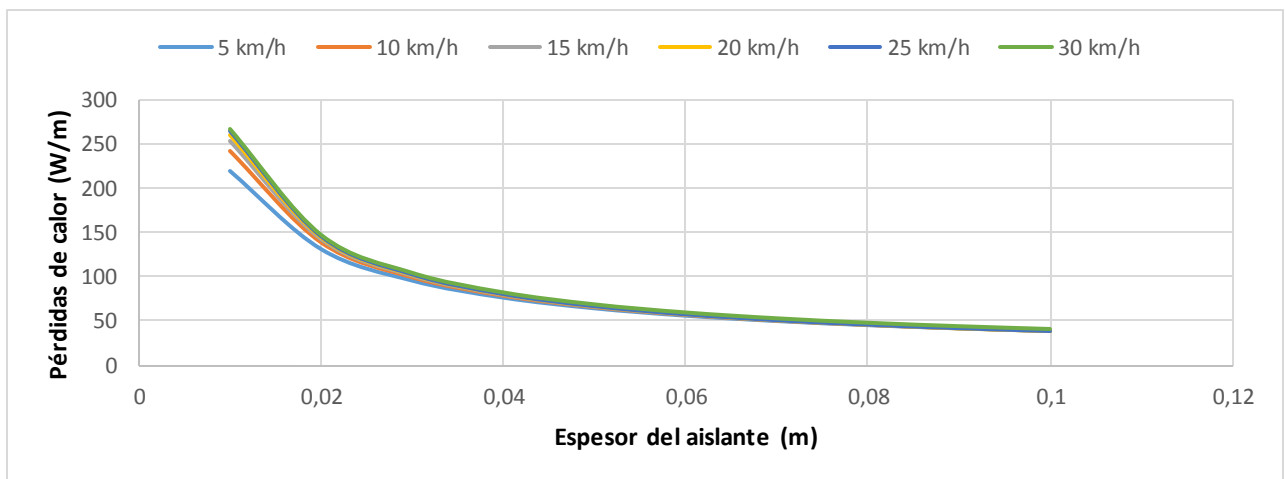
Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías de 10 in en Convección Forzada, posición Horizontal. Fuente: elaboración propia.

A-11.4 Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 3 in.



Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías de 3 in en Convección Forzada, posición Horizontal. Fuente: elaboración propia

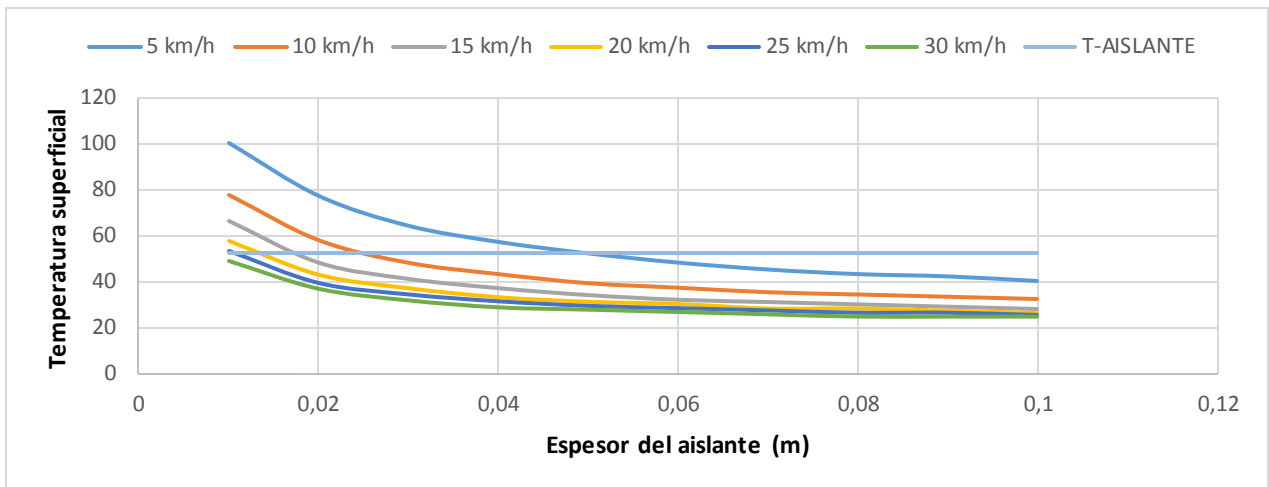
A-11.5 Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 8 in.



Influencia de la velocidad del viento sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías de 8 in en Convección Forzada, posición Horizontal. Fuente: elaboración propia

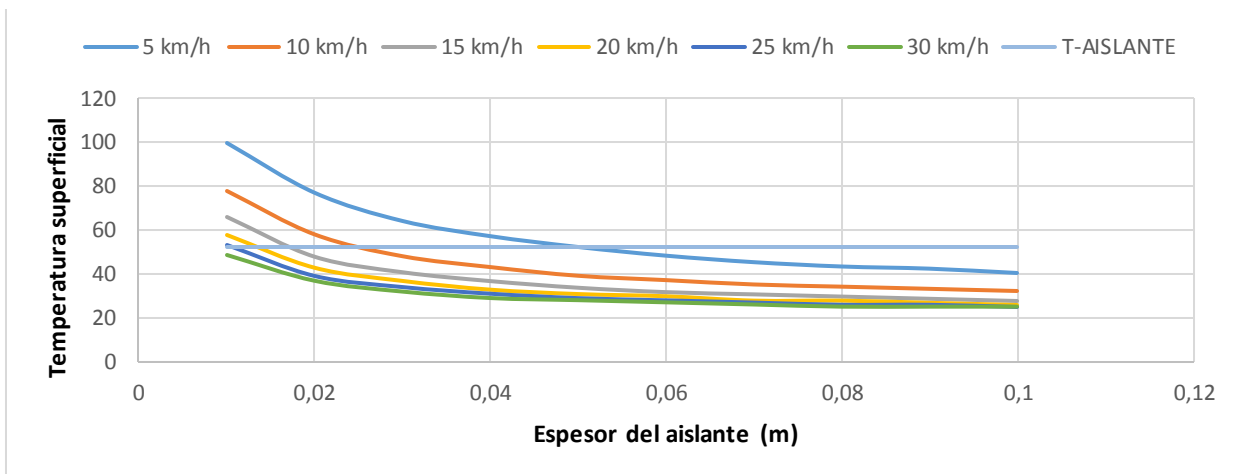
Anexo 12:

A-12.1 Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in.



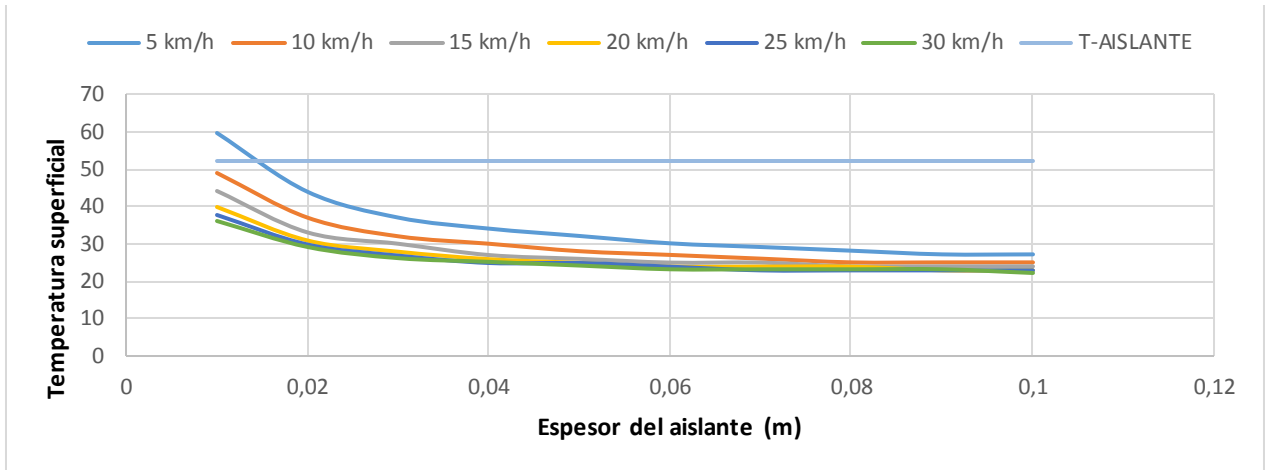
Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías verticales de 3 in en Convección Forzada, posición Vertical. Fuente: elaboración propia

A-11.2 Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 8 in.



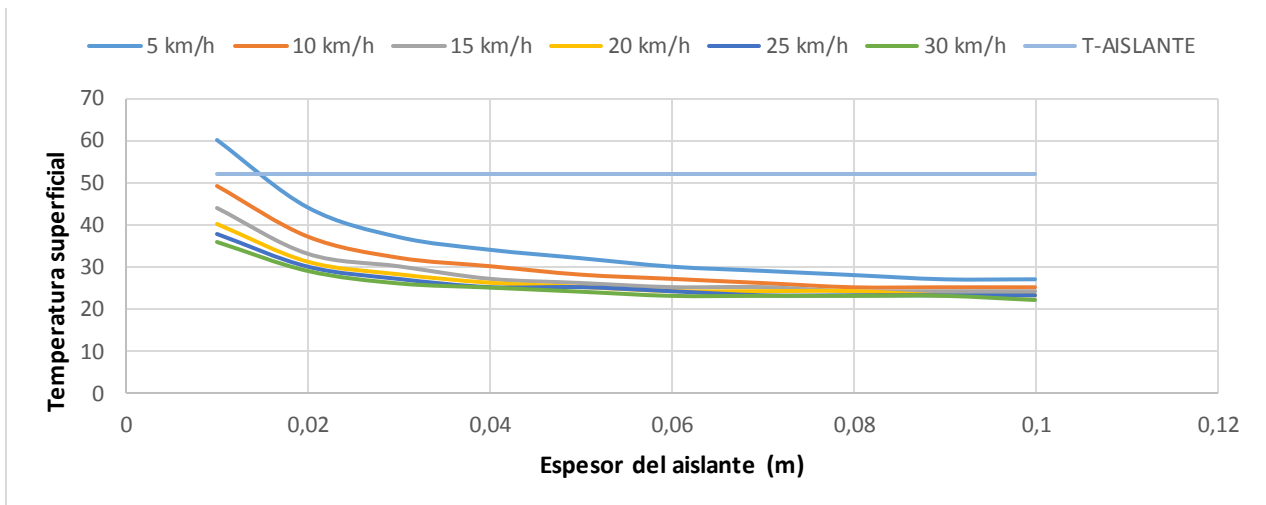
Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías verticales de 8 in en Convección Forzada, posición Vertical. Fuente: elaboración propia.

A-12.3 Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 10 in.



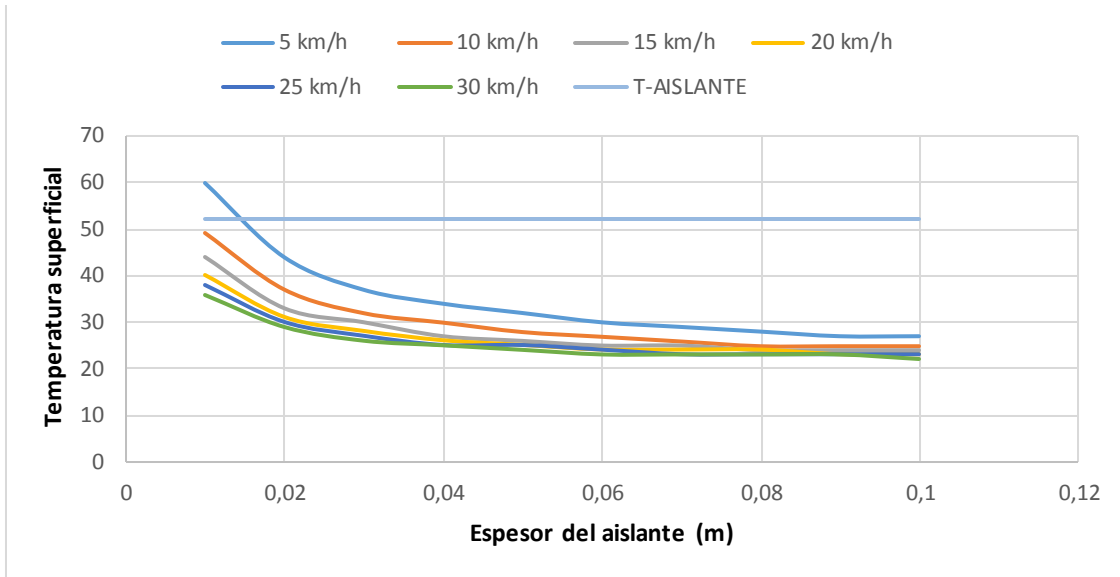
Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías verticales de 10 in en Convección Forzada, posición Horizontal. Fuente: elaboración propia

A-12.4 Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 3 in.



Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías verticales de 3 in en Convección Forzada, posición Horizontal. Fuente: elaboración propia

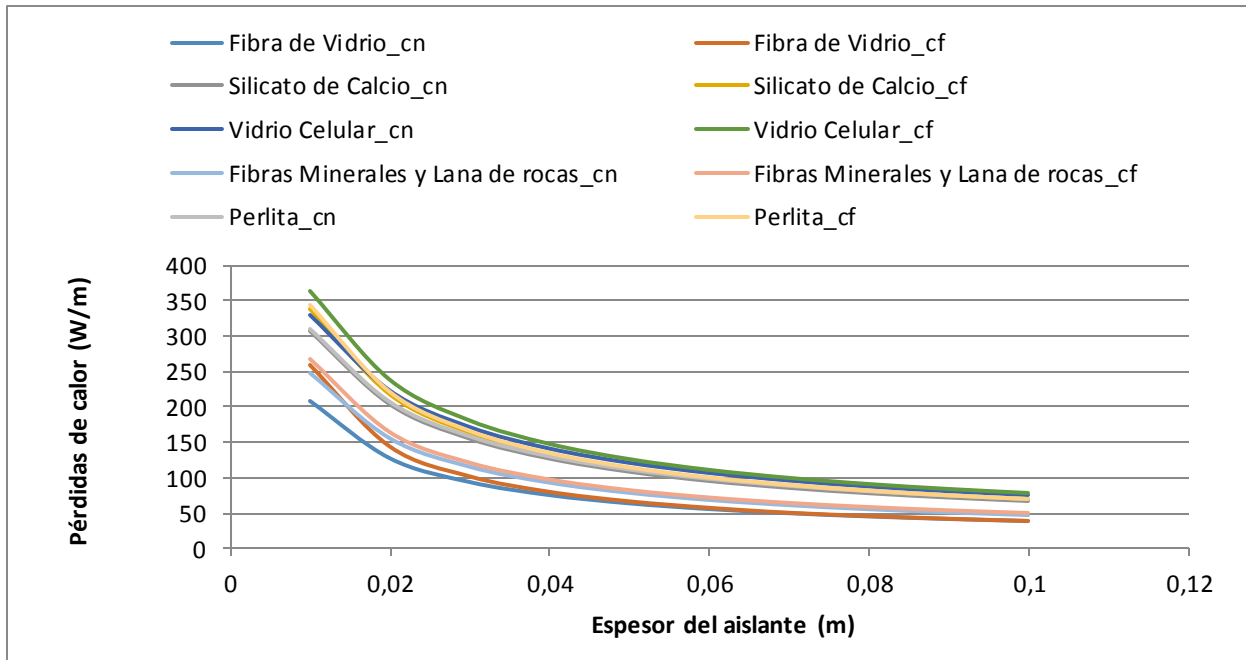
A-12.5 Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 8 in.



Influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías verticales de 8 in en Convección Forzada, posición Horizontal. Fuente: elaboración propia

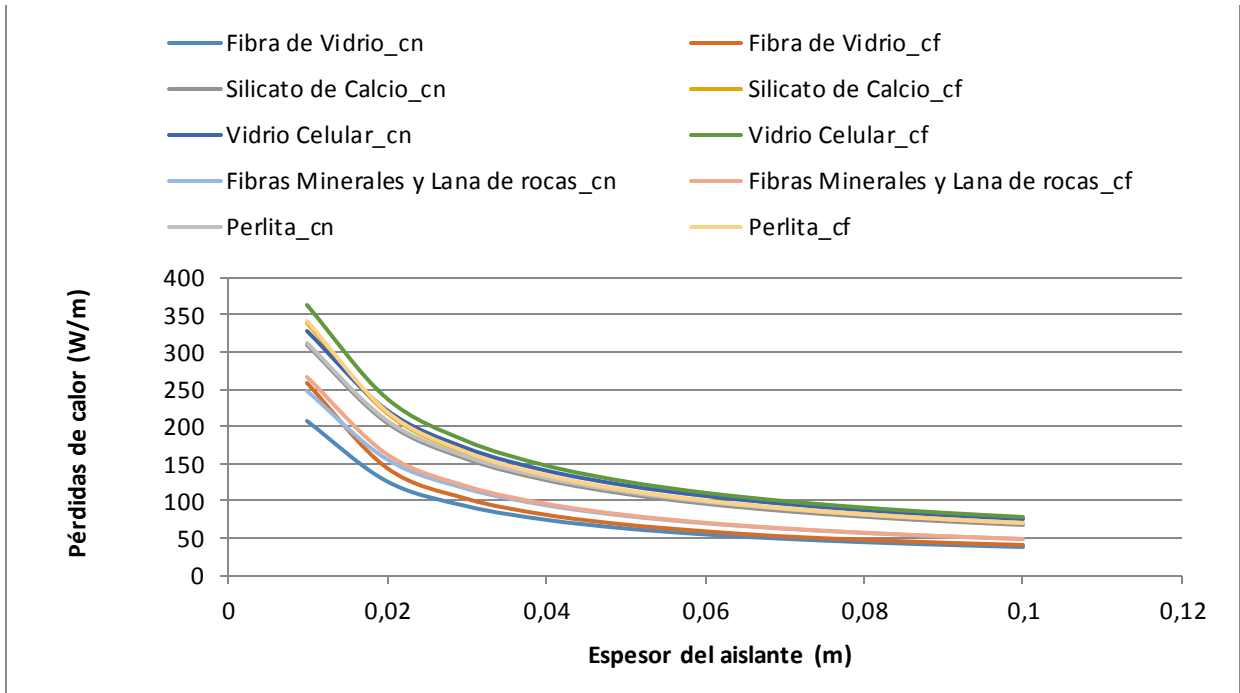
Anexo 13:

A-13.1 Influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in.



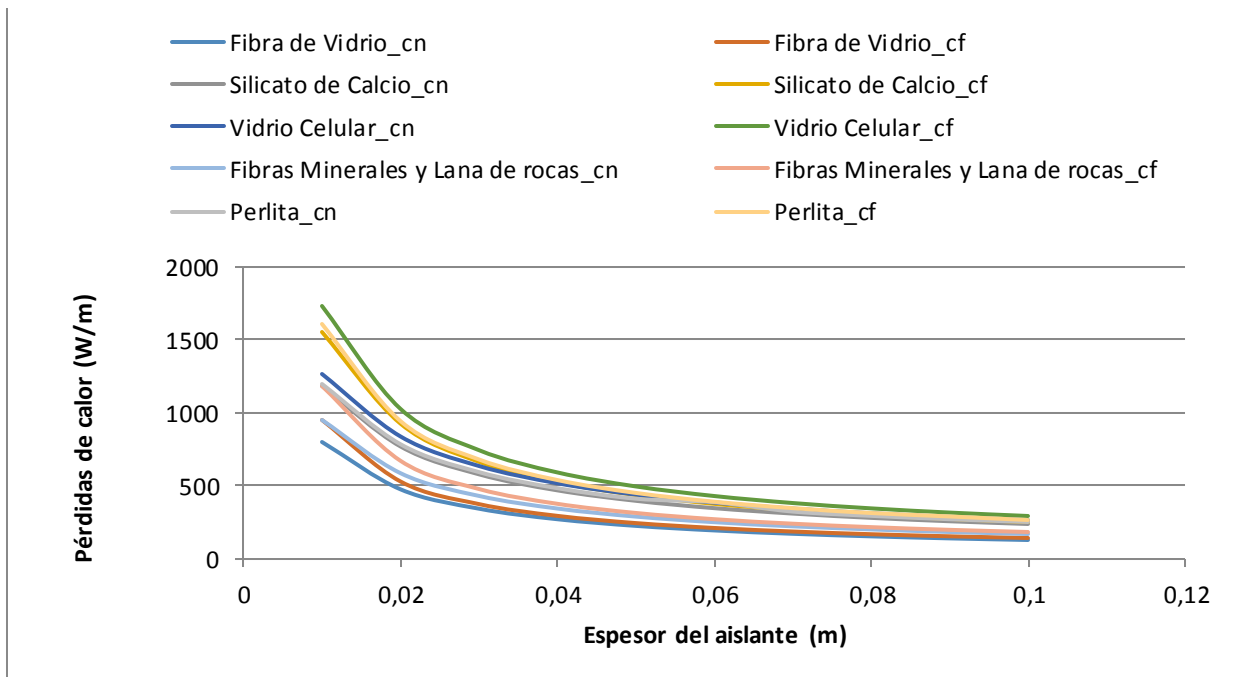
Tipo de aislante sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías Verticales de 3 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.2 Influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 8 in.



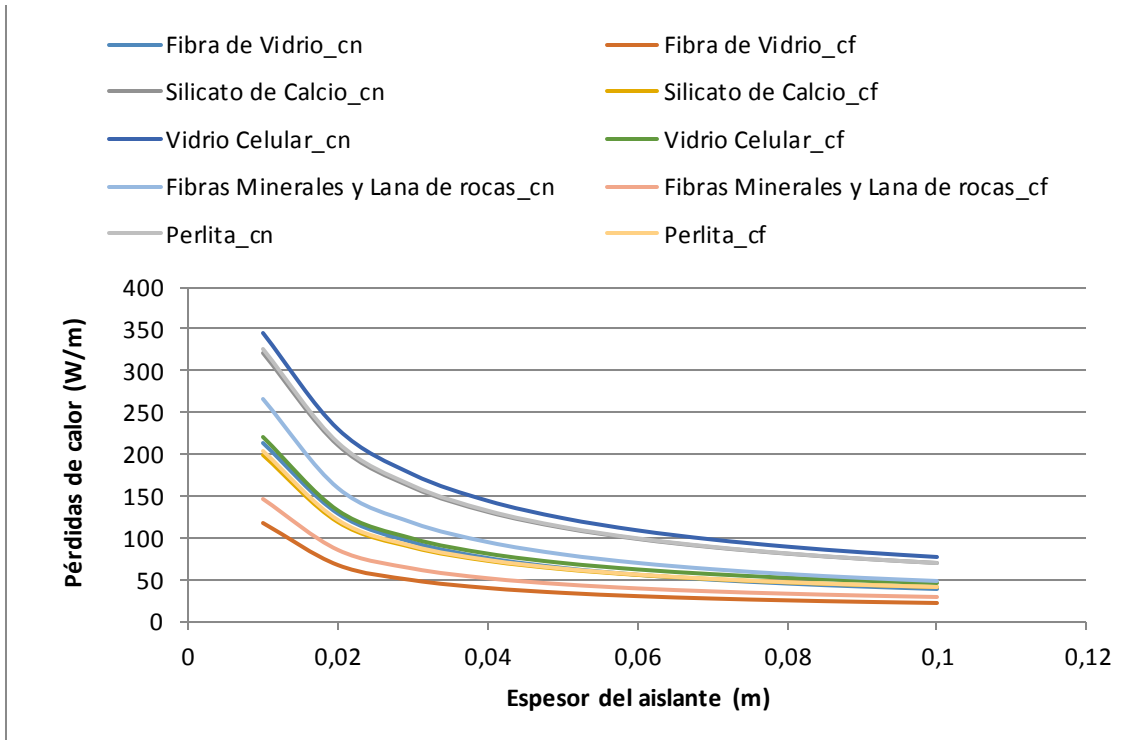
Tipo de aislante sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías Verticales de 8 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.3 Influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 10 in.



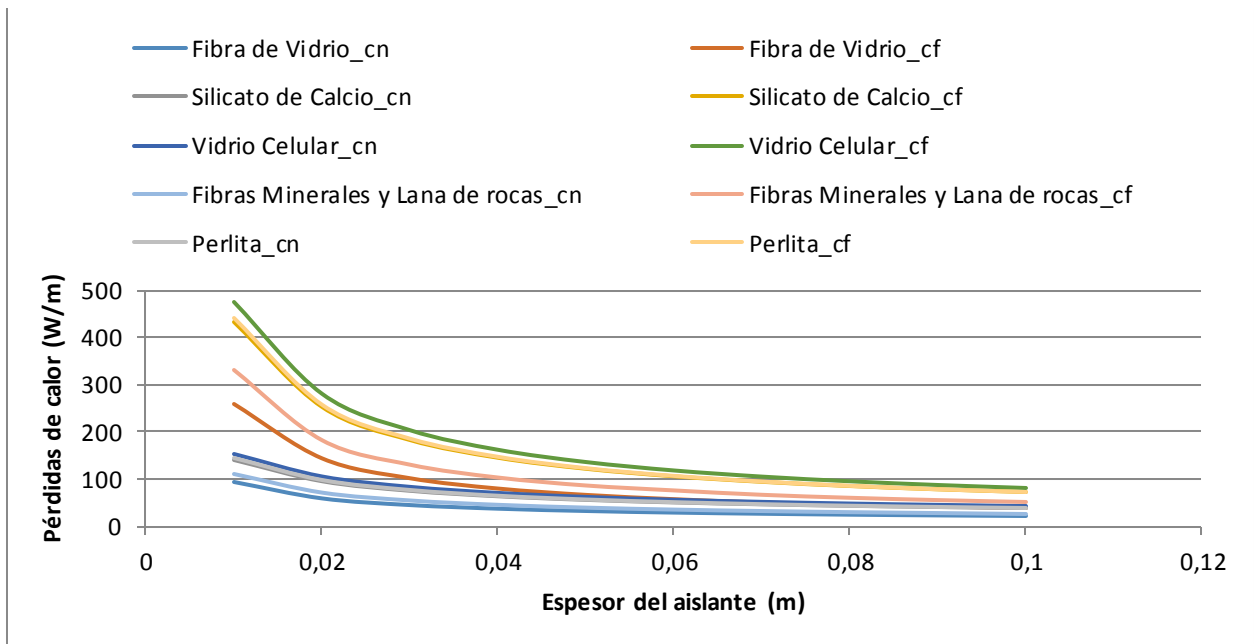
Tipo de aislante sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías Horizontales de 10 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.4 Influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 3 in.



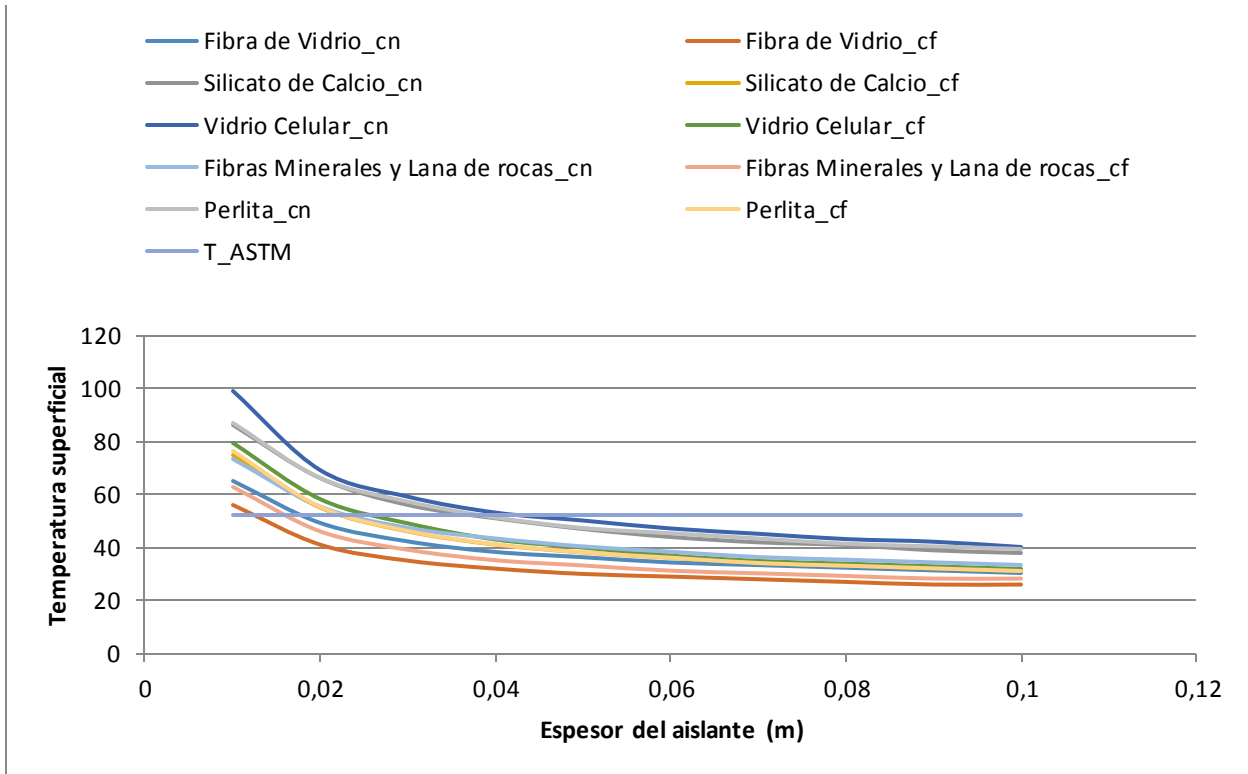
Tipo de aislante sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías Horizontales de 3 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.5 Influencia del tipo de aislante sobre las pérdidas de calor y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 8 in.



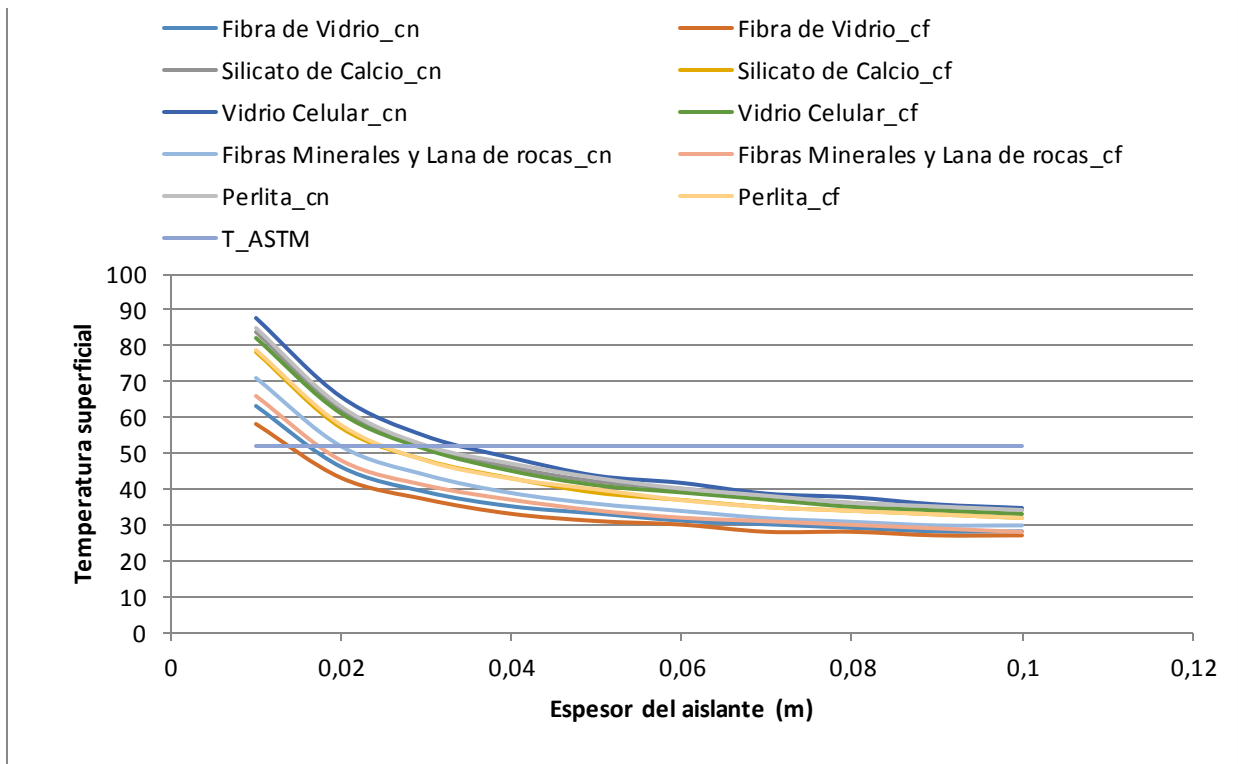
Tipo de aislante sobre las pérdidas de calor (W/m) y el espesor del aislante (m) en tuberías Horizontales de 8 in en Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia.

A-13.6 Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in.



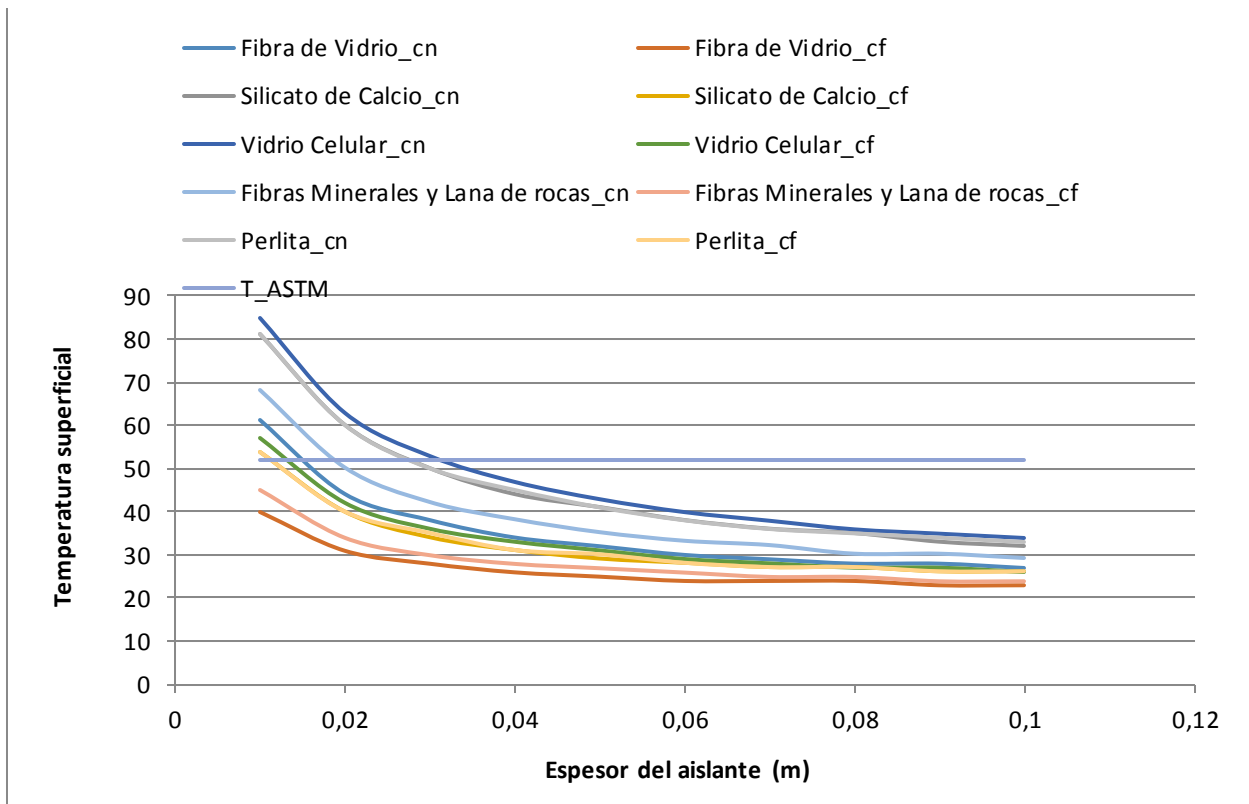
Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 3 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.7 Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 8 in.



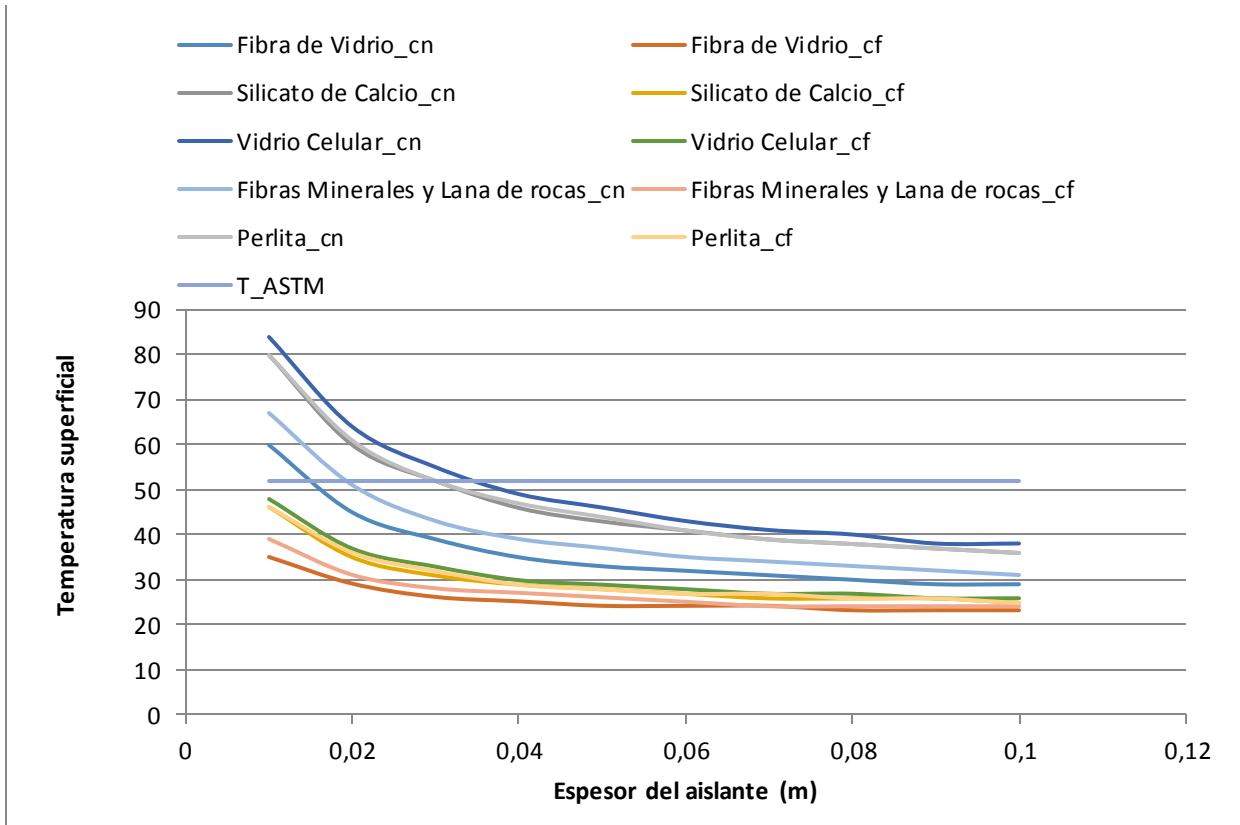
Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Verticales de 8 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.8 Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 10 in.



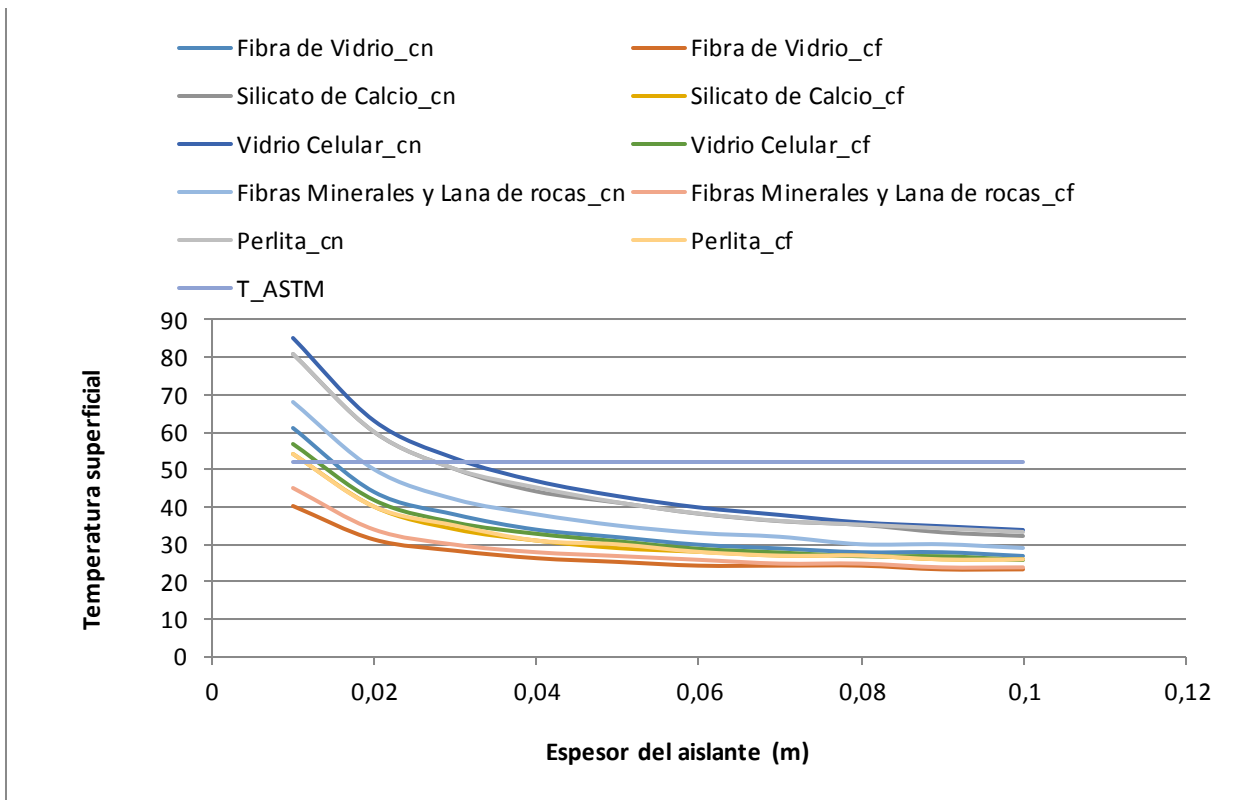
Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 10 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.9 Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 3 in.



Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 3 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

A-13.10 Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 8 in.



Influencia del tipo de aislante sobre la temperatura superficial y el espesor del aislante en tuberías Horizontales de 8 in Convección Libre y Convección forzada. Fuente: elaboración propia

Anexo 13: Costos de los aislantes utilizados en el caso de estudio

Tipo de aislante	Costo unitario	Suministrador	País
Fibra de Vidrio	\$3.80/m	Juncos	China
Silicato de Calcio	\$5.00/m	Chaochen	China
Vidrio Celular	\$150.00/m ³	Hitex	China
Fibras Minerales y Lana de Roca	\$88.00/m ³	Huali	China
Pelita	\$115.00/m ³	Huali	China