

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA ACADEMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN ENERGIA



TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGIA

“ESTUDIO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TERMICO INDUSTRIAL PARA DETERMINAR Y ANALIZAR SU RENDIMIENTO ENERGÉTICO EN EL TRANSPORTE DE NaSH Y SODA CAUSTICA EN UNA EMPRESA MINERA”

TESISTAS:

BACH. MARIELA NATALI CABRERA ABANTO

BACH. LUIS HUBER BACA ESPINOZA

ASESOR:

M.Sc. HUGO CALDERÓN TORRES

NVO. CHIMBOTE – PERU

2016

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

Doy conformidad del presente estudio, desarrollado en cumplimiento del objetivo propuesto y presento conforme al Reglamento General para Obtener el Título Profesional en la UNS (RES N°471 - 2002 - CU - R UNS), Intitulado:

“ESTUDIO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TERMICO INDUSTRIAL PARA DETERMINAR Y ANALIZAR SU RENDIMIENTO ENERGÉTICO EN EL TRANSPORTE DE NaSH Y SODA CAUSTICA EN UNA EMPRESA MINERA”

Informe del trabajo de ingeniería para optar el título de ingeniero en energía.

Presentado por:

BACH. MARIELA NATALI CABRERA ABANTO

BACH. LUIS BACA

Ms. Hugo Calderón torres

Asesor

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que nos brinda muchas bendiciones, por llenarnos de dichas y por fortalecernos para ser personas de bien.

A nuestros seres queridos, por su apoyo incondicional, por su amor, cariño y comprensión.

Y a todos aquellas, personas que han colaborado con nuestra formación personal, profesional y humanística.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal realizar un estudio del Sistema de Aislamiento Térmico Industrial para determinar y analizar su rendimiento energético en el transporte de Hidrosulfuro de hidrogeno NaSH e hidróxido de sodio NaOH en una empresa minera, la cual se aplica en la Empresa Minera Chinalco Perú S.A.

La investigación es aplicada, en donde se toma en cuenta los fenómenos de transferencia de calor para determinar las pérdidas de calor, para determinar las características y parámetros principales en la instalación de un sistema de aislamiento térmico. Cabe mencionar que los cálculos realizados, están de acuerdo a las condiciones de operación que requiere la empresa para el proceso de tratamiento de sus aguas, e por ello que se hace una comparación entre estos y los datos de operación después de su instalación.

Entre los principales resultados destaca la eficiencia del aislamiento, la cual se utiliza lana de roca con un espesor de 50 mm (que permite reducir la pérdida de calor en lo máximo posible, proteger el medio ambiente y prevenir accidentes y lesiones en los trabajadores) tanto para NaOH y NaSH cuyas cantidades son de 86.8% y 87.44% respectivamente, permitiendo un ahorro por pérdidas de energía que ascienden un total de U\$11 910.61 al año, recuperándose la inversión en 16 meses.

Esto es muy importante, porque si bien es cierto estos fluidos no trabajan a altas temperaturas, pero si a bajas (0 y -10°C) debe considerarse el riesgo del transporte, las longitudes de la tubería y las condiciones del clima a las cuales están expuestas en el proceso de estos fluidos.

ABSTRACT

This research has as main objective to conduct a study of Industrial Thermal Insulation System to determine and analyze their energy efficiency in the transport of hydrosulfide NaSH hydrogen and sodium hydroxide NaOH in a mining company, which applies in Empresa Minera Chinalco Peru S.A.

Applicative research is where one takes into account the heat transfer phenomena to determine the heat loss to determine the main characteristics and parameters in the installation of a thermal insulation system. It is noteworthy that the calculations are based on operating conditions requiring the company to the treatment process waters, and spor why a comparison between these data and operation after installation is done.

The main results show the efficiency of the insulation, which is used rockwool with a thickness of 50 mm (which reduces heat loss as much as possible, protect the environment and prevent accidents and injury to workers) both for NaOH and NaSH whose amounts are 86.8% and 87.44% respectively, allowing energy savings amounting lost a total of US\$ 11 910.61 a year, recovering investment in 16 months.

This is extremely important, because although these fluids do not work at high temperatures (30 – 40 °C), should be considered the risk of transport, the lengths of pipe and weather conditions to which they are exposed in the process of these fluids.

INDICE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCION 1

CAPITULO I: DENOMINACION DEL PROYECTO

1.1.	Denominación del Proyecto	3
1.2.	Enunciado del Problema	3
1.3.	Hipótesis	3
1.4.	Importancia y Justificación	3
1.5.	Objetivos del Proyecto	4
1.6.	Alcances	5
1.7.	Descripción de la empresa y el proyecto para el estudio	5

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1.	Aislamiento térmico	15
2.2.	El aislamiento en la industria	16
2.3.	Tipos de aislantes térmicos	18
2.4.	Transmisión de Calor	28
2.5.	Espesor óptimo económico de aislamiento	49
2.6.	Aislamiento térmico de tuberías	54
2.7.	Mantenimiento en sistemas de aislamiento térmico	58

CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Materiales	61
3.2.	Métodos	63
3.3.	Líneas de trabajo para la instalación del sistema de aislamiento	65
3.4.	Registro de parámetros y características para el estudio	68

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Cálculos para el aislamiento térmico conductora de NaOH	70
4.2.	Cálculos para el aislamiento térmico conductora de NaSH	85
4.3.	Resultados obtenidos	89
4.4.	Datos de operación del aislamiento térmico	91

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones	97
5.2.	Recomendaciones	98

Referencias Bibliográficas

Anexos

INTRODUCCIÓN

En los sectores productivos, los procesos requieren operar con temperaturas muy frías: $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (refrigeración, criogenia) o muy calientes: $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (reactores, turbinas, calderas). Estas temperaturas se obtienen en sistemas donde tienen lugar reacciones químicas, por lo que es de importante conservarlas y mantenerlas estables; de allí la necesidad de implementar sistemas de aislamiento térmico, que se colocan sobre equipos y tuberías para disminuir las pérdidas de calor hacia el exterior de los mismos. La incorporación de aislamiento en las instalaciones térmicas representa una de las acciones más eficaces para la eficiencia energética de sistemas térmicos, equipos y sistemas de tuberías que conducen un fluido a una determinada temperatura. Un correcto aislamiento térmico mejora el rendimiento de la instalación, dado que los equipos trabajan con fluidos a temperaturas próximas a los valores de diseño, lo que conlleva un ahorro en el consumo de energía y en algunos casos disminuye el tamaño de los equipos.

Para una empresa minera el transporte de fluidos de trabajo, como NaSH y la Soda Caustica, se debe realizar con el mayor rendimiento posible, si bien es cierto no se trabajan a altas temperaturas, pero si a bajas temperaturas (0 y $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) se debe evitar pérdidas de energía por sistema de aislamiento.

Es por ello que el presente estudio, muestra la importancia de regular las pérdidas de energía, tanto por disipación al ambiente en sistemas que operen a alta temperatura o que sean mayores a la temperatura ambiente mediante el uso adecuado de aislamiento térmico, en instalaciones industriales de una empresa minera, siendo evaluado en la Empresa Minera Chinalco Perú S.A.

CAPITULO I

DENOMINACION DEL PROYECTO

1.1. Denominación del Proyecto

“Estudio del Sistema de Aislamiento Térmico Industrial para determinar y analizar su Rendimiento Energético en el transporte de NaSH y Soda Caustica en una empresa minera”

1.2. Enunciado del Problema

¿Qué parámetros de diseño y operación se deben tener en cuenta para determinar y mejorar el rendimiento energético en un sistema de aislamiento térmico industrial en el transporte de NaSH y soda caustica?

1.3. Hipótesis

Para la evaluación del sistema de aislamiento térmico industrial para el transporte de NaSH y soda caustica en una empresa minera los parámetros que cumplen con los requerimientos necesarios para su operación y funcionamiento son el calor perdido, la caída de temperatura, el espesor del aislante y la eficiencia del aislamiento, utilizando como material lana de roca mineral con un espesor de 50mm; presentando un rendimiento energético del 85%.

1.4. Importancia y Justificación

En los sistemas de aislamiento térmico se utilizan materiales o combinaciones de materiales que tienen un amplio uso en el sector industrial y en el sector de la construcción. El aislamiento cumple con varias funciones entre las cuales, la principal es la de reducir el flujo de calor en una sección, de este modo se ahorra combustible y dinero. Aunado a estos ahorros, el aislamiento también contribuye a la

preservación del medio ambiente al reducir la cantidad de combustible consumido para proporcionar energía, disminuyendo así la contaminación del medio ambiente por la quema del mismo. Asimismo, permite la protección de equipos así como del personal que labora y/o circula en las cercanías de éstos. Debido a la importancia de los sistemas con aislamiento térmico, es de suma importancia plantear una base de conocimientos que contenga toda la información necesaria para aplicar las especificaciones en el diseño, selección e instalación de un sistema de aislamiento y determinar el rendimiento de transportar un fluido de trabajo.

1.5. Objetivos del Proyecto

1.5.1. Objetivos General:

- ✓ Realizar un estudio del Sistema de Aislamiento Térmico Industrial para determinar y analizar su rendimiento energético en el transporte de NaSH y soda caustica en una empresa minera.

1.5.2. Objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar el sistema de conducción del proyecto, teniendo en cuenta las características técnicas de las tuberías, así como las propiedades del fluido.
- ✓ Seleccionar el material aislante adecuado bajo los requerimientos de funcionamiento y características de la zona de trabajo.
- ✓ Dimensionar el espesor del aislante de acuerdo a las características técnicas y ambientales.
- ✓ Determinar el rendimiento energético del sistema de aislamiento.
- ✓ Realizar un estudio económico del dimensionado realizado, considerando los parámetros técnicos y económicos.

1.6. Alcances del Proyecto

Para este estudio, es necesario hacer referencia los fundamentos teóricos en transferencia de calor, elaborar una secuencia adecuada para el cálculo del espesor del aislante recomendado en función del tipo de material, así como la elaboración de una guía con las especificaciones de distintos materiales aislantes más comúnmente disponibles en el mercado y el procedimiento para su manejo e instalación en líneas y equipos.

1.7. Descripción de la Empresa y el proyecto para el estudio

El proyecto general pertenece a la unidad Minera Toromocho y está ubicado en los Andes peruanos a unos 140km al noreste de Lima, a una altura que varía de 4500 a 5000 metros sobre el nivel del mar. Se puede acceder al sitio por la Carretera Central, mediante una calle pública pavimentada que va desde Lima a La Oroya, que se encuentra a unos 30km al este del sitio. El sitio es accesible por vía férrea que va desde la Urna de La Oroya.

El desarrollo y ejecución del proyecto es presentado por Minera Chinalco Perú S.A. – Jacobs y que posee la capacidad para realizar los trabajos que se menciona en el Proyecto N° CC 26 *“Tailings Pump Station and Pipeline”* que incluye el planeamiento, ejecución y supervisión de los trabajos, suministro de mano de obra especializada, mano de obra no calificada, equipos de izaje, equipos menores de montaje, materiales consumibles y suministros solicitados.

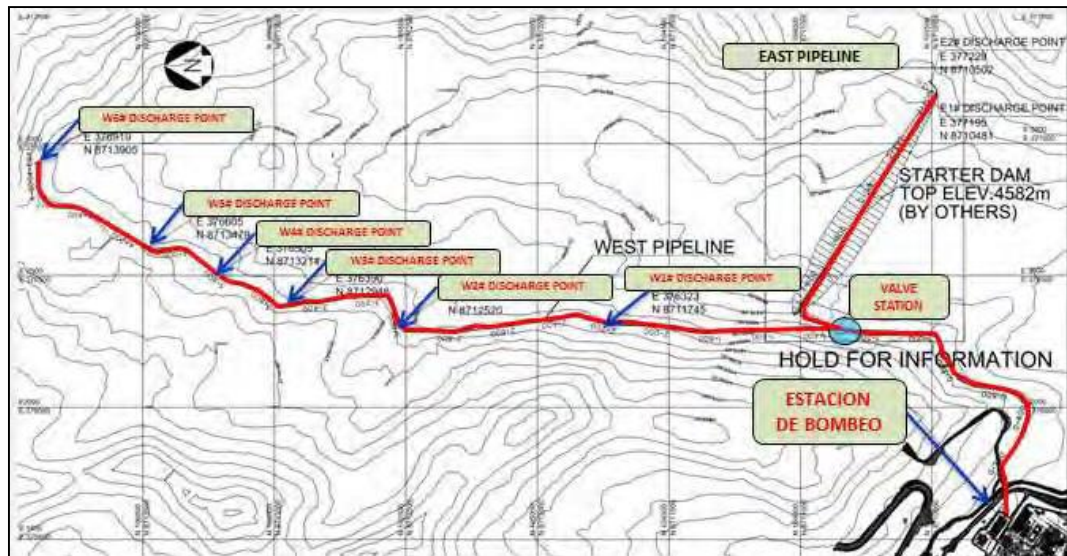


Figura 1. Esquema general del Recorrido de Tubería en el proyecto

Además de los trabajos a desarrollar, parte del segundo frente se desarrolla el PROYECTO CC-26 AISLAMIENTO TERMICO, ejecutado por KAEFER KOSTEC, que es una organización perteneciente al grupo KAEFER, dedicada a dar servicios de suministros, Instalación y Asesoría en la especialidad de Aislamientos Térmicos, Aislamiento Acústicos, Andamios, Protección de Superficies y *Heat Tracing* a empresas nacionales e internacionales, el cual será aplicable a todos los trabajos comprendidos de Aislación Térmica para Tuberías y Equipos correspondientes al Proyecto N° CC 26 “*Tailings Pump Station and Pipeline*”, que deben ser cumplidas por el personal de la empresa KAEFER KOSTEC SAC que preste servicios en el Proyecto.



Figura 2. Trabajos de instalación de tuberías

En las industrias se toma en cuenta, dentro de los procesos, los recursos energéticos de mayor poder calorífico en su operación y transporte. Sin embargo no es muy conocida la preocupación por sustancias que operan a temperaturas moderadas.

Es por ello que este estudio y considerando la empresa minera en mención se tomará en cuenta las siguientes sustancias:

a) HIDROXIDO DE SODIO

A temperatura ambiente el Hidróxido de Sodio es un sólido cristalino, blanco, sin olor y que absorbe rápidamente dióxido de carbono y humedad del aire (delicuescente). Es una sustancia muy corrosiva. Cuando se disuelve en agua o cuando se neutraliza con algún ácido

libera gran cantidad de calor, el cual puede ser suficiente para hacer que el material combustible en contacto con el hidróxido haga ignición.

Se usa generalmente como solución del 50% en peso o como sólido que se comercializa como pellets, hojuelas, barras y tortas.

- Propiedades químicas:

El NaOH reacciona con metales como Al, Zn y Sn, generando aniones como AlO_2^- , ZnO_2^- y SnO_3^{2-} e hidrógeno. Con los óxidos de estos metales, forma esos mismos aniones y agua.

- Uso en la industria minera:

Se utiliza principalmente para el tratamiento de aguas ácidas que proviene directamente del subsuelo, la cual se caracteriza por tener un pH ácido (entre 3.5 y 4.5), no cumpliendo con los estándares de descarga a ríos y quebradas.



Figura 3. Poza de Retención de Aguas Ácidas

El agua ácida en la planta es recepcionada por un tanque de tratamiento donde se le adiciona soda cáustica (NaOH) con una determinada dosificación la cual permite elevar el pH dentro del rango de 6.5 a 8.5, removiendo así los metales presentes, los cuales precipitan en forma de hidróxidos. El agua ya clarificada es enviada a un tanque de distribución donde se procede a regular el pH de la solución con ácido sulfúrico de baja concentración de tal manera, que al final del proceso se obtienen aguas clarificadas, exentas de metales pesados y con un pH dentro del rango permisible de descarga. Luego, estas aguas serán distribuidas para diferentes usos: la planta de aglomeración, poza de almacenamiento para uso en la planta de procesos, garzas para mantenimiento de carreteras, lavado de equipos o directamente al medio ambiente.

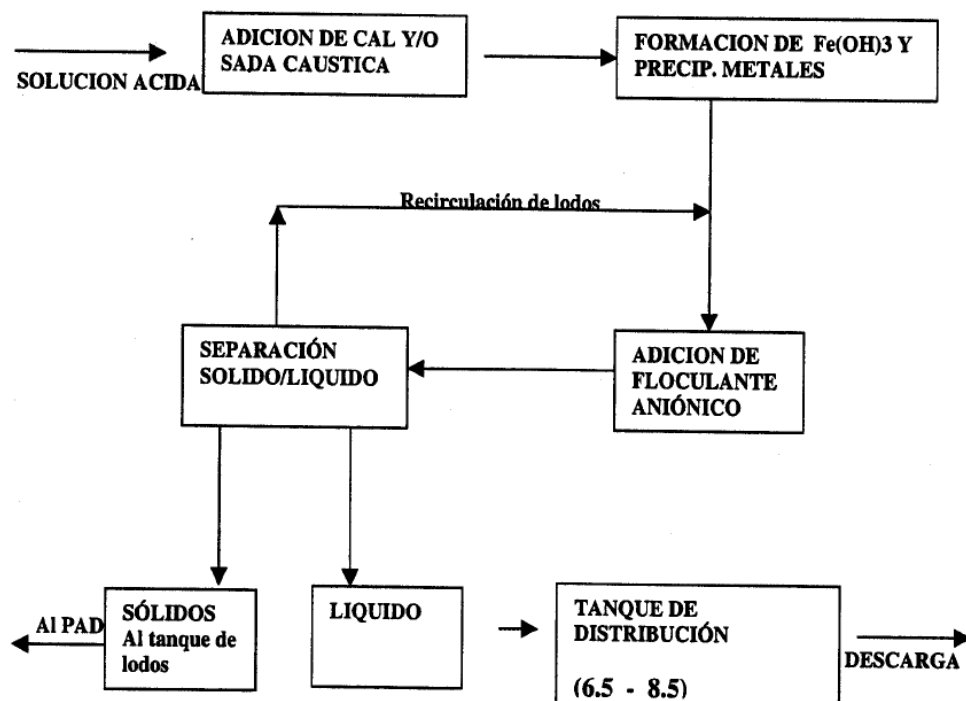


Figura 4. Diagrama del proceso de la planta de tratamiento de aguas ácidas.

b) HIDROSULFURO DE SODIO

Se usa el sulfhidrato de sodio (NaSH) como un agente para activar las especies alteradas en la flotación de sulfuros de cobre. Existen antecedentes técnicos en la industria de que las condiciones, dosis de adición y los puntos de adición óptimos del sulfhidrato de sodio varían según la especie mineralógica, la roca madre, las alteraciones y la mineralización, del mineral a procesar.

Es un producto peligroso para la salud Humana y el ambiente acuático. El contacto con el producto provoca quemaduras dérmicas y oculares. La inhalación puede ser dañina. El incendio puede producir gases venenosos e irritantes. El polvo puede formar una mezcla explosiva con el aire. Manténgase lejos de calor, chispas y llamas.

- Uso en la industria minera

El oro es lixiviado por medio de una solución cianurada y a través de un sistema de recirculación de agua, donde cierto porcentaje es subterráneo. En época de lluvias, el agua del sistema se incrementa y ese exceso debe ser descargado al medio ambiente. Estas aguas deben ser tratadas pues contienen residuos contaminantes propios del proceso tales como cianuro, mercurio y metales que podrían alterar la calidad de las aguas de ríos y quebradas.

Para el tratamiento de dicho excedente se tiene una planta diseñada para regular el pH y eliminar la presencia de cianuro y metales mediante la adición de reactivos en las diferentes etapas que tiene el

tratamiento. La primera etapa se denomina clorinación, donde la solución es atacada con gas cloro, el cual convierte el cianuro en cianatos, que son compuestos no tóxicos. Esta reacción hace que el pH de la solución baje drásticamente, siendo necesaria la neutralización de la solución por lo que se agrega lechada de cal para mantener el pH entre 10 y 10.5. Posteriormente, sabiendo que los metales están disueltos en el agua, para poder separarlos se requiere tenerlos en estado sólido, por lo tanto son precipitados utilizando el hidrosulfuro de sodio (NaSH), el cual reacciona con el mercurio, cobre, hierro, plata y zinc (además de otros metales), formando sulfuros insolubles. Seguidamente, se utiliza el cloruro férrico para formar hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$, que ayuda a la coagulación así como a la precipitación de selenio y arsénico.

Para separar el precipitado del agua, se adiciona un floculante a la solución, cuya función es juntar las partículas sólidas finas suspendidas y formar partículas más grandes para que por su propio peso se dirija hacia abajo, sedimentando.

La sedimentación y la clarificación se realizan en el reactor clarificador, que es un tanque grande con ciertas características para mejorar la separación de la fase sólida formada por los metales precipitados.

Las partículas sólidas se van hacia la parte inferior y en la parte superior queda agua limpia. Así, la concentración de los metales en la solución disminuye hasta cumplir con los límites máximos permisibles de descarga.

La masa formada por las partículas sólidas se denomina "lodo" y es bombeado a un tanque para retornarlo a la pila de lixiviación logrando mantener los metales precipitados dentro del sistema evitando de esta forma problemas al medio ambiente.

La figura 5, muestra el diagrama de flujo anteriormente explicado.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Aislamiento térmico

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.

La fuerza impulsora para el flujo de calor es la diferencia de temperatura y entre más grande sea, mayor será la velocidad de transferencia de calor. Los aislamientos térmicos actúan como barreras que retardan el flujo de calor entre dos medios a diferente temperatura.

El aislamiento térmico en forma de lodo, arcilla, paja, trapos y tiras de madera, se usó por primera vez en el siglo XVIII sobre las máquinas de vapor para impedir que los trabajadores sufrieran quemaduras producidas por las superficies calientes. Como resultado, bajaron las temperaturas del cuarto de calderas y se observó que también se redujo el consumo de combustible.

A su vez, la mejora en la eficiencia de la máquina y el ahorro de energía estimularon la búsqueda de materiales con mejor eficiencia térmica. Uno éstos fue la lana mineral, descubierta por accidente alrededor de 1840. Actualmente el aislamiento se aplica a tuberías, condensados, aceite térmico, fluidos de proceso, secadores de aire, etc.

2.2. El Aislamiento en la Industria

El aislamiento térmico se utiliza en la industria desde la iniciación de la era industrial, aunque el desarrollo se produjo a partir de la segunda década del siglo XX. Las razones para la utilización del aislamiento térmico son, fundamentalmente:

✓ *Conservación de la energía*

Conservar la energía mediante la reducción de la velocidad del flujo de calor es la razón principal de las superficies aisladoras. Se dispone con amplitud de materiales para aislamiento que se comportan de manera satisfactoria en el rango de temperaturas de -200 °C hasta 1500 °C. 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, permitiendo la amortización del material aislante instalado en períodos de tiempo muy bajos, por ejemplo, algunas semanas.

✓ *Protección y comodidad personal*

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. Asimismo, el calor excesivo que emana de las superficies calientes crea un medio desagradable para trabajar, lo cual afecta de manera adversa el rendimiento o la productividad de los trabajadores, en especial en los meses de verano.

✓ *Mantenimiento de la temperatura del proceso*

En la industria química algunos procesos son sensibles a la temperatura y es necesario aislar los tanques en los que se llevan a cabo, así como las tuberías de flujo, con el fin de mantener la misma temperatura en toda su extensión.

✓ *Prevención de la corrosión y la condensación*

El vapor de agua que existe en el aire se condensa sobre las superficies exteriores de los tanques o tubos cuando su temperatura cae por debajo del punto de rocío, a menos de que cuenten con un aislamiento adecuado. El agua líquida sobre las superficies expuestas de los tanques o tubos metálicos fomentará la corrosión, así como el desarrollo de algas.

✓ *Protección contra la congelación*

La exposición prolongada a temperaturas inferiores a la de congelación puede causar que el agua que se encuentra en la tubería o recipientes de almacenamiento se congele, como resultado de la transferencia de calor del agua hacia el ambiente frío, causando que éstos se revienten. El aislamiento adecuado reducirá la pérdida de calor del agua e impedirá la congelación.

✓ *Reducción del ruido y la vibración*

Un beneficio adicional del aislamiento térmico es su capacidad para amortiguar el ruido y las vibraciones. Con una selección apropiada del material aislante se pueden lograr, además, reducciones considerables de nivel de ruido.

2.3. Tipos de Aislantes Térmicos

Los materiales aislante se caracterizan por tener una baja conductividad térmica (conductividad menor a 0,1 W/m·K), debido a que son materiales que contienen cámaras llenas de gas, fase que posee baja conductividad térmica en comparación con la fase líquida o gas de materia y por ende, no favorecen la transferencia de calor por conducción.

Los aislantes térmicos (termoaislantes) pueden ser:

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

2.3.1. Formas físicas más comunes de los tipos de aislamiento industrial

a. De relleno suelto y cemento

Son polvos, gránulos o nódulos con los que se puede revestir -o inyectar mediante soplado-paredes huecas u otros espacios. 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. Algunos tipos de cementos se pueden rociar sobre el lugar en que deben ir. Tanto el cemento como el relleno son especialmente apropiados para superficies irregulares.

b. Flexible y semirrígido

Se pueden obtener materiales con grados variables de compresibilidad y flexibilidad, bloques fibrosos o fieltro, tanto orgánicos como inorgánicos (con aglutinantes o sin ellos), 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. Estas cubiertas incluyen combinaciones de películas metálicas o plástico y papel, malla de alambre o tiras metálicas. Los aisladores se proporcionan en una gran variedad de tamaños y espesores estándares que facilitan su manejo.

c. Rígido

Estos materiales existen en bloques, placas o láminas, pre-conformados 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.



Figura 6. Diferentes presentaciones del aislamiento

d. De reflexión

Se dispone de material de reflexión en láminas y rodillos de construcción de una o varias capas y en formas pre-moldeadas con espacio de aire integrados.

e. 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. También se pueden rociar en el sitio materiales fibrosos mezclados con aglutinantes líquidos. 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.

2.3.2. Propiedades térmicas

La capacidad de un material para retrasar el flujo de calor se expresa mediante su conductividad térmica (para espesores unitarios) o la conductancia (para un espesor específico). Por tanto, los aisladores térmicos se caracterizan por bajos valores de conductividad o conductancia térmica (o un valor elevado de resistividad o resistencia térmica).

2.3.3. Propiedades de los termoaislantes

A continuación se describen las principales propiedades a considerar en la selección de un termoaislante, para que pueda satisfacer los requisitos específicos de un proyecto determinado:

- a. Límites de temperatura. Es importante que los termoaislantes mantengan sus propiedades, aun sometidos a temperaturas extremas.
- b. Conductividad térmica. Dato necesario para calcular la transferencia de calor y con base en ello determinar la calidad o eficiencia del termoaislante.
- c. pH, grado de alcalinidad o acidez; es una propiedad muy importante, ya que el termoaislante no debe provocar corrosión.
- d. Capilaridad. Importante, sobre todo, cuando el termoaislante pudiera hacer contacto con líquidos peligrosos o inflamables.
- e. Combustibilidad. Los termoaislantes no deben contribuir a la propagación del fuego.
- f. Resistencia a la compresión. Es importante cuando el termoaislante pueda verse sometido a compresión o abuso mecánico que pudiera deformarlo.
- g. Densidad. Es importante por su efecto sobre las propiedades del termoaislante, sobre todo la conductividad térmica.
- h. Estabilidad dimensional. Significativa cuando el material se va a ver sometido a cambios de temperatura, torsiones y esfuerzos por la dilatación térmica de la tubería o equipo.
- i. Procreación de hongos y bacterias. Importante en las industrias de alimentos, bebidas, medicinas y cosméticos.
- j. Agrietamiento. Importante en aplicaciones a muy alta temperatura y durante el manejo, transporte e instalación del material.
- k. Transmisión de sonido. tratamiento de tuberías con manejo de fluidos a muy alta presión y velocidad, en expansiones y contracciones de tubería.
- l. Toxicidad. Combinada con riesgo de incendio, es muy importante en áreas transitadas y espacios cerrados.

2.3.4. Características físicas de los termoaislantes.

En este punto se describen las características y propiedades de los principales materiales termoaislantes usados en instalaciones industriales para alta y baja temperatura.

A. Silicato de calcio.

Es un termoaislante granular, hecho a partir de silicato de calcio hidratado, reforzado con fibras orgánicas e inorgánicas y moldeado en formas rígidas. Su rango de temperatura de servicio es de 308 K (35°C) hasta 1088 K (815°C). Es un material que absorbe agua, por lo que su uso se recomienda en aplicaciones a temperaturas superiores a los 710 K (250°C). Debe poder secarse sin deterioro de sus propiedades físicas originales. Tiene pobre estabilidad dimensional. Es no combustible y debe colocarse con recubrimiento protectorio.

B. Fibra de vidrio.

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

- a. Con aglutinantes orgánicos. Poseen estructura propia y preforma. Dan lugar a medias cañas y placas rígidas y semirrígidas. Su densidad comercial es comúnmente entre 16 y 96 kg/m³, variable según el producto, uso, rigidez y temperatura de uso recomendado. Tienen baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta capacidad para recuperar su forma, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción

de ruido. Se deben proteger contra intemperie y abuso mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 727 K (454 °C)

- b. Con aceites minerales que evitan abrasión entre fibras y que dan lugar a colchonetas. Su densidad comercial usual es 48 kg/m³. Tienen baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta resiliencia, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se deben proteger con recubrimiento contra intemperismo y abuso mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 728 K (454 °C).

C. Vidrio espumado

Es un termoaislante celular, rígido sin aglutinantes ni fibras de refuerzo. Se presenta en forma de medias cañas, placas, segmentos curvos y preformados para accesorios de tuberías. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 755 K (482°C). Posee una densidad media, baja resistencia a la abrasión, facilidad de corte, total impermeabilidad al agua y al vapor, no absorbe fluidos potencialmente peligrosos, resiste a los ácidos, susceptible en medios alcalinos, buena estabilidad dimensional y alta resistencia a la compresión (689 KPa ó 7,0 kg/cm²). Puede instalarse sin enchaquetado metálico y en instalaciones subterráneas.

D. Lana de roca

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

- a. Con aglutinantes orgánicos. Poseen estructura propia y preforma. Dan lugar a medias cañas y placas rígidas y semirrígidas. Tienen baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta resiliencia, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se deben proteger con recubrimiento contra intemperismo y abuso mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 923 K (650 °C) para medias cañas y hasta 1255 K (982 °C) para placas rígidas y semirrígidas.

- b. Con aceites minerales que evitan abrasión entre fibras y que dan lugar a colchonetas. Su densidad comercial usual es de 96 a 144 kg/m³. Tienen baja conductividad térmica, facilidad de corte, alta resiliencia, baja resistencia al impacto y a la compresión, buena estabilidad dimensional, bajos costos de instalación y buena absorción de ruido. Se deben proteger con recubrimiento contra intemperismo y abuso mecánico. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 923 K (650°C).

E. Perlita expandida

Es fabricada a partir de un mineral silicato complejo, de tipo ígneo llamado “perlita”, cuya forma granular se expande por la explosión que produce la humedad contenida en la molécula al exponerse a una alta temperatura repentina. El producto expandido de la perlita crea una estructura celular de celdas de aire rodeadas de material vitrificado. Se refuerza con fibras inorgánicas para dar lugar a placas, medias cañas y segmentos curvos. Es repelente al agua, otorga facilidad de corte, no corroe al acero inoxidable

sujeto a esfuerzo; de densidad media, es dimensionalmente estable e incombustible. Se protege con enchaquetado de aluminio. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 922 K (649 °C).

F. Elastomérico

Es un termoaislante celular producido a partir de la mezcla de resinas espumadas y hules sintéticos. Disponible en tubo preformado y hojas. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 377 K (104°C). Posee baja permeabilidad al agua y al vapor de agua, facilidad de corte e instalación, buena resistencia al ozono, y resiliencia. Es combustible, autoextinguible y económico en instalaciones a baja temperatura. No contiene clorofluorocarbonos.

G. Poliéstireno

Es un termoaislante celular producido a partir del espumado de polímeros plásticos que dan lugar a un material rígido de celda cerrada. Disponible en medias cañas y placas. Su densidad comercial es 32 kg/m³. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 353 K (80°C). No contiene clorofluorocarbonos. Es un material ligero de excelentes características de corte e impermeable al agua. Es combustible, aunque se puede producir como autoextinguible. Requiere barrera de vapor y protección contra intemperie. Es económico en instalaciones a baja temperatura.

H. Poliuretano

Es un termoaislante celular producido a partir del espumado de polímeros plásticos que dan lugar a un material rígido de celda cerrada. Disponible en medias cañas, placas y espumado en sitio. Su densidad comercial es 32

kg/m³. Su temperatura máxima de aplicación es hasta 383 K (110°C). Contiene clorofluorocarbonos. Es un material ligero de excelentes características de corte e impermeable al agua. Su formulación varía con cada fabricante. Es combustible, aunque se puede producir como autoextinguible. Requiere barrera de vapor y protección contra intemperie.

2.3.5. Los materiales aislantes y su campo de aplicación

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. El montaje debe tener en cuenta el comportamiento del material a:

- ✓ Contracciones y dilataciones.
- ✓ Fuego.
- ✓ Acción de disolventes y agentes atmosféricos.
- ✓ Solicitaciones mecánicas.
- ✓ Temperatura (máxima de empleo).

En función de los distintos comportamientos, los materiales deberán montarse de forma que se minimicen los puentes térmicos.

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. Los materiales minerales son incombustibles, pudiendo entonces dejarse vistos (p. ej., falsos techos decorativos).

La estructura química de los materiales minerales asegurará, además, que no se desprenderán gases tóxicos sometidos al fuego directo. Recuérdese que son las intoxicaciones las culpables de muertes en incendio, incluso de los bomberos que acuden al siniestro.

La temperatura máxima de utilización no está regulada como Norma UNE, pero como criterio se utiliza en el resto de Europa el siguiente: "Temperatura máxima de empleo es aquella en la que el material alcanza una deformación del 5% del espesor bajo una carga uniforme constante de 1.000 Pa"

Cuadro 1: Temperaturas máximas de distintos materiales aislantes.

Minerales	Plásticos
a. LANA DE VIDRIO Con encolado, 250 °C Sin encolado, 500 °C	a. POLIESTIRENO Expandido, 70 °C Extrusionado, 85 °C
b. LANA DE ROCA Hasta 750 °C	b. POLIURETANO 100 °C
c. FIBRA CERÁMICA Hasta 1500 °C	

Fuente: MERCAILLAMENT - División de aislamientos, 2008

2.4. Transmisión de calor

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.

2.4.1. Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor puede ocurrir por medio de tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

a. Conducción

En este caso el calor se transmite de molécula a molécula sin cambio aparente de materia, por lo que esta forma de cambio de calor interesa esencialmente a los sólidos. La elevación de temperatura aumenta la excitación de las partículas más elementales de la materia, transmitiéndose dicha excitación a las más próximas de su entorno y con ello su energía calorífica, continuándose el proceso en el cuerpo en cuestión de la zona más caliente a la más fría.

Por lógica se comprende que cuanto más denso, compacto y pesado es un cuerpo, más próximas están las moléculas entre sí y, por tanto, el cambio se realiza con mayor facilidad.

b. Convección

Es propia de los fluidos (líquidos y gases). Las moléculas en contacto con un cuerpo a temperatura más alta "A" se calientan, disminuyendo su densidad y desplazándose por gravedad. Si a su vez entran en contacto con un cuerpo más frío "B", ceden calor, aumentando su densidad y desplazándose en sentido contrario, formando un ciclo de convección.

c. Radiación

La radiación está constituida por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes. Mientras las dos formas de transmisión anteriores (conducción y convección) necesitan de un soporte material; la transmisión por radiación puede realizarse en el vacío. Todos los cuerpos, incluso a temperaturas bajas, emiten calor por radiación y la cantidad de calor irradiado aumenta cuando se eleva la temperatura del cuerpo.

Por ello, cuando un cuerpo se encuentra en presencia de otro más caliente, absorbe más energía de la que emite y viceversa, siendo la cantidad transmitida la diferencia entre la emitida por ambos.

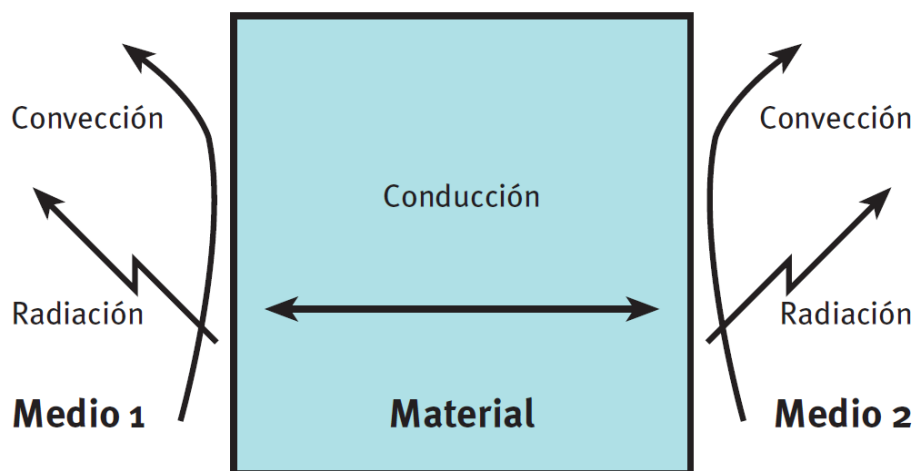


Figura 7. Formas genéricas de intercambio de calor

2.4.2. Transmisión del calor por conducción en régimen estacionario

La conducción de calor normalmente describe la transmisión de calor a través de las moléculas en sólidos, líquidos y gases producidos por un gradiente de temperatura. En el cálculo se supone que el gradiente de temperatura existe en una sola dirección, y que la temperatura es constante en planos perpendiculares a ella.

La densidad de flujo de calor q para una pared en una dirección x perpendicular a su cara, viene dada por:

$$q = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial X} \frac{W}{m^2} \quad (1)$$

a) Para una pared plana de espesor "d":

$$q = \frac{k}{L} \cdot (T_1 - T_2) \frac{W}{m^2} \quad (2)$$

O bien:

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R} \frac{W}{m^2} \quad (3)$$

, donde:

k es la conductividad térmica del material en $W/(m \cdot K)$;

L es el espesor de la pared en m;

T_1 es la temperatura de la superficie interior, en °C;

T_2 es la temperatura de la superficie exterior, en °C;

R es la resistencia térmica de la pared en $(m^2 \cdot K)/W$.

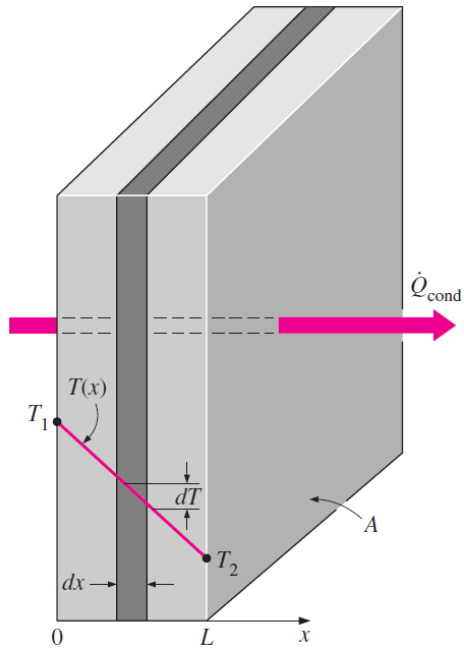


Figura 8. Distribución de la temperatura en una pared de una sola capa.

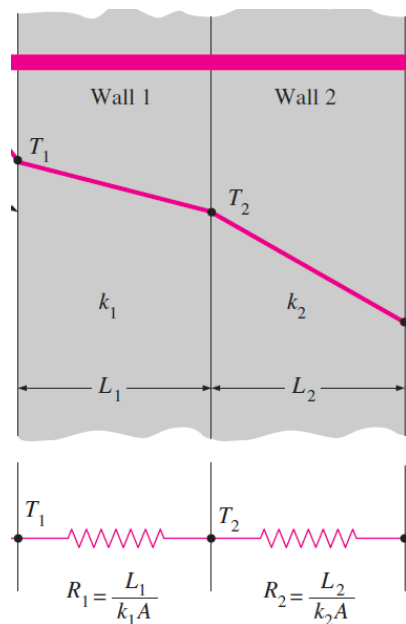
Para una pared multicapa:

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R'} \frac{W}{m^2} \quad (4)$$

, donde R' es la resistencia térmica de la pared multicapa:

$$R' = \sum_{j=0}^n \frac{L_j}{k_j} \quad (m^2 \cdot K)/W \quad (5)$$

Figura 9. Distribución de temperatura en una pared plana multicapa



b) La densidad lineal de flujo de calor q_l a través de una pared cilíndrica hueca de una sola capa es:

$$q_l = \frac{(T_1 - T_2)}{R_1} \frac{W}{m} \quad (6)$$

, donde R_1 es la resistencia térmica lineal de una sola capa cilíndrica hueca, dada por:

$$R_1 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot k} \quad (m \cdot K/W) \quad (7)$$

, donde:

r_2 es el diámetro exterior de la capa;

r_1 es el diámetro interior de la capa.

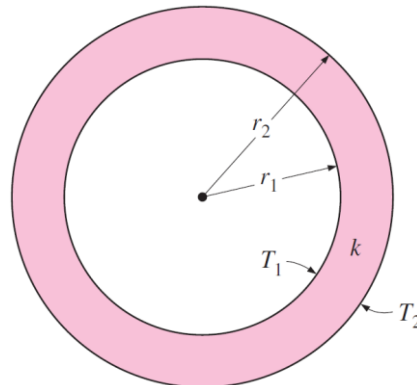


Figura 10. Tubo cilíndrico con temperatura interior y exterior

Para elementos cilíndricos multicapa:

$$q_l = \frac{(T_1 - T_2)}{R'_1} \frac{W}{m} \quad (8)$$

, donde

$$R'_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{k_j} \cdot \ln \frac{r_{2j}}{r_{1j}} \right) \frac{m \cdot K}{W} \quad (9)$$

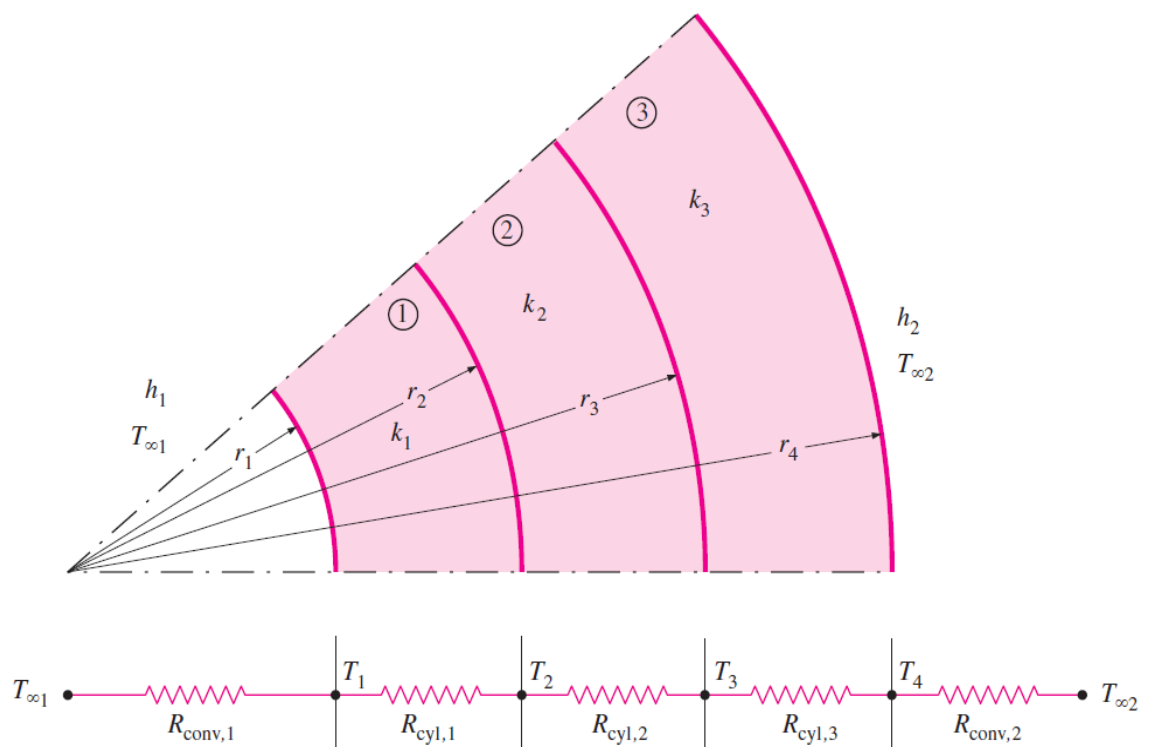
Considerando transferencia de calor por convección en ambos lados y la velocidad de transferencia de calor (ver figura 11):

$$\dot{Q} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{total}} \text{ W/m} \quad (10)$$

, donde:

$T_{\infty 1}$: temperatura del fluido interno

$T_{\infty 2}$: temperatura del fluido externo



$$\begin{aligned} R_{total} &= R_{conv,1} + R_{cy1,1} + R_{cy1,2} + R_{cy1,3} + R_{conv,2} \\ &= \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_3} + \frac{1}{h_2 A_4} \end{aligned}$$

Figura 11. Red de resistencias térmicas para un cilindro multicapa

2.4.3. Transmisión superficial del calor

En las instalaciones, las superficies sólidas mantienen una transferencia de calor con el medio fluido en contacto, donde se mezclan las formas convectiva y radiativas, especialmente cuando el medio fluido es gaseoso, especialmente el aire ambiente.

Por ello es necesario el estudio conjunto de ambos tipos de transferencias. El coeficiente superficial de transmisión de calor h en $W/(m^2 \cdot K)$ se define como la cantidad de flujo de calor que pasa a través de una superficie en estado estacionario, dividida por la diferencia de temperatura entre dicha superficie y su entorno.

En el caso de instalaciones, existen dos tipos de coeficiente superficial según se trate de la cara interna h_i o la externa h_e .

En general, el coeficiente superficial de transmisión de calor viene dado por:

$$h = h_r + h_{cv} \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (11)$$

, donde

h_r es la parte radiativa del coeficiente superficial de transmisión de calor;

h_{cv} es la parte convectiva del coeficiente superficial de transmisión de calor.

a) Parte radiativa del coeficiente de superficie, h_r

El coeficiente superficial debido a radiación, h_r depende de la temperatura, del acabado superficial del material y de su emisividad (ϵ). La emisividad se define como la relación entre el coeficiente de radiación C_r de la superficie y el coeficiente de radiación constante del cuerpo negro; h_r está dado por:

$$h_r = a_r \cdot C_r \left(\frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (12)$$

a_r es el factor temperatura. Está dado por:

$$a_r = \frac{T_s^4 - T_\infty^4}{T_s - T_\infty} \quad K^3 \quad (13)$$

, y puede ser aproximada hasta una diferencia de temperatura de 200K por:

$$a_r \approx 4 \cdot (T_{av})^3 \quad K^3 \quad (14)$$

, donde:

T_{av} es 0,5 · (temperatura superficial, T_s + temperatura ambiente T_∞ superficial de una superficie radiante en la vecindad en K)

C_r es el coeficiente de radiación, en $W/(m^2 \cdot K^4)$

C_r está dado por:

$$C_r = \varepsilon \cdot \sigma \quad (15)$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \quad W/m^2 \cdot K^4$$

Cuadro 2: coeficientes de radiación para diferentes materiales

Superficie	ε (emisividad)	C_r $W/(m^2 \cdot K^4)$
Aluminio brillante	0.05	0.28×10^{-8}
Aluminio oxidado	0.13	0.74×10^{-8}
Chapa de metal galvanizado limpio	0.26	1.47×10^{-8}
Chapa de metal galvanizado sucio	0.44	2.49×10^{-8}
Acero austenítico	0.15	0.85×10^{-8}
Plancha de aluminio Zinc	0.18	1.02×10^{-8}
Superficies no metálicas	0.94	5.33×10^{-8}

Fuente: ISOVER - División de aislamientos, 2008

b) Coeficiente convectivo h.

Este factor es dependiente de varios factores, tales como la velocidad del fluido, la orientación de la superficie, el tipo de material, la diferencia de temperatura, etc. Además se debe considerar tanto el fluido interno (dentro de la tubería) y el fluido externo (principalmente aire) para la evaluación y análisis de la transferencia de calor. Para esto es considerar algunos puntos importantes como las características del fluido.

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).

- El Numero de Reynolds es un número adimensional que se expresa para flujo interno en una tubería circular como:

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (17)$$

, donde:

V : velocidad del fluido D : diámetro interno del fluido

ρ : densidad del fluido μ : viscosidad dinámica

ν : viscosidad cinemática

Es evidente que la transición de flujo laminar a turbulento también depende del grado de perturbación del flujo por la rugosidad de la superficie, las vibraciones de la tubería y las fluctuaciones en el flujo. Es decir:

$$\begin{aligned} \text{Re} &\leq 2\,300 && \text{flujo laminar} \\ 2\,300 &\leq \text{Re} \leq 4\,000 && \text{flujo transicional} \\ \text{Re} &\geq 4\,000 && \text{flujo turbulento} \end{aligned}$$

- Flujo laminar: Se caracteriza por tener líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado.
- Flujo turbulento: Se caracteriza se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimiento también desordenado.

Para el número de Prandtl:

$$Pr = \frac{\rho V C_p}{k_f} \quad (18)$$

, donde es ρ es la densidad del fluido, C_p es el calor específico del fluido y k_f es la conductividad térmica del fluido.

El número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g\beta\rho C_p\Delta T D^3}{V k_f} \quad (19)$$

, donde es la gravedad y 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:

$$h = \frac{N_U k_f}{D} \quad (20)$$

, donde N_U es el número de Nusselt y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Dependiendo del régimen de flujo y de la geometría, se han propuesto diversas correlaciones para el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor. A continuación se presentan algunas de las expresiones que se utilizan comúnmente en aplicaciones de equipos y líneas de procesos.

Para la convección forzada en cilindros verticales y horizontales se tiene:

$$\overline{N_{UD}} = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}, \quad Re_D Pr > 0,2 \quad (21)$$

, donde N_{UD} y Re 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:

$$\overline{N_{UD}} = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2, \quad Ra_D < 10^{12} \quad (22)$$

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

Otras expresiones para el cálculo de la convección natural en cilindros horizontales son:

$$\overline{Nu}_{U_L} = 0,54 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad , \quad 10^4 < Ra_L < 10^7 \quad (23)$$

$$\overline{Nu}_{U_L} = 0,15 Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad , \quad 10^7 < Ra_L < 10^{11} \quad (24)$$

b.2. Convección interna

Para determinar la convección de un flujo interno, es preciso analizar la variación del número local de Nusselt a lo largo de una tubería, en un flujo turbulento, tanto para temperatura superficial uniforme como para flujo uniforme de calor en la superficie, como se muestra en la figura 11.

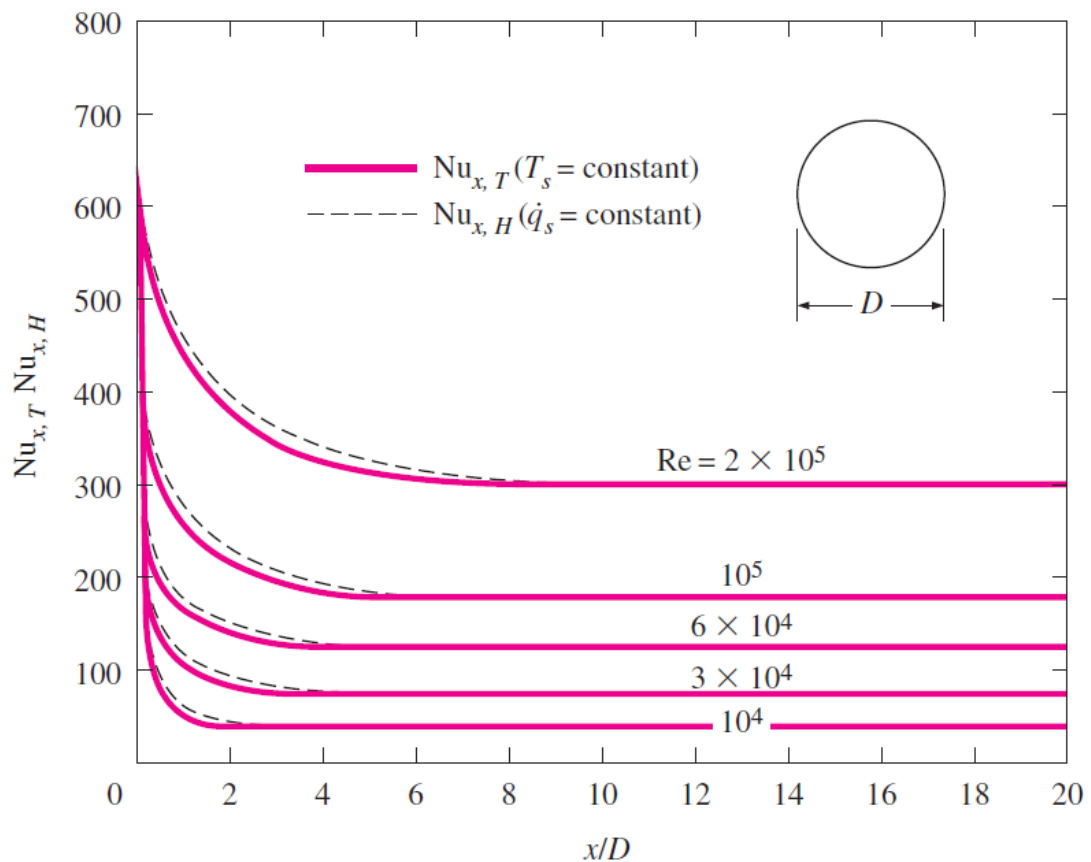


Figura 12. Variación del número de Nusselt en flujo turbulento

Se puede realizar un análisis semejante para el flujo laminar completamente desarrollado en un tubo circular para el caso de temperatura superficial constante T_s , en donde el número de Nusselt que se obtiene es:

$$N_U = \frac{hD}{k_f} = 3.66 \quad (25)$$

La conductividad térmica k a usarse en las relaciones antes dadas debe evaluarse a la temperatura media de la masa de fluido. La cual es un promedio aritmético. En el Anexo I se muestran diversos número de Nusselt para flujo laminar en tubos de diversas secciones transversales.

b.3. Convección externa

Los fenómenos que afectan la fuerza de resistencia al movimiento también afectan la transferencia de calor de un cuerpo por medio del movimiento de un fluido y este efecto aparece en el número de Nusselt.

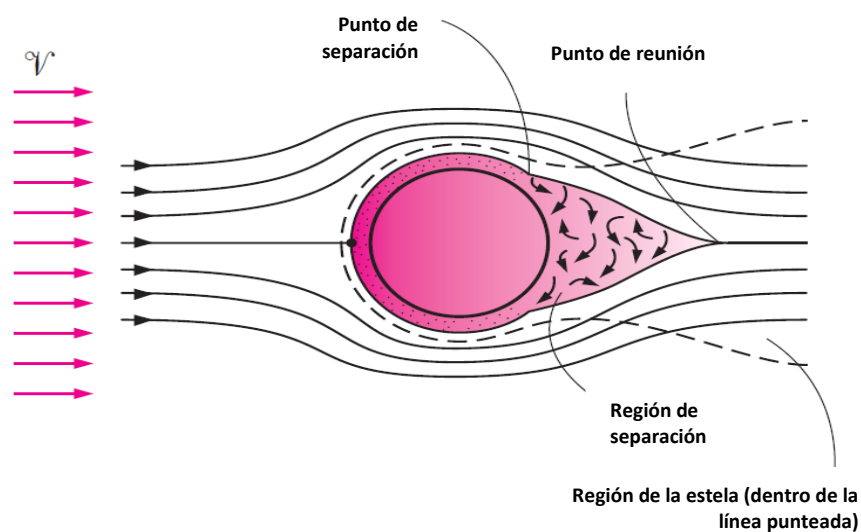


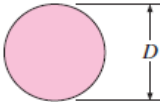
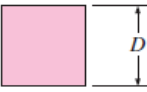
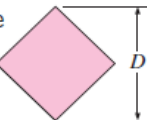
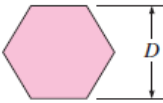
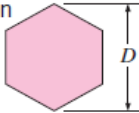
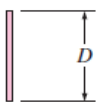
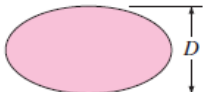
Figura 13. Patrones típicos de flujo sobre un cilindro

En donde el número de Nusselt promedio para los flujos a través de cilindros se pueden expresar como:

$$N_{U,cil} = \frac{hD}{k_f} = C Re^m Pr^n \quad (25)$$

, donde $n = 1/3$ y las constantes experimentalmente determinadas C y m se dan en el cuadro 3, para cilindros circulares así como para varios no circulares.

Cuadro 3. Correlaciones empíricas para el número de Nusselt promedio para convección sobre cilindros circulares y no circulares

Cross-section of the cylinder	Fluid	Range of Re	Nusselt number
Circle 	Gas or liquid	0.4–4 4–40 40–4000 4000–40,000 40,000–400,000	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$
Square 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.102Re^{0.675} Pr^{1/3}$
Square (tilted 45°) 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.246Re^{0.588} Pr^{1/3}$
Hexagon 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.153Re^{0.638} Pr^{1/3}$
Hexagon (tilted 45°) 	Gas	5000–19,500 19,500–100,000	$Nu = 0.160Re^{0.638} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.0385Re^{0.782} Pr^{1/3}$
Vertical plate 	Gas	4000–15,000	$Nu = 0.228Re^{0.731} Pr^{1/3}$
Ellipse 	Gas	2500–15,000	$Nu = 0.248Re^{0.612} Pr^{1/3}$

Fuente: Transferencia de Calor, Yunus Cengel. 2003

2.4.4. Transmitancia térmica

La transmitancia térmica de una pared plana, U , es la cantidad de flujo de calor que en estado estacionario pasa por unidad de área, dividida por la diferencia de temperatura en los alrededores de ambas caras de la pared. Análogas expresiones tendrían paredes cilíndricas y esféricas según:

$$U = \frac{q}{T_i - T_a} \quad W/(m^2 \cdot K) \quad (27)$$

$$U_l = \frac{q_l}{T_i - T_a} \quad W/(m \cdot K) \quad (28)$$

$$U_{sph} = \frac{q}{T_i - T_a} \quad W/K \quad (29)$$

Para paredes planas, la transmitancia térmica U puede calcularse:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e} = R_{si} + R + R_{se} \quad (m^2 \cdot K)/W \quad (30)$$

Para paredes cilíndricas, la transmitancia térmica lineal U_l puede calcularse:

$$\frac{1}{U_l} = \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i} + R_l + \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_e} = R_{li} + R_l + R_{le} \quad (m \cdot K)/W \quad (31)$$

Para paredes esféricas, la transmisión térmica U_{sph} viene dada por:

$$\frac{1}{U_{sph}} = \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i^2} + R_{sph} + \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_e^2} \quad K/W \quad (32)$$

Como se ha indicado antes, el valor de h_i es muy elevado, por lo que la resistencia superficial de líquidos en el interior de depósitos y tuberías R_{si} es pequeña y se puede despreciar. Para la resistencia superficial exterior

R_{se} , se aplican las ecuaciones indicadas. Para conductos de aire es necesario considerar también el coeficiente superficial interior.

La inversa de la transmitancia térmica U es la resistencia térmica R_T para paredes planas y la resistencia térmica total lineal R_{Ti} para paredes cilíndricas y R_{Tsp} para paredes esféricas.

2.4.5. Distribución de temperaturas. Temperaturas superficiales

- a) Temperaturas intermedias. La ecuación general que nos da la pérdida de calor en un elemento multicapa puede escribirse de la siguiente forma general:

$$q = \frac{T_i - T_a}{R_T} \quad \frac{W}{m^2} \quad (33)$$

, donde

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (m^2 \cdot K)/W \quad (34)$$

R_1, R_2, \dots son las resistencias térmicas de cada capa individual;

R_{si}, R_{se} son las resistencias térmicas superficiales de las superficies interior y exterior.

- b) Temperatura superficial

Dado que no es posible conocer todos los parámetros que entran en juego, resulta difícil garantizar la temperatura superficial.

El cálculo de la temperatura superficial se usa normalmente para determinar un valor límite de la temperatura de la instalación por razones de seguridad. El cálculo teórico puede variar en la práctica por distintas condiciones. Éstas pueden ser: la temperatura ambiente, el movimiento del

aire, el estado de la superficie del aislamiento, el efecto radiativo de los cuerpos adyacentes, condiciones meteorológicas.

Para la obtención de la temperatura superficial partimos de la fórmula anterior; despreciando la R_{si} , como se ha indicado antes:

$$T_s = T_a + \frac{R_{se}}{R_T} \cdot (T_{\infty 1} - T_a) \quad ^\circ\text{C} \quad (35)$$

, y al sustituir los valores de R_{se} y R_T , para una sola capa de aislante:

Paredes planas:

$$T_s = T_a + \frac{(T_{\infty 1} - T_a)}{\frac{h_e \cdot d}{k} + 1} \quad ^\circ\text{C} \quad (36)$$

Paredes cilíndricas:

$$T_s = T_a + \frac{(T_{\infty 1} - T_a)}{\frac{h_e D_e}{2k} \ln \frac{r_e}{r_i} + 1} \quad ^\circ\text{C} \quad (37)$$

La figura 14 permite calcular directamente el espesor del aislamiento que resulta para una misma temperatura superficial, en una pared plana y en paredes cilíndricas de diversos diámetros y considerando el resto de condiciones iguales. Esto supone que el valor de la conductividad térmica, k , debe ser igual en ambos tipos de aislante en el intervalo de temperaturas de trabajo para cada caso.

A partir de la expresión para una tubería cilíndrica se obtiene a partir del diámetro y de un parámetro C' , entrando en la figura 15, el espesor de aislamiento para una tubería fijando la densidad del flujo de calor o la temperatura superficial de la misma.

Comentar que en esta fórmula se toma un valor constante de la conductividad térmica cuando esta es variable, y que por ello es una aproximación al comportamiento real. Fijando el flujo de calor al exterior, q , en W/m^2 , resulta la siguiente expresión:

$$\frac{C'}{C''} = 2 \cdot k \left[\left(\frac{(T_{\infty 1} - T_a)}{q} \right) - \frac{1}{h_e} \right] \quad (39)$$

Análoga expresión se tiene si se fija la temperatura superficial externa, obteniendo:

$$\frac{C'}{C''} = \frac{2 \cdot k}{h_e} \cdot \left[\left(\frac{(T_{\infty 1} - T_a)}{T_s - T_a} \right) - 1 \right] \quad (38)$$

, donde $C'' = D_e \cdot \ln \frac{r_e}{r}$

Con las anteriores expresiones y en función del diámetro sin aislamiento de la tubería en mm obtenemos el espesor de aislamiento en mm.

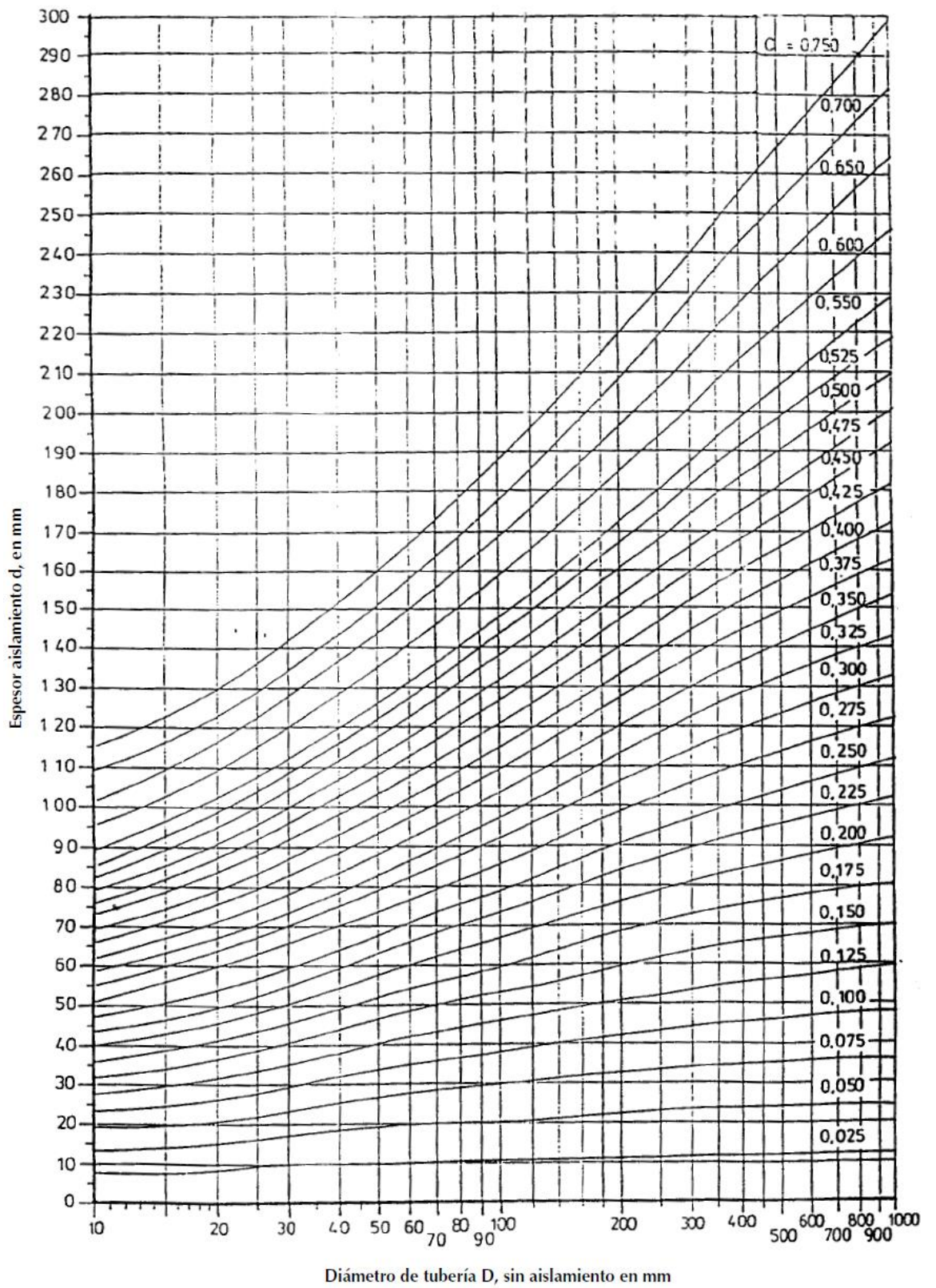


Figura 15. Espesor de aislamiento de una tubería para una densidad de flujo de calor determinado o para una temperatura superficial fija.

2.4.6. Cambio de temperatura longitudinal en una tubería

Para obtener el valor exacto del cambio de temperatura de un fluido a lo largo de una tubería, se aplica la siguiente ecuación:

$$T_f - T_s = (T_{\infty 1} - T_s) \cdot e^{-\alpha} \quad ^\circ\text{C} \quad (39)$$

, donde

$T_{\infty 1}$ es la temperatura inicial del fluido, en $^\circ\text{C}$;

T_f es la temperatura final del fluido, en $^\circ\text{C}$;

T_s es la temperatura superficial del sistema, en $^\circ\text{C}$;

, donde α es:

$$\alpha = \frac{hA_s}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (40)$$

Siendo:

h coeficiente convectivo externo, en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

\dot{m} flujo másico medio en kg/h

A_s : es el área de la sección transversal de toda la longitud de la tubería en m^2 (πDL)

C_p calor específico presión constante, en $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Como en la práctica el cambio de temperatura aceptable es normalmente pequeño, se aplica la siguiente ecuación para un cálculo aproximado:

$$\Delta T = \frac{q_l \cdot l \cdot 3.6}{\dot{m} \cdot C_p} \quad ^\circ\text{C} \quad (41)$$

, donde

ΔT es el cambio de temperatura longitudinal en $^\circ\text{C}$

q_l es la densidad lineal de flujo de calor en W/m .

q_l se puede calcular sólo en el caso de que se conozca la temperatura media del fluido, lo que supone que ΔT debe ser conocida, para lo que es preciso utilizar un método de cálculo iterativo partiendo de un valor ΔT estimado. Es preciso repetir el procedimiento iterativo tantas veces como sea necesario hasta que la variación de ΔT sea aceptable.

2.5. Espesor óptimo económico de aislamiento

La determinación de un espesor de aislamiento adecuado obedece en algunos casos a condiciones exclusivamente técnicas, como puede ser limitar la caída de temperatura de un fluido en una conducción o fijar la temperatura máxima superficial de un aislamiento por motivos de seguridad de los trabajadores.

Pero la mayor parte de las inversiones en aislamiento tienen un carácter económico: limitar las pérdidas de calor en recintos a temperaturas muy diferentes a las ambientales. Por ello es necesario introducir conceptos económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor.

Esencialmente existen tres grados de aislamiento en la industria. El primer grado es el más delgado (de 0,002 a 0,020 m) y se enfoca en la prevención de lesiones de las personas que trabajan cerca de las instalaciones. El segundo grado es un grosor intermedio (de 0,015 a 0,030 m), el cual se dirige a la reducción importante de la pérdida de calor (conocido como espesor óptimo, debido a que logra un balance entre la inversión del aislamiento y las pérdidas por calor como se muestra en la Figura 16). El último grado (de 0,030 a 0,050 m) es el más grueso y se conoce como

espesor ecológico porque se enfoca en reducir la pérdida de calor en lo máximo posible y proteger el medio ambiente (ISOVER, 2008)

El planteamiento teórico es sencillo:

- ✓ Las pérdidas de energía disminuyen con un aumento del espesor de aislamiento, de acuerdo con fórmulas conocidas.
- ✓ El aumento del espesor de aislamiento supone incremento de la inversión para su compra e instalación, aunque esto no tiene unas leyes determinadas de crecimiento.

Existen además otros componentes del coste global como son los gastos de mantenimiento. Representando gráficamente estos conceptos para la unidad específica y para un período de tiempo previsto de amortización, se tendrá:

- ✓ Inversiones en función del espesor de aislamiento "d".
- ✓ Pérdidas energéticas + gastos de mantenimiento para el período considerado, en función también de "d".



Figura 16. Grafica de costos en función del espesor del aislamiento

El costo total empresarial será, para cada espesor de aislamiento, el resultado de los valores de ambas curvas.

El coste total será mínimo para un espesor determinado, precisamente el espesor óptimo económico “ d_{opt} ”.

2.5.1. Método General

El método de cálculo más utilizado en la CEE se basa en las aplicaciones del VALOR ACTUALIZADO NETO (VAN).

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

Para determinar el VAN, se determina el VAN o coeficiente multiplicador que actualiza los ahorros en el período total que se considere. Se demuestra que el valor de dicho coeficiente es:

$$VAN = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1} \quad (42)$$

, siendo:

$$t = \frac{1 + 0.01 \cdot b}{1 + 0.01 \cdot r} \quad (43)$$

, donde:

b = Aumento previsible del costo de la energía en %.

r = Tasa de actualización neta en % (equivalente al interés bancario deducidos los impuestos y la inflación).

n = Número de años para los que se efectúa el estudio (horizonte económico).

Para un proyecto determinado, a cada espesor de aislamiento térmico “ d_i ” le corresponderán unas pérdidas energéticas específicas y un coste de inversión asociado.

A medida que aumenta el espesor, como ya se ha indicado, disminuyen las pérdidas energéticas y aumenta la inversión.

Si consideramos dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas tendrá un valor económico que se actualiza con el VAN para el período considerado. A su vez, existirá una diferencia de inversión de aislamiento. Esto permite plantear la comparación:

$$\begin{array}{rcl} \text{INCREMENTO} & & > \\ \text{DE} & \times \text{Coef. VAN} & = \\ \text{AHORRO} & & < \end{array} \quad \text{INCREMENTO DE LA INVERSIÓN}$$

, siendo:

INCREMENTO DE AHORRO: Valor pérdidas energéticas para “ d_i ” - Valor pérdidas para “ d_{i+1} ”

INCREMENTO DE INVERSIONES: Inversión para “ d_{i+1} ” - Inversión para “ d_i ”

Si el resultado de la inecuación es que el primer término es superior al segundo, indica que el incremento de ahorro es mayor que la inversión necesaria para obtenerlo. Por el contrario, si la inecuación indica que el incremento del ahorro obtenido requiere una inversión superior (primer término menor que el segundo) esta inversión no es rentable y debe disminuirse, es decir, reducir el espesor de aislamiento.

Es obvio que la situación óptima (espesor óptimo económico) es precisamente la del equilibrio, es decir, cuando el incremento del ahorro es igual al incremento de la inversión.

2.5.2. Método del cálculo directo

Como se indicaba en la Introducción, lo que se trata es de encontrar el valor mínimo del Coste Total:

$$\text{Coste Total } (d_i) = \text{Coste de Pérdidas de energía } (d_i) + \text{Inversión } (d_i)$$

Las pérdidas caloríficas, sobre todo de figuras geométricas conocidas, responde bien a las características de funciones continuas de espesor (d_i). Pero no ocurre lo mismo con las inversiones: normalmente éstas presentan saltos o discontinuidades con el espesor (p. ej.: espesores a partir de los que se necesitan dos piezas superpuestas y dos sujeciones). Por esto, las inversiones sólo pueden presentar el carácter de funciones continuas dentro de un campo de valores " d_i ".

Con estas consideraciones, es posible encontrar el espesor óptimo económico cuando se cumpla:

$$\frac{\partial \text{costo}(d)}{\partial (d)} = 0 \quad (44)$$

El caso más sencillo es el de las paredes planas o de gran radio de curvatura, para las cuales puede establecerse:

$$I(d) = I_0 + I'_0 \cdot d \quad (45)$$

, en el que:

$I(d)$ = Inversión para el aislamiento de espesor " d " (\$/m²)

I_0 = Valor constante de la inversión, independiente del espesor (\$/m²)

I'_0 = Coeficiente variable de la inversión (\$/m³)

, la ecuación global del coste será:

$$\text{Costo}(d) = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_e} + \frac{d}{k}} \cdot E \cdot (VAN) \cdot Z + I_0 + I'_0 \cdot d \quad (46)$$

, donde:

$T_i - T_e$ = Dif. de temperaturas interior y ambiente (K)

h_e = Coeficiente superficial externo de transmisión de calor $W/(m^2 \cdot K)$

k = Conductividad térmica del aislante entre $T_i - T_e$ $W/(m \cdot K)$

d = Espesor de aislamiento (m)

E = Costo de la energía $\$/ (W \cdot h)$

(VAN) = valor actual neto

Z = N° de horas de funcionamiento al año (h).

, el resultado de: $\frac{\partial \text{costo}(d)}{\partial (d)} = 0$ sería:

$$d = \sqrt{\frac{E \cdot k \cdot Z \cdot (VAN) \cdot (T_i - T_e)}{I'_0}} - \frac{k}{h_e} \quad (m) \quad (47)$$

Para las lanas minerales (lanas de vidrio y lanas de roca), el término k/h_e suele despreciarse ya que $k \ll h_e$.

Cuando se trata de elementos curvos (cilindros o esferas), la complejidad de la expresión resultante no permite una formulación como en el caso de las paredes planas. En estos casos es más recomendable la utilización del método general.

2.6. Aislamiento térmico de tuberías

Aislamiento térmico de tuberías (en general de sección circular) o conductos (sección cuadrada o rectangular) para transporte de fluidos en estado líquido, gas o vapor.

2.6.1. Aislamiento en forma Coquillas

El corte practicado longitudinalmente en la generatriz, facilita la colocación de las coquillas, asegurando su fijación con una lazada de alambre de acero dulce galvanizado. La temperatura del fluido y el diámetro de la tubería, permiten la posibilidad de colocar las Coquillas a doble capa. A partir de una temperatura superior a 200 °C, el aislamiento debe colocarse en dos o más capas a "cubrejuntas", bien utilizando dos Coquillas o una Coquilla y una o más mantas. (Figura 17).

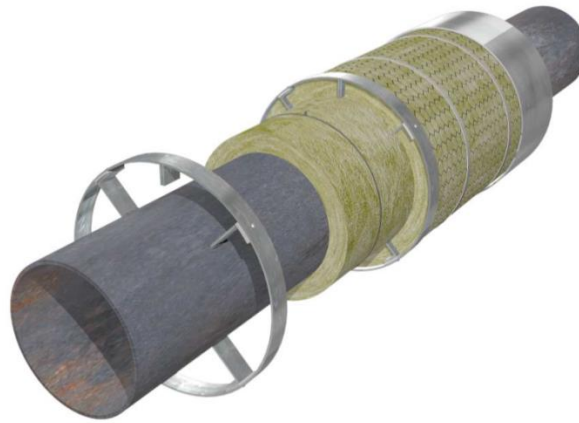


Figura 17: Aislamiento de una tubería con coquilla y manta de lana de roca.

2.6.2. Aislamiento en forma de fieltros o mantas

Se corta la manta en una dimensión igual a "diámetro exterior tubería + doble del espesor de la manta" y se coloca sobre la tubería, "cosiendo" los bordes de la manta por la malla, con alambre de acero dulce galvanizado. Para tuberías con un diámetro superior a 250 mm, debe reforzarse la fijación de la manta mediante lazadas de alambre, o flejes de acero galvanizado con sistema de tensado. A partir de una temperatura superior a 200 °C, el aislamiento debe colocarse en dos o más capas, a "cubrejuntas".

2.6.3. Colocación del revestimiento exterior (protección del aislamiento)

Para el revestimiento del aislamiento puede utilizarse chapa de aluminio de espesor según diámetro, chapa galvanizada o lacada y chapa de acero inoxidable. Para diámetros de hasta 500 ÷ 600 mm, la chapa de revestimiento se "ata" en las juntas longitudinales y transversales, mediante tornillos de rosca chapa, presentándose los bordes de junta transversal y uno de los bordes de junta longitudinal "bordoneados".

Para diámetros superiores, se fija una llanta de acero de 40 x 3 mm. Tensada mediante tuercas auto-blocantes intercalando una junta aislante con la tubería (fieltro de lana cerámica tipo *Pyronap* de 3 ÷ 6 mm según temperatura de trabajo), que incorpora distanciadores en Z de 40 x 3 mm, soldados a la llanta. Sobre los distanciadores se fija una llanta exterior de 40 x 3 mm, que sirve de soporte y fijación de la chapa de revestimiento.

2.6.4. Caso particular de tuberías de acompañamiento

Se reviste la tubería principal y las de acompañamiento con una malla electro-soldada galvanizado o inoxidable, "cosiendo" en las juntas con alambre de acero galvanizado o inoxidable. Como aislamiento se utiliza manta o fieltro SP (SPINTEX), cosiendo los bordes longitudinales y transversales, con alambre galvanizado y reforzando con lazadas de alambre o flejes provistos de sistema de tensado. Para grandes diámetros de la tubería principal, se colocan flejes de 40 x 3 mm tensándolos y soldando los extremos, sobre los que se fija la chapa de revestimiento exterior con tornillos de rosca chapa.

2.6.5. Bridas y válvulas

Para el aislamiento de bridas y válvulas, se utiliza un encapsulado desmontable dividido en dos mitades, construido con chapa de aluminio de 0.8 mm y perfiles en U de refuerzo de acero galvanizado o aluminio, revistiéndolo por la cara interior con manta SP, la cual se fija mediante piezas en Z y pletinas. (Figura 18).

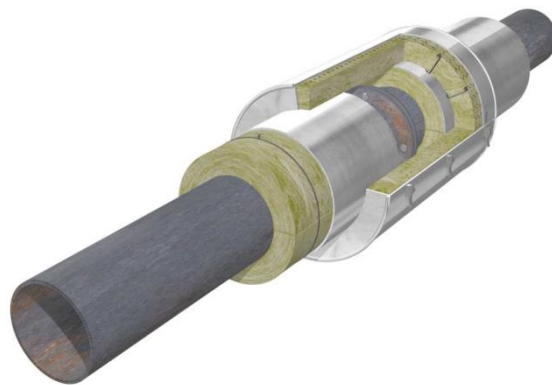


Figura 18: Aislamiento desmontable de una brida

En las juntas transversales y longitudinales, así como en la junta con el calorifugado de la tubería, se intercala un fieltro de lana cerámica tipo *Pyronap*. Ambas piezas del "encapsulado", se fijan mediante cuatro cierres de presión (Figura 19).

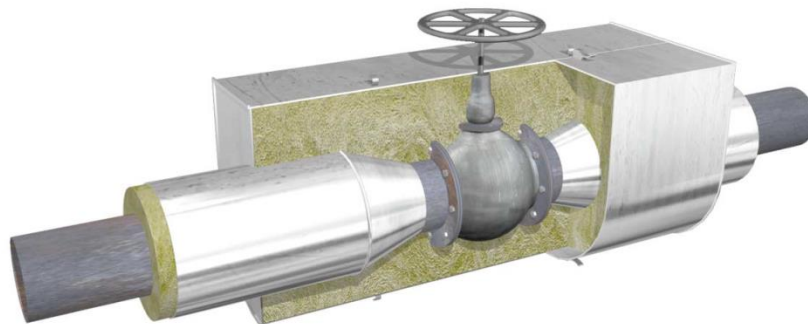


Figura 19: Aislamiento desmontable de una válvula

2.6.6. Codos

Cuando se trate de tuberías aisladas con coquillas de lana mineral, los codos se *calorifugarán* cortando las coquillas en segmentos ajustables y afianzando cada segmento mediante una lazada de alambre. (Figura 20).

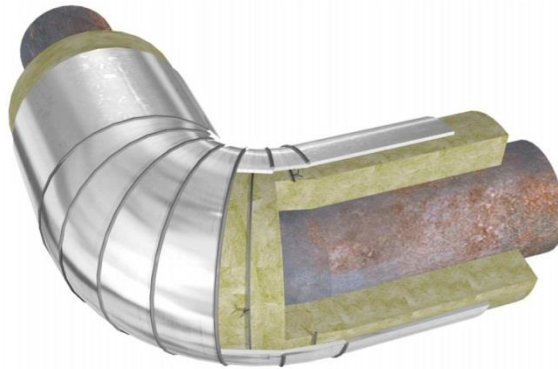


Figura 20: Aislamiento de un codo con coquilla.

En el caso de tuberías aisladas con mantas de lana mineral se debe realizar el aislamiento mediante piezas debidamente cortadas de las mantas por medio de plantillas y fijando firmemente el conjunto mediante el entrelazado de la malla de la manta con los tramos contiguos.

El recubrimiento exterior se realiza mediante segmentos de chapa engatillados entre sí.

2.7. Mantenimiento en sistema de aislamiento térmico

Normalmente, un sistema termoaislante bien instalado requiere poco mantenimiento; sin embargo, es necesario conocer procedimientos de inspección y mantenimiento preventivo y correctivo. Con frecuencia, el aislamiento se daña o es retirado y nunca vuelto a colocar durante las operaciones de reparación del sistema de vapor. Todo aislamiento dañado

o húmedo debe ser reparado o repuesto de inmediato. Elimine las fuentes de humedad antes de reemplazar el aislamiento. Entre las causas que provocan humedad en éste, se incluyen las fugas en válvulas, tuberías o equipos adyacentes.

2.7.1. Mantenimiento después de reparar sistemas mecánicos

Cuando se repara una porción de equipo, tubería o ducto, generalmente se remueve una parte del sistema termoaislante. La recolocación se realiza de la misma manera que para una instalación original; sin embargo, se debe tener especial cuidado al remover los materiales existentes, ya que es posible reutilizarlos.

2.7.2. Inspección para mantenimiento

Para evitar costos de operación innecesarios o la eventual destrucción del sistema termoaislante, se deben localizar las fallas que pueden presentarse en el sistema:

- a. Aislamiento no repuesto
- b. Aislamiento mojado
- c. Roturas en la barrera de vapor
- d. La presencia de arrugas o deformaciones revela la necesidad de juntas de expansión
- e. Proyecciones sin aislamiento, fuera de los equipos o tuberías
- f. En áreas de abuso mecánico, el sistema puede sufrir daño por tráfico de personal o maquinaria
- g. Condensación o congelamiento en sistemas a baja temperatura.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Sustancias de trabajo

Dentro de las sustancias que se estudiarán para el aislamiento térmico son:

a. HIDROXIDO DE SODIO

- ✓ Fórmula: NaOH.
- ✓ Peso molecular: 40.01 g/mol
- ✓ Composición: Na: 57.48 %; H: 2.52 % y O: 40.00%
- ✓ Punto de ebullición: 1388°C (a 760 mm de Hg)
- ✓ Punto de fusión: 318.4 °C
- ✓ Índice de refracción a 589.4 nm: 1.433 (a 320 °) y 1.421 (a 420 °C)
- ✓ Presión de vapor: 1mm (739 °C)
- ✓ Densidad: 2.13 g/ml (25 °C)
- ✓ Solubilidad: Soluble en agua, alcoholes y glicerol, insoluble en acetona (aunque reacciona con ella) y éter. 1 g se disuelve en 0.9 ml de agua, 0.3ml de agua hirviendo, 7.2 ml de alcohol etílico y 4.2 ml de metanol.
- ✓ pH de disoluciones acuosas (peso/peso): 0.05 %:12; 0.5 %: 13 y 5 %: 14

b. HIDROSULFURO DE SODIO

- ✓ Nombre químico (IUPAC): Hidrosulfuro de sodio. (Sólido 70-74%) - NaHS (H₂O)
- ✓ Fórmula química: NaSH
- ✓ Sinónimos: Sulfhidrato de Sodio, Sulfuro de hidrógeno y sodio.
- ✓ Aspecto: Hojuelas higroscópicas sólidas.
- ✓ Color: Amarillo.
- ✓ Olor: Sulfuroso.

- ✓ pH: 11,9 @ 10 g/l @ 20°C (68°F).
- ✓ Punto de fusión: 35 55°C (95 131°F).
- ✓ Punto de ebullición: 115°C (239°F).
- ✓ Temperatura de descomposición: >90°C (194°F). El producto es pirofórico si la cristalización del agua es <25%.
- ✓ Punto de ignición: No aplica.
- ✓ Inflamabilidad (sólido, gas): No aplica.
- ✓ Propiedades explosivas: No aplica.
- ✓ Propiedades de oxidación: Efectos corrosivos del producto para contenedores no hechos de hierro o acero.
- ✓ Presión de vapor: No aplica.
- ✓ Densidad relativa: Gravedad específica (H₂O=1): 1,5 @ 16°C (60,8°F).
- ✓ Solubilidad: Agua: 500 600 g/l @ 20°C (68°F) (hidrólisis lenta)

3.1.2. Equipos e instrumentos de medición

- a. Termómetro registrador, para sensor la temperatura en diferentes puntos del proceso.
- b. Termómetro infrarrojo, para la medición exacta de temperaturas en zonas difíciles de conducción del fluido y material aislante.
- c. Caudalímetro electromagnético para líquidos, para medición de caudales instantáneos y volumen total.

Para mayor detalle, se especifica las características técnicas de los instrumentos de medición en el Anexo II

3.2. Método

La investigación a realizar es de tipo descriptivo y aplicativo, con estudio y evaluaciones de campo e información bibliográfica especializada, misma que está fundada en los principios básicos aplicativos de tecnologías de transferencia de calor, fórmulas experimentales, datos geográficos climatológicos y fundamentos de otras investigaciones relacionadas.

Comprende las siguientes etapas, por objetivo específico:

- a) Recopilación de información, relacionado con las condiciones de operación y requerimiento de los fluidos de trabajo, así como datos geográficos y climatológicos.
- b) Selección del tramo para el estudio del rendimiento energético del sistema de aislamiento.
- c) Cálculo y dimensionamiento del sistema de aislamiento.
- d) Medición de resultados, previa instalación del sistema de aislamiento por parte de la empresa responsable.
- e) Discusión y análisis de resultados para comprobar la hipótesis.
- f) Elaborar el informe de investigación.

3.2.1. Procedimiento de instalación de aislamiento térmico

- ✓ Preparación del área de trabajo, realizando limpieza, colocando señalización y retiro de interferencias existentes en el lugar.
- ✓ Las Tuberías, Accesorios y Equipos por Aislar deben estar libres de polvo, humedad, grasa, aceite, escoria, etc.
- ✓ Para la Instalación De Aislamiento – Tuberías Y Accesorios

- ✓ La instalación consistirá en preformados del aislante hecho a medida con diámetro interior y exterior fijo, el caño viene separado en dos longitudes de 1.1m, Según norma ASTM C-547, y el espesor será según Rev. 02 “General Specification 000-GC-P-013 - Piping and Tank Insulation”.
- ✓ El aislamiento en preformados, se usaran en todas las cañerías a modo de asegurar y facilitar mantenciones futuras.
- ✓ La fijación de los preformados del aislante se realizará con las uniones perimetral y longitudinal del caño.
- ✓ Posteriormente sujetara con alambre galvanizado n°16
- ✓ Cuando se requiera la colocación de varias capas de Aislamiento, estas se colocaran en forma traslapada, para evitar fuga de calor por las juntas.
- ✓ Instalación de Recubrimiento – Tuberías Y Accesorios
- ✓ El recubrimiento metálico consistirá en una cubierta de aluminio liso calidad AA3003 espesor será de 0.7mm para diámetros menores de 18” y 0.9mm para diámetros mayores de 18”.
- ✓ La fijación de estas se realizaran con tornillos autoroscantes zincado de 8x½” o remaches cada 150mm. En las uniones longitudinales.
- ✓ Secciones de recubrimiento adyacentes longitudinales se traslaparan en 75mm mínimo y en las costuras circunferenciales será de 75 mm mínimo.
- ✓ Las aberturas que se presenten por cuestiones propias de la instalación, serán cubiertas con un sellador a base de silicona.

3.3. Líneas de trabajo para la instalación del sistema de aislamiento

De acuerdo con la Figura 5, en el Anexo III se muestran las diferentes líneas del área del proyecto a ejecutar incluyendo las líneas de proceso del Hidrosulfuro de Sodio y el hidróxido de sodio.

En el cuadro 4 se muestra las diferentes secciones y líneas de tubería que concierne a los fluidos de trabajo, hidrosulfuro de sodio NaHS y al hidróxido de sodio NaOH; los cuales se representan por la designación de NA y SH respectivamente de acuerdo a la nomenclatura designada por la empresa ejecutora (ver Anexo IV):

De acuerdo con el cuadro 4, se tomará en cuenta para el estudio del aislamiento térmico, el ítem 16 para el hidróxido de sodio (NaOH) y el ítem 36 para el hidrosulfuro de sodio (NaHS); principalmente por la longitud de la línea de la tubería, así como el diámetro de la tubería.

3.4. Registro de parámetros y características de la zona en estudio para la instalación del sistema de aislamiento térmico para NaOH y NaSH

Cuadro 5. Parámetros, características y propiedades de los fluidos de trabajo y materiales a emplear en el estudio.

Propiedades y características	Hidroxido de sodio (NaOH – SH)	Hidrosulfuro de sodio (NaSH – NA)
Fluido de trabajo		
Temperatura de ingreso °C	Aprox. 40	Aprox. 40
Poder calorífico Cp (kJ/kg°C)	1.632	1.632
Densidad ρ (g/ml)	2.13	1.5
Viscosidad ν (m ² /s)	3.662 x 10 ⁻⁵	4.788 x 10 ⁻⁵
Flujo másico \dot{m} (kg/s)	0.362	0.416
Coefficiente de conducción térmica k (W/mK)	0.1748	0.1932
Tubería de conducción		
Tipo	Acero al Cromo 1Cr-V	Acero al Cromo 1Cr-V
Poder calorífico Cp (J/kgK)	443	443
Densidad ρ (kg/m ³)	7836	7836
Coefficiente de conducción térmica k (W/mK)	48.9	48.9
Diámetro nominal (pulgadas)	1 ½"	1 ½"
Aislante térmico		
Tipo a ($k = 0.032$ W/mK)	Lana de roca SPINTEX 342 G-70	Lana de roca SPINTEX 342 G-70
Tipo b ($k = 0.043$ W/mK)	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio
Tipo c ($k = 0.052$ W/mK)	Fibra mineral con aglomerante orgánico	Fibra mineral con aglomerante orgánico
Coefficiente de radiación del revestimiento metálico de aislamiento (W/ m ² K ⁴)	2.5 x 10 ⁻⁸	2.5 x 10 ⁻⁸
Condiciones climatológicas del lugar		
Velocidad del aire m/s (promedio)	2	2
Temperatura ambiente °C (promedio)	7	7

Fuente: Laboratorio de Minera Chinalco, 2014

CAPITULO IV

CALCULOS Y RESULTADOS

4.1. Cálculos para el aislamiento térmico de la tubería conductora de Hidróxido de sodio NaOH

4.1.1. Cálculo de la pérdida de calor por transferencia de la tubería sin aislamiento.

Se debe considerar el dibujo de la figura 21 y 22, para determinar la cantidad de calor que se pierde por la transferencia de calor de la tubería hacia la parte externa del ambiente, considerando los coeficientes de transferencia de calor por convección y conducción.

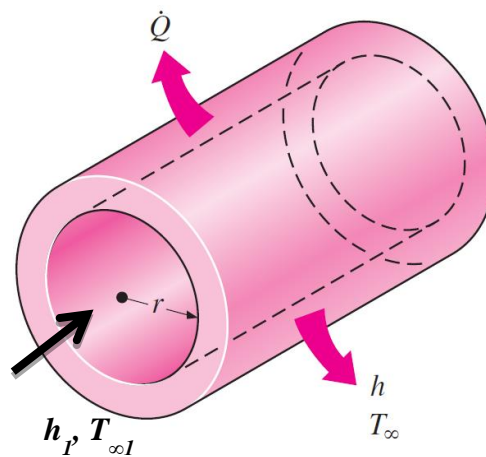
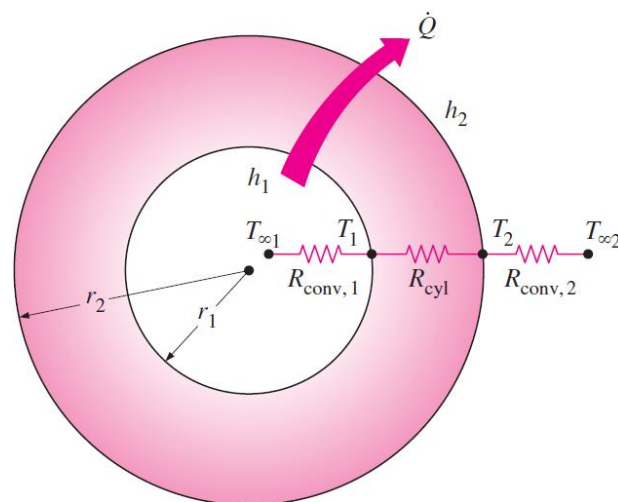


Figura 21. Tubería que conduce NaOH y pierde calor al exterior



$$R_{\text{total}} = R_{\text{conv},1} + R_{\text{cyl}} + R_{\text{conv},2}$$

Figura 22. Red de resistencias térmicas para la tubería

Para determinar R_1 convectivo, debemos considerar la ecuación 7, para caracterizar al fluido si es laminar o turbulento, por lo que se debe evaluar el Re , sin embargo la velocidad del fluido se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$Q = AV = \rho \dot{m}$$

, donde Q : es el caudal del fluido, A es el área de la sección transversal, considerando que el D_{externo} es 48.3 mm (0.0483m) y D_{interno} es 40.9mm (0.0409m) y convirtiendo las unidades de densidad y flujo del cuadro 5, se tiene:

$$(2130 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{\pi}{4}\right) (0.0409 \text{ m})^2 V = (0.362 \text{ kg/s})$$

$$V = 0.129 \text{ m/s}$$

Por lo que el número de Re , se obtiene de la ecuación 17, reemplazando:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\left(0.129 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(0.0409\text{m})}{3.662 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 144.48$$

Por lo que el flujo es laminar; teniendo en cuenta esto, el número de Nusselt completamente desarrollado para tuberías circulares y considerando temperatura superficial constante, y de acuerdo a la ecuación 25, se tiene:

$$Nu = \frac{hD}{k_f} = 3.66$$

$$h = 3.66 \frac{k}{D} = 3.66 \frac{(0.1748 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}})}{0.0409 \text{ m}}$$

$$h = 15.64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Siendo la resistencia convectiva 1:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1 h_1} = \frac{1}{\pi(0.0409 \text{ m})(15.64 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})}$$

$$R_1 = 0.4976 \frac{m^\circ C}{W}$$

Para determinar el R conductivo 2 de la tubería se considera la ecuación 7, en función de la longitud, se tiene:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot k} = \frac{\ln(\frac{0.0483}{0.0409})}{2 \cdot \pi \cdot (48.9)}$$

$$R_2 = 0.0005614 \frac{m^\circ C}{W}$$

Para determinar el h convectivo total externo, se considera el h por radiación y el h por convección. Para el h por radiación se considera la ecuación 12, por lo que se tiene que:

$$h_r = \left(\frac{T_s^4 - T_\infty^4}{T_s - T_\infty} \right) \cdot C_r \quad W/m^2K$$

Siendo $C_r =$ de $2.5 \times 10^{-8} \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K}^4)$, para este tipo de material, y de acuerdo a datos de Laboratorio de Minera Chinalco (2014), se considera una temperatura superficial, sin aislamiento de 15°C (288K), por lo que:

$$h_r = \left(\frac{288^4 - 280^4}{288 - 280} \right) \cdot (2.5 \times 10^{-8}) \text{ W/m}^2K$$

$$h_r = 2.3 \text{ W/m}^2K$$

Para determinar el h convectivo 2 se considera las propiedades del aire a temperatura ambiente, 7°C, determinando en primer lugar el Re ; siendo:

$$\nu = 1.74265 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V = 2 \text{ m/s}$$

$$D_{\text{externo}} = 0.0483 \text{ m}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(0.0483 \text{ m})}{1.74265 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 5543.28$$

Por lo que al flujo de aire sobre la tubería se considera turbulento. Para determinar el número de Nusselt, se considera convección forzada sobre cilindros circulares, ecuación 25, por lo que:

$$N_{U,cil} = \frac{hD}{k_f} = C Re^m Pr^n$$

Y utilizando el cuadro 3 y reemplazando los valores, se tiene que:

$$N_{U,cil} = C Re^m Pr^n = 0.193 (5543.28)^{0.618} (0.735)^{1/3}$$

$$N_{U,cil} = 35.86 = \frac{hD}{k_f}$$

$$h = 35.86 \frac{k_f}{D} = 35.86 \frac{(0.0242 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}})}{0.0483 \text{ m}}$$

$$h = 17.967 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Por lo que, el h convectivo total es:

$$h = (2.3 + 17.967) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

$$h = 20.27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Siendo la resistencia convectiva 3:

$$R_3 = \frac{1}{2\pi r_2 h} = \frac{1}{\pi(0.0483 \text{ m})(20.27 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})}$$
$$R_3 = 0.325 \frac{m^\circ C}{W}$$

De acuerdo a la figura 22, la resistencia térmica total del sistema es:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3$$
$$R_{total} = (0.4976 + 0.0005614 + 0.325) \frac{m^\circ C}{W}$$
$$R_{total} = 0.8232 \frac{m^\circ C}{W}$$

Entonces, la cantidad de calor perdido por unidad longitud, es:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad W/m$$

, trabajando con una temperatura interior de 40°C y una temperatura ambiente de 7°C, reemplazando se tiene:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad W/m$$
$$q_l = \frac{(40 - 7)}{0.8232} \quad W/m$$
$$q_l = 40.1 \quad W/m$$

Este último dato representa la pérdida de calor por unidad de longitud, es decir, la cantidad de energía que se pierde por cada metro de tubería instalada bajo los parámetros y características del sistema.

De acuerdo con el cuadro 4, la cantidad total de tubería para el transporte de este fluido es de 93.3 metros, por lo el calor total perdido, es de:

$$Q_{NaOH} = (40.1 \frac{W}{m})(93.30 m)$$

$$Q_{NaOH} = 3741.33 W$$

4.1.2. Cálculo de la pérdida de calor por transferencia de la tubería con aislamiento

Para poder seleccionar y aproximar el espesor del aislante, se toma como referencia dos aspectos importantes. Primero se considera la figura 15 y la ecuación 39, la cual se escribe como:

$$\frac{C'}{C''} = 2 \cdot k \left[\left(\frac{(T_{\infty 1} - T_a)}{q} \right) - \frac{1}{h_e} \right]$$

, donde $C'' = D_e \cdot \ln \frac{r_e}{r}$

Reemplazando valores se tiene:

$$C' = 0.0483 \ln \left(\frac{0.0483}{0.0409} \right) 2(48.9) \left[\left(\frac{(40 - 7)}{264.27} \right) - \frac{1}{20.27} \right]$$

$$C' = 0.089$$

Con la constante determinada y el diámetro externo de tubería se ingresa al diagrama de la figura 15, obteniendo para ello un espesor de aislamiento, de manera aproximada, de 35 mm (por lo que se puede iniciar los cálculos a partir de este dato) En el acápite 2.5., del espesor óptimo económico de aislamiento se especifican los espesores recomendados bajo ciertas características en grados de aislamientos en la industria.

Se debe considerar el dibujo de la figura 23, para determinar la cantidad de calor que se pierde por la transferencia de calor de la tubería hacia la parte externa del ambiente con el aislamiento instalado en el sistema.

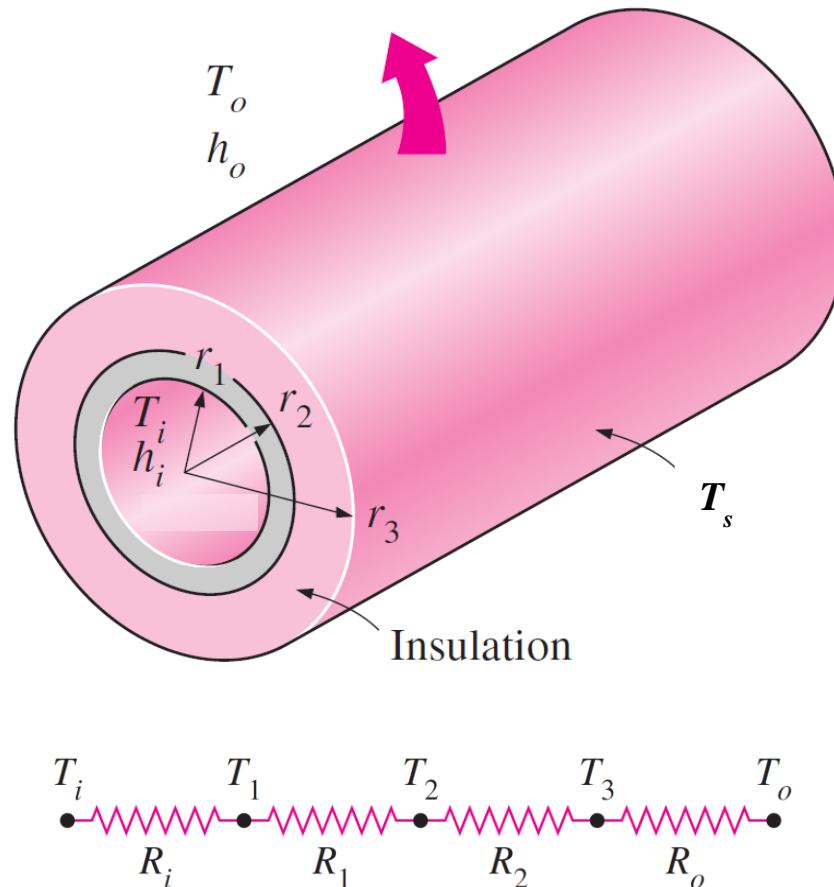


Figura 23. Red de resistencias térmicas para la tubería con aislamiento
Tanto R_i convectivo como R_1 conductivo tienen los mismos valores con sus similares, cuando se analiza con y sin aislamiento, por lo que:

$$R_i = 0.4976 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_1 = 0.0005614 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Para determinar R_2 conductivo del aislamiento se considera la ecuación 7 y de acuerdo a la figura, en función de la longitud y el tipo de aislante:

$$\text{Lana de Roca: } R_{2a} = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot k_2} = \frac{\ln\left(\frac{0.1183}{0.0483}\right)}{2 \cdot \pi \cdot (0.032)} = 4.455 \frac{m^\circ C}{W}$$

$$\text{Fibra mineral: } R_{2b} = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot k_2} = \frac{\ln\left(\frac{0.1183}{0.0483}\right)}{2 \cdot \pi \cdot (0.043)} = 3.32 \frac{m^\circ C}{W}$$

$$\text{Fibra de vidrio: } R_{2c} = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot k_2} = \frac{\ln\left(\frac{0.1183}{0.0483}\right)}{2 \cdot \pi \cdot (0.052)} = 2.74 \frac{m^\circ C}{W}$$

Para determinar el h convectivo total externo, se considera el h por radiación y el h por convección. Para el h por radiación se considera la ecuación 12, por lo que se tiene que:

$$h_r = \left(\frac{T_s^4 - T_\infty^4}{T_s - T_\infty} \right) \cdot C_r \quad W/m^2K$$

Siendo $C_r =$ de $2.5 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, para un revestimiento con chapa de aluminio, y de acuerdo a datos de Laboratorio de Minera Chinalco (2014), se considera una temperatura superficial, con aislamiento (de acuerdo a experiencia para una aproximación inicial de 9°C (282K), por lo que:

$$h_r = \left(\frac{282^4 - 280^4}{282 - 280} \right) \cdot (2.5 \times 10^{-8}) \text{ W}/m^2K$$

$$h_r = 2.22 \text{ W}/m^2K$$

Para determinar el h convectivo 2 se considera las propiedades del aire a temperatura ambiente, 7°C , determinando en primer lugar el Re ; siendo:

$$\nu = 1.74265 \times 10^{-5} \text{ m}^2/s$$

$$V = 2 \text{ m/s}$$

$$D_{\text{externo}} = 0.1483 \text{ m}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\left(2 \frac{m}{s}\right)(0.1183 m)}{1.74265 \times 10^{-5} m^2/s}$$

$$Re = 13577$$

Por lo que al flujo de aire sobre la tubería se considera turbulento. Para determinar el número de Nusselt, se considera convección forzada sobre cilindros circulares, ecuación 25, por lo que:

$$N_{U,cil} = \frac{hD}{k_f} = C Re^m Pr^n$$

Y utilizando el cuadro 3 y reemplazando los valores, se tiene que:

$$N_{U,cil} = C Re^m Pr^n = 0.193 (13577)^{0.618} (0.735)^{1/3}$$

$$N_{U,cil} = 62.38 = \frac{hD}{k_f}$$

$$h_a = 62.38 \frac{k_f}{D} = 62.38 \frac{(0.0242 \frac{W}{m^{\circ}C})}{0.1183 m}$$

$$h = 12.76 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

Por lo que, el h convectivo total es:

$$h = (2.22 + 12.76) \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

$$h = 14.98 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

Siendo la resistencia convectiva R_0 :

$$R_0 = \frac{1}{2\pi r_1 h_1} = \frac{1}{\pi(0.1183 m)(14.98 \frac{W}{m^2^{\circ}C})}$$

$$R_0 = 0.18 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

De acuerdo a la figura 22, la resistencia térmica total del sistema para cada tipo de aislante es:

$$R_{total} = R_i + R_1 + R_2 + R_0$$

$$R_{total,a} = (0.4976 + 0.0005614 + 4.455 + 0.18) = 5.13 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_{total,b} = (0.4976 + 0.0005614 + 3.32 + 0.18) = 4.0 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_{total,c} = (0.4976 + 0.0005614 + 2.74 + 0.18) = 3.42 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Entonces, la cantidad de calor perdido por unidad longitud, es:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad W/m$$

, trabajando con una temperatura interior de 40°C y una temperatura ambiente de 7°C, reemplazando se tiene:

$$q_{la} = \frac{(40 - 7)}{5.13} = 6.43 \quad W/m$$

$$q_{lb} = \frac{(40 - 7)}{3.32} = 9.94 \quad W/m$$

$$q_{lc} = \frac{(40 - 7)}{2.74} = 12.04 \quad W/m$$

Estos últimos datos representan la pérdida de calor por unidad de longitud, es decir, la cantidad de energía que se pierde por cada metro de tubería instalada bajo los parámetros y características del sistema.

De acuerdo con el cuadro 4, la cantidad total de tubería para el transporte de este fluido es de 93.30 metros, por lo el calor total perdido para cada tipo de aislante, es de:

$$Q_{\text{lana de roca}} = \left(6.43 \frac{W}{m}\right) (93.3 m) = 600W$$

$$Q_{\text{fibra mineral}} = \left(9.94 \frac{W}{m}\right) (93.3 m) = 927.4W$$

$$Q_{\text{fibra de vidrio}} = \left(12.04 \frac{W}{m}\right) (93.3 m) = 1123W$$

4.1.3. Calculo de la eficiencia para cada tipo de aislamiento

Se puede obtener de la siguiente relación:

$$\eta = \left(\frac{Q_{\text{sin aislamiento}} - Q_{\text{con aislamiento}}}{Q_{\text{sin aislamiento}}} \right) \times 100\%$$

Reemplazando,

$$\eta_a = \left(\frac{3741.33 - 600}{3741.33} \right) \times 100\% = 83.96\%$$

$$\eta_b = \left(\frac{3741.33 - 927.4}{3741.33} \right) \times 100\% = 75.21\%$$

$$\eta_c = \left(\frac{3741.33 - 1123}{3741.33} \right) \times 100\% = 70\%$$

De acuerdo a estos resultados, la lana de roca es el material aislante más eficiente en comparación con los otros tipo de aislante, considerando que para la eficiencia de aislamiento, se tiene un 83.96%, que de acuerdo a los parámetros analizados, es el más indicado.

4.1.4. Calculo económico para el análisis del sistema con y sin aislamiento

A partir de aquí, solo se analiza para el aislante Lana de roca. La pérdida total de energía en el transporte de hidróxido de sodio con la tubería expuesta es de 3741.33 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 3741.33 \frac{J}{s} = 13468.79 \frac{KJ}{h}$$

Por lo que la cantidad total de energía perdida al año es de:

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 13468.79 \frac{KJ}{h} * 8640 \frac{h}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = \mathbf{116370328.3} \frac{KJ}{\text{año}}$$

La pérdida total de energía en el transporte de hidróxido de sodio con la tubería aislada es de 600 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 600 \frac{J}{s} = 2160 \frac{KJ}{h}$$

Siendo la pérdida total al año de:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 2160 \frac{KJ}{h} * 8640 \frac{h}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{con aislamiento}} = \mathbf{18662400} \frac{KJ}{\text{año}}$$

Siendo el ahorro en energía anual, de:

$$\text{Ahorro Energético} = 116370328.3 - 18662400$$

$$\text{Ahorro Energético} = 97707928.3 \frac{KJ}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro Energético} = \mathbf{92627116.03} \frac{BTU}{\text{año}}$$

De acuerdo con el área de procesos y los datos obtenidos sobre los costos de operación de la empresa, se tiene que el costo de Lana de roca SPINTEX 342 G-70 de 35 mm de espesor es de U\$ 11.5/ pie² (incluido mano de obra) y el costo del calor generado es de U\$ 55/ millón de BTU.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, el ahorro económico del sistema de aislamiento sería de:

$$\text{Ahorro Económico} = 92627116.03 \frac{\text{BTU}}{\text{año}} * \frac{\text{U\$ } 55}{\text{millón de BTU}}$$

$$\text{Ahorro Económico} = \frac{\text{U\$ } 5094.5 *}{\text{año}}$$

La inversión total del sistema de aislamiento, esta función del área superficial, el cual sería:

$$\text{Inversión total} = A_{sup.} * \text{costo unitario}$$

$$\text{Inversión total} = (\pi DL_{total}) * \text{costo unitario}$$

$$\text{Inversión total} = \pi(0.1183m)(93.3m) * \frac{\text{U\$ } 11.5}{\text{pie}^2} * \frac{10.76\text{pie}^2}{1\text{m}^2}$$

$$\text{Inversión total} = \text{U\$ } 4290.68 \text{ dólares}$$

4.1.5. Calculo del espesor óptimo económico del aislante seleccionado

Para determinar el espesor adecuado es necesario repetir los cálculos anteriores para el aislante con diferentes espesores. Estos datos se muestran en el siguiente cuadro (considerando los costos del aislante de acuerdo a datos de la empresa):

Cuadro 6. Variación del costo total del aislamiento con el espesor

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (U\$/pie ²)	Perdida de calor (W)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de perdida de calor (U\$/año)	Costo del aislamiento (U\$)	Costo total
17.5	8.8	883.57	76.38	1432.94	2984.82	4417.76
30	9.5	653.00	82.54	1059.00	3235.87	4294.87
35	11.5	600.00	83.96	973.06	4290.68	5263.74
40	12.4	555.56	85.15	901.31	4978.45	5879.76
50	14.2	493.56	86.80	844.34	6641.61	7485.95

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la figura 24, el costo total de aislamiento es mínimo para un aislamiento con espesor entre 25 y 30 mm, sin embargo por ser comercial se elige el de 30 mm. El periodo de recuperación de la inversión, sería:

$$PRI = \text{Inversión total} / \text{Ahorro económico}$$

$$PRI = U\$ 4294.06 / (U\$ 5377.36 / \text{año})$$

$$PRI = 0.798 \text{ años} = 9.6 \text{ meses}$$

4.1.6. Calculo de la caída de temperatura de la tubería más larga

Dentro del sistema de tuberías para el Hidróxido de sodio, se considera el tramo más largo, de acuerdo con el cuadro 4, corresponde a la sección 1-1/2"-SH-286-018-S1-HC, que tiene una longitud de 20.83 m

Considerando las ecuaciones 39 y 40, se tiene que:

$$T_f - T_a = (T_{\infty 1} - T_a) \cdot e^{-\alpha} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha = \frac{hA_s}{\dot{m} \cdot C_p}$$

, reemplazando para α , se tiene:

$$\alpha = \frac{(20.83)}{(0.362)(1632)(5.13)}$$

$$\alpha = 0.00687$$

Por lo que la temperatura final del fluido en la tubería es de:

$$T_f - 7 = (40 - 7) \cdot e^{-0.00687} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_f = 39.76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teniendo una caída de 0.24°C para una longitud de 20.83 m de tubería, siendo éste el tramo más largo en el transporte del hidróxido de sodio.

4.2. Cálculos para el aislamiento térmico de la tubería conductora de Hidrosulfuro de sodio NaSH

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculos para el acápite 4.1. y sabiendo que el espesor óptimo es de 30 mm; se obtiene los siguientes resultados (Ver cálculos completos en Anexo V)

4.2.1. Cálculo de la pérdida de calor por transferencia de la tubería sin aislamiento.

$$R_1 = 0.45 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_2 = 0.0005614 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_3 = 0.325 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

De acuerdo a la figura 22, la resistencia térmica total del sistema es:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{total} = (0.45 + 0.0005614 + 0.325) \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_{total} = 0.776 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Entonces, la cantidad de calor perdido por unidad longitud, es:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad W/m$$

$$q_l = 42.53 \quad W/m$$

Este último dato representa la pérdida de calor por unidad de longitud, es decir, la cantidad de energía que se pierde por cada metro de tubería instalada bajo los parámetros y características del sistema.

De acuerdo con el cuadro 4, la cantidad total de tubería para el transporte de este fluido es de 71.9 metros, por lo el calor total perdido, es de:

$$Q = (42.53 \frac{W}{m})(71.90 m)$$

$$Q = 3057.91 W$$

4.2.2. Cálculo de la pérdida de calor por transferencia de la tubería con aislamiento

$$R_i = 0.45 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_1 = 0.0005614 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_2 = 4.0 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_0 = 0.19 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

De acuerdo a la figura 22, la resistencia térmica total del sistema es:

$$R_{total} = R_i + R_2 + R_3 + R_0$$

$$R_{total} = (0.45 + 0.0005614 + 4.0 + 0.19) \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_{total} = 4.64 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Entonces, la cantidad de calor perdido por unidad longitud, es:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad W/m$$

$$q_l = 7.11 W/m$$

Este último dato representa la pérdida de calor por unidad de longitud, es decir, la cantidad de energía que se pierde por cada metro de tubería instalada bajo los parámetros y características del sistema.

De acuerdo con el cuadro 4, la cantidad total de tubería para el transporte de este fluido es de 71.90 metros, por lo el calor total perdido, es de:

$$Q_{NaSH} = \left(7.11 \frac{W}{m}\right)(71.90 m)$$

$$Q_{NaSH} = 511.21 W$$

4.2.3. Calculo de la eficiencia del aislamiento

Se puede obtener de la siguiente relación:

$$\eta = \left(\frac{Q_{\text{sin aislamiento}} - Q_{\text{con aislamiento}}}{Q_{\text{sin aislamiento}}} \right) \times 100\%$$

Reemplazando,

$$\eta = \left(\frac{3057.91 - 511.21}{3057.91} \right) \times 100\%$$

$$\eta = 83.28\%$$

4.2.4. Calculo de la caída de temperatura de la tubería más larga

Dentro del sistema de tuberías para el Hidrosulfuro de sodio, se considera el tramo más largo, de acuerdo con el cuadro 4, corresponde a la sección 1-1/2"-NA-286-003-S1-HC, que tiene una longitud de 20.60 m

Considerando las ecuaciones 39 y 40, se tiene que:

$$T_f = 39.73 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teniendo una caída de 0.27°C para una longitud de 20.6 m de tubería, siendo éste el tramo más largo en el transporte del hidrosulfuro de sodio.

4.2.5. Calculo económico para el análisis del sistema con y sin aislamiento

La pérdida total de energía en el transporte de hidrosulfuro de sodio con la tubería expuesta es de 3057.91 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 95113267.20 \frac{\text{KJ}}{\text{año}}$$

La pérdida total de energía en el transporte de hidróxido de sodio con la tubería aislada es de 383.95 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 511.21 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1840.35 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

Siendo la pérdida total al año de:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 15900675.84 \frac{\text{KJ}}{\text{año}}$$

Siendo el ahorro en energía anual, de:

$$\text{Ahorro Energético} = 75093536.61 \frac{\text{BTU}}{\text{año}}$$

El ahorro económico del sistema de aislamiento sería de:

$$\text{Ahorro Económico} = 75093536.61 \frac{\text{BTU}}{\text{año}} * \frac{\text{U\$ } 55}{\text{millón de BTU}}$$

$$\text{Ahorro Económico} = \frac{\text{U\$ } 4130.14}{\text{año}}$$

La inversión total del sistema de aislamiento, esta función del área superficial, el cual sería:

$$\text{Inversión total} = \pi(0.108\text{m})(71.9\text{m}) * \frac{\text{U\$ } 9.5}{\text{pie}^2} * \frac{10.76\text{pie}^2}{1\text{m}^2}$$

$$\text{Inversión total} = \text{U\$ } 2493.67 \text{ dólares}$$

Por lo que el periodo de recuperación de la inversión, sería:

$$\text{PRI} = \frac{\text{Inversión total}}{\text{Ahorro económico}}$$

$$\text{PRI} = 0.6 \text{ años} = 7.24 \text{ meses}$$

4.3. Resultados obtenidos

Cuadro 6: cuadro resumen de los resultados obtenidos del estudio del sistema de aislamiento para el NaOH y NaSH

Resultado obtenido	FLUIDO DE TRABAJO	
	Hidróxido de sodio NaOH	Hidrosulfuro de sodio NaSH
Espesor del aislante óptimo (mm)	30	30
Calor perdido sin aislamiento (W/m)	40.1	42.53
Calor perdido con aislamiento (W/m)	6.43	7.11
Eficiencia de aislamiento (%)	83.96	83.28
Caída de temperatura del fluido dentro del tramo más largo de tubería (°C)	0.24	0.27
Ahorro energético (BTU/año)	92' 627 116.03	75' 093 536.61
Ahorro económico (U\$/año)	5094.5	4130.14
Inversión total del sistema de aislamiento (U\$)	4290.68	2493.67
Periodo de recuperación de la inversión (año)	0.8 (9.6 meses)	0.6 (7.24 meses)

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7: cuadro resumen comparativo de los resultados obtenidos del estudio del sistema de aislamiento para el **NaOH**.

Resultado obtenido	AISLANTES SELECCIONADOS		
	Lana de Roca	Fibra Mineral	Fibra de Vidrio
Calor perdido sin aislamiento (W/m)	40.1	40.1	40.1
Calor perdido con aislamiento (W/m)	6.43	9.94	12.04
Eficiencia de aislamiento (%)	83.96	75.21	70
Calor perdido al año con aislamiento(Kj/año)	18 662 400	28 833 408	34 929 792
Ahorro energético (BTU/año)	92' 627 116.03	82' 968 981.2	77' 190 724.8
Ahorro económico (U\$/año)	5094.5	4563.24	4245.45

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 8: cuadro resumen comparativo de los resultados obtenidos del estudio del sistema de aislamiento para el **NaSH**.

Resultado obtenido	AISLANTES SELECCIONADOS		
	Lana de Roca	Fibra Mineral	Fibra de Vidrio
Calor perdido sin aislamiento (W/m)	42.53	42.53	42.53
Calor perdido con aislamiento (W/m)	7.11	8.33	9.76
Eficiencia de aislamiento (%)	83.28	80.4	77.01
Calor perdido al año con aislamiento(Kj/año)	15 900 675.84	18 634 061.8	21 832 762.6
Ahorro energético (BTU/año)	75' 093 536.61	72' 488 300.22	69' 456 516.84
Ahorro económico (U\$/año)	4130.14	3986.84	3820.08

Fuente: elaboración propia.

4.4. Datos de operación de los tramos más largos de la tubería de conducción de Hidróxido de Sodio e Hidrosulfuro de Sodio

Según el cuadro 9, se obtiene los promedios para cada día de operación del Hidróxido de sodio. Haciendo una comparación con los datos supuestos y obtenidos durante el análisis, respecto a la temperatura de salida, hay una caída de 2 °C por lo que no tiene mucha diferencia con los cálculos obtenidos Como se puede apreciar en el cuadro 11, registrando valores próximos en los cálculos.

Cuadro 11: Promedio de Temperaturas en °C para el NaOH

Día	Temperatura de ingreso	Temperatura de salida	Temperatura ambiente	Temperatura superficial
1	41	38	11	11
2	40	37	11	11
3	39	39	11	11
4	39	38	10	10
5	40	38	11	11
6	39	38	10	10
7	40	38	10	10
8	40	37	11	11
9	39	38	11	11
10	40	38	11	11
11	40	38	11	11
12	40	38	9	10
13	40	38	11	11
14	40	37	10	10
15	40	37	10	10
16	41	37	10	10
17	41	38	10	10
18	41	38	9	9
19	40	37	10	10
20	40	37	11	11
PROMEDIO	40	38	10	10

Fuente: elaboración propia

De igual manera, el cuadro 12 muestra los promedios de las temperaturas de operación para el Hidrosulfuro de sodio. Aquí se puede apreciar que la caída de temperatura es de apenas 1°C y la temperatura superficial del sistema de aislamiento es igual a la temperatura ambiente, permitiendo menos pérdidas en el sistema instalado.

Cuadro 12: Promedio de Temperaturas en °C para el NaSH

Día	Temperatura de ingreso	Temperatura de salida	Temperatura ambiente	Temperatura superficial
1	41	39	11	11
2	41	39	11	11
3	40	39	11	11
4	39	39	10	10
5	40	40	11	11
6	40	39	10	10
7	39	39	10	10
8	40	38	11	11
9	40	38	11	10
10	41	38	11	11
11	40	39	11	11
12	40	39	9	10
13	40	38	11	11
14	39	38	10	10
15	40	38	10	10
16	41	39	10	10
17	40	39	10	10
18	40	38	9	9
19	40	38	10	10
20	39	38	11	11
PROMEDIO	40	39	10	10

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- ✓ El estudio presenta dos fluidos de trabajo, el Hidróxido de sodio NaOH y el Hidrosulfuro de Sodio NaSH, los cuales son transportados en tuberías de 93.3m y 71.9 m de longitud respectivamente con un diámetro de 1 ½ pulgadas, cuyas características térmicas se aprecian en el cuadro 5. Cabe mencionar que la tubería es de Acero al Cromo 1Cr-V que son muy resistentes a la corrosión y son usados como aceros inoxidables, de buenas características en el uso y aplicación de estos fluidos.
- ✓ El material utilizado como aislante del sistema de tuberías es Lana de roca SPINTEX 342 G-70 muy utilizado en este tipo de industria, cuya conductividad térmica es de 0.032 W/mK. Además de estas excelentes propiedades térmicas, la seguridad que presenta es muy importante en este tipo de procesos, cuya exigencia es alta.
- ✓ El espesor óptimo económico encontrado es de 30 mm, el cual se encuentra dentro del segundo grado de espesor de aislamiento, denominado como espesor técnico; en donde toma en cuenta las características técnicas de aislamiento, y las exigencias ambientales en las actividades de extracción productiva como es la Minería, porque se enfoca en reducir la pérdida de calor en lo máximo posible, proteger el medio ambiente y prevenir accidentes y lesiones en los trabajadores.
- ✓ Con el uso del material mencionado como aislante térmico y empleando un espesor de 30 mm, el sistema de transporte de NaOH, presenta un 83.96% en la eficiencia de aislamiento, mientras que el sistema de transporte de NaSH, presenta un 83.28%, permitiendo que se conserve, en su totalidad, el calor necesario para su posterior aplicación.

- ✓ Para el transporte de hidróxido de sodio el ahorro energético anual es de 92' 627 116.03 BTU, lo que equivale en un ahorro económico de U\$ 5377 al año; siendo la inversión total del sistema de aislamiento para este fluido U\$ 4294; recuperándose la inversión en 0.8 años, lo que equivale aproximadamente a 9.6 meses. Mientras que para el transporte de hidrosulfuro de sodio, el ahorro energético anual es de 75' 093 536.61 BTU, lo que equivale en un ahorro económico de U\$ 4130.14 al año; siendo la inversión total del sistema de aislamiento para este fluido U\$ 2493.67; recuperándose la inversión en 0.6 años, lo que equivale aproximadamente a 7.24 meses.

5.2. Recomendaciones

- ✓ Es importante tomar en consideración el aislamiento en el transporte de fluidos de baja temperatura, que si bien es cierto, a menor longitud, no tiene muchas pérdidas energéticas; es importante considerar la seguridad de fluidos de alto riesgo, así como la suma total de la longitud de las tuberías dentro del sistema de transporte.
- ✓ Se debe considerar, en estudios posteriores, la formación de película del condensado en la parte externa del aislante para evidenciar el efecto dentro del sistema.
- ✓ Tomar en cuenta el clima del lugar, ya que en algunos casos, la temperatura ambiente desciende de forma brusca, así como la velocidad del aire, incrementado las pérdidas por convección externa.
- ✓ Cabe mencionar que el tiempo de vida útil del aislante térmico, de acuerdo al fabricante, es de 10 -15 años, por lo que se tendría que hacer un seguimiento posterior en su etapa de operación.

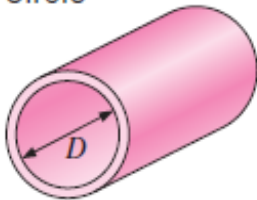
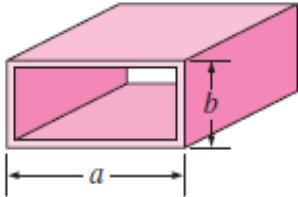
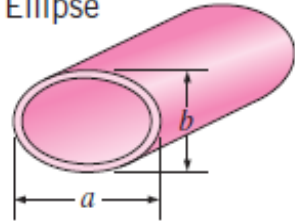
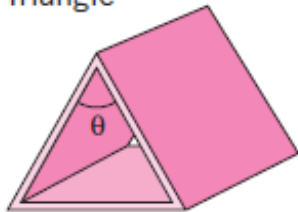
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ATECOS. Asistente técnico para la Construcción Sostenible. Aislamiento térmico en las instalaciones. España.
2. Cengel Yunus, 2004. Transferencia de calor. Segunda edición McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
3. CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía). 2009. Beneficios del aislamiento térmico en la industria. V.1.1. México.
4. Corporación Interamericana de Inversiones CII 2009. Reducción de facturación de combustibles fósiles a través del uso racional de la energía: Aislamiento térmico en sistemas de vapor. Miembro del grupo BID.
5. Donald Q. Kern. 1999. Procesos de Transferencia de Calor. Trigésima primera reimpresión Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V México, D.F
6. FENERCOM, 2012. Guía sobre materiales aislantes y eficiencia energética. M 22.032.2012. Madrid.
7. IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007. Diseño y Cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. E-28004. Madrid.
8. Incropera Frank, 2011. Fundamentos de Transferencia de calor y masa. Séptima edición, Macmillan Company USA
9. ITW Insulation Systems. 2013. Guía de instalación del aislamiento de marca XPS PIB ITW *insulation systems*.
10. Limone C. 2012. Tesis: Diseño e instalación de aislante térmico en tuberías y equipos. Universidad Simón Bolívar.

- 11.ISOVER, 2008. División Aislamientos. Manual de aislamiento en la Industria. Industria, 608-612. 08918 Badalona.
- 12.Monteagudo Y. y Perez J. 1998. Aislamiento Térmico de Tuberías con Acompañamiento de Vapor. Universidad De Cienfuegos. Cuba
- 13.UNINET, Normas Oficiales Mexicanas ENER. 1995. Eficiencia energética en aislamientos térmicos industriales. NOM-009-ENER-1995.

ANEXO I

Nusselt number and friction factor for fully developed laminar flow in tubes of various cross sections ($D_h = 4A_c/p$, $Re = \rho V_m D_h / \mu$, and $Nu = hD_h/k$)

Tube Geometry	a/b or θ°	Nusselt Number		Friction Factor f
		$T_s = \text{Const.}$	$\dot{q}_s = \text{Const.}$	
Circle 	—	3.66	4.36	64.00/Re
Rectangle 	a/b 1 2 3 4 6 8 ∞	2.98 3.39 3.96 4.44 5.14 5.60 7.54	3.61 4.12 4.79 5.33 6.05 6.49 8.24	56.92/Re 62.20/Re 68.36/Re 72.92/Re 78.80/Re 82.32/Re 96.00/Re
Ellipse 	a/b 1 2 4 8 16	3.66 3.74 3.79 3.72 3.65	4.36 4.56 4.88 5.09 5.18	64.00/Re 67.28/Re 72.96/Re 76.60/Re 78.16/Re
Triangle 	θ 10° 30° 60° 90° 120°	1.61 2.26 2.47 2.34 2.00	2.45 2.91 3.11 2.98 2.68	50.80/Re 52.28/Re 53.32/Re 52.60/Re 50.96/Re

ANEXO II

A. CAUDALIMETRO ELECTROMAGNETICO *para LIQUIDOS*

Mide Caudal Instantáneo y Volumen Total. Opera perfectamente en cañerías parcialmente llenas. Resiste altas temperaturas hasta 180°C, y altas presiones hasta 300 bar, líquidos abrasivos o erosivos, limpieza CIP y esterilización con vapor. No ofrece restricción al paso de líquidos conductores de la electricidad aun cuando son viscosos, sucios o arrastran sólidos en suspensión. Se fabrica desde ¾" a 40". Gran variedad de materiales para revestimiento interno y electrodos.



Aptos para operación con paneles solares.

Instalación: Cañerías ¾" a 40".

Exactitud: 0,5% de la lectura.

Construcción: Bridados, Wafer, Sanitarios, Roscados, en Acero Inoxidable AISI 316, Electrodo de Titanio, Hastelloy C o Ac. Inox. AISI 316, Revestimiento interno de PVC, Cerámica, Polipropileno.

Alimentación: 220/110 VCA (Opcional: 24 V CA ó 24 V CC).

Salidas: analógica de 4 a 20 mA, digital 0 a 5000 Hz.

Exactitud: ± 1% de la lectura.

Apto: hasta 180°C, 300 bar. Unidad electrónica: Intrínsecamente Segura.

3-Microcaudalímetro para tuberías de 2 mm a 12 mm.

4-Aplicaciones altamente corrosivas y altas temperaturas.

B. TERMÓMETRO DE 2 CANALES CON VALORACIÓN DE LOS VALORES DE MEDICIÓN

Este equipo es un medidor de temperatura de dos canales de alta precisión que usa sensores Pt100. Gracias a la tecnología de 4 hilos el tiempo de respuesta es muy rápido y la precisión está garantizada. El rango de medición alcanza desde -200 hasta +800°C. El software amplio y de fácil manejo le permite una valoración sencilla y ver los valores de medición en tiempo real. Puede ajustar valores límite para que suene una señal acústica al sobrepasar tales límites.



- Registrador de temperatura de 2 canales (°C / °F)
- Desconexión automática
- Software incluido
- Memoria de 10.000 registros por canal
- Reloj en tiempo real con calendario
- Ajuste acústico para alarma alta y baja

C. TERMÓMETRO INFRARROJO CON ÓPTICA DE PRECISIÓN, PUNTERO LÁSER Y ENTRADA PARA TERMOELEMENTOS TIPO K

El termómetro infrarrojo PCE-IR 425 dispone de un marcador láser doble y de una entrada termopar para una amplia variedad de sensores de temperatura tipo K. Dispone de una resolución óptica de 50:1 lo que le permite una medición de temperatura precisa y sin contacto de superficies



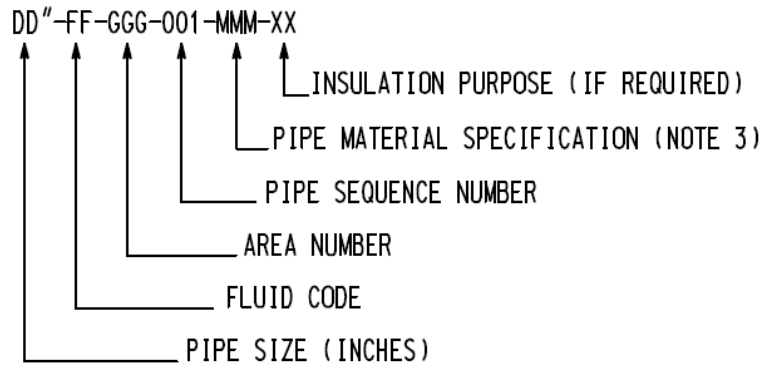
muy pequeñas. Además permite activar a la vez los límites inferior y superior de alarma para un mayor control en la medición.

- Termómetro IR de precisión con entrada para sonda termopar NiCr-Ni (tipo K)
- Gran pantalla: presentación simultánea del valor medido y el límite máx. y mín.
- Doble rayo láser para un enfoque preciso
- Resolución óptica de 50:1
- Gran rango de temperatura - Infrarrojo: -60 °C... +1000 °C - Tipo K: -64 °C ... +1370 °C
- Funciones HOLD, máx., mín., diferencial y promedio
- Grados de emisión ajustables
- Iluminación de fondo
- Límite de alarmas (alto y bajo)

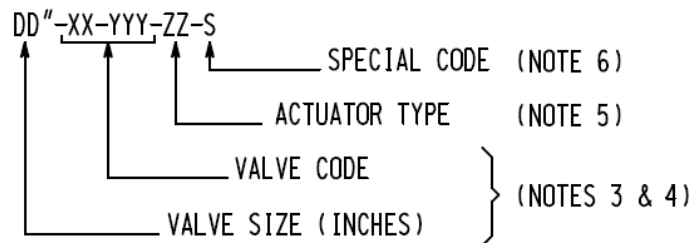
ANEXO III (líneas de trabajo del proyecto)

LINE SYMBOLS

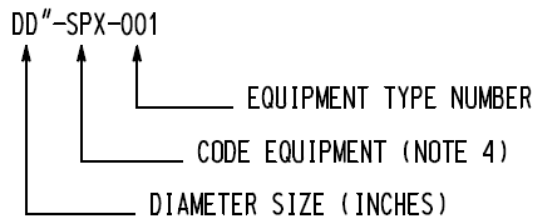
PIPE LINE DESIGNATION



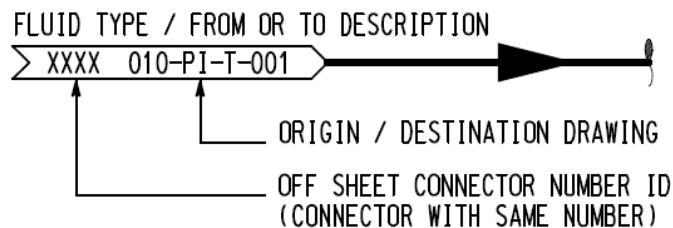
VALVE DESIGNATION



MISCELLANEOUS PIPING SYMBOLS



OFF SHEET CONNECTOR



SERVICE CODE (NOTE 3)

<p>WATER, ABOVEGROUND</p> <p>ASW AUTOCLAVE SEAL WATER CWR COOLING WATER RETURN CWS COOLING WATER SUPPLY DW DOMESTIC WATER FPW FIRE PROTECTION WATER FRW FRESH WATER GSW GLAND SEAL WATER PRW MILL WATER PW POTABLE WATER RO R. O. WATER RW RAW WATER</p> <p>WATER, UNDERGROUND</p> <p>CWRU COOLING WATER RETURN U.G. CWSU COOLING WATER SUPPLY U.G. CWU COOLING WATER U.G. FRWU FRESH WATER U.G. FWU FIRE PROTECTION WATER U.G. GSWU GLAND SEAL WATER U.G. PRU MILL WATER U.G. PMU POTABLE WATER U.G. RWU RAW WATER U.G.</p> <p>OIL & GAS (HYDROCARBONS)</p> <p>AF ANTIFREEZE CES CARBON ELUENT SOLUTION FO FUEL OIL GAS GASOLINE GR GREASE HOH HYDRAULIC OIL, H.P. HOH HYDRAULIC OIL, L.P. LOH LUBE OIL, HP LOH LUBE OIL, LP (MILL RETURN) NG NATURAL GAS PG PROPANE GAS WF WASTE ANTI FREEZE WO WASTE OIL</p>	<p>PROCESS VENTS</p> <p>AMV AMMONIATED VENT PV AMMONIA VENT PV HYDROGEN SULFIDE VENT PV SULFURIC ACID VENT PVA AUTOCLAVE VENT</p> <p>PROCESS SLURRIES</p> <p>ASLH SLURRY, ACIDIC HIGH ACID ASLL SLURRY, ACIDIC LOW ACID CS SLURRY, SPENT CARBON SAM SLURRY, AMMONIATED MOLY SL PROCESS SLURRY SLAC SLURRY, COLD AUTOCLAVE FEED SLAF SLURRY, PRESSURE LEACH FLASH SLAH SLURRY, PRESSURE LEACH, H.P. HOT SLAH SLURRY, HOT AUTOCLAVE SLG SLURRY, GYPSUM SLT SLURRY, RESIDUE SLU SLURRY, NEUTRAL (INTERMITTENT SERVICE-FLOOR SUMPS)</p> <p>PROCESS SOLUTIONS</p> <p>ABS ACIDIC BAREN SOLUTION ACH AUTOCLAVE COOLANT, H.P. ACL AUTOCLAVE COOLANT, L.P. AMS AMMONIATED MOLY SOLUTION ASU AMMONIUM SULFATE SOLUTION CSS CARBON STRIP SOLUTION CSW CARBON WASH SOLUTION ELS ELUENT SOLUTION PSH PREGNANT SOLUTION HIGH ACID PSL PREGNANT SOLUTION LOW ACID SAD SULFURIC ACID DILUTE (<50% CONCENTRATE)</p>	<p>ACID & REAGENTS</p> <p>AA AMMONIA (AQUEOUS) AL ALUM ADA AMMONIA SOLUTION (CONC'D) AS ANTI-SCALANT ASH ACID SOLUTION, HIGH ASL ACID SOLUTION, LOW CF CHEMICAL FEED FL FLOCCULANT MB MIBC (FROTHER) ML MILK OF LIME NA SODIUM HYDROSULPHIDE (NHS) NAS NITRIC ACID PAX POTASSIUM AMYL XANTHATE RAF AEROFLOAT 238 (AF 238) RSS SODIUM SILICATE SAC SULFURIC ACID, CONCENTRATED SH CAUSTIC (SODIUM HYDROXIDE)</p> <p>STEAM & CONDENSATE</p> <p>LBD BOILER BLOWDOWN, L.P. LCD CONDENSATE, L.P. LPF BOILER FEED WATER, L.P. LPS STEAM, L.P. MBD BOILER BLOWDOWN, M.P. MPC CONDENSATE, M.P. MPF BOILER FEED WATER, M.P. MPS STEAM, M.P.</p> <p>SEWERS & DRAINS</p> <p>CWV CHEMICAL WASTE & VENT PD PROCESS DRAIN PV PROCESS VENT SS SANITARY WASTE & VENT SSU SANITARY SEWER, U.G. ST STORM DRAIN VT NON-CORROSIIVE VENT</p>

ANEXO V

5.1. Cálculos para el aislamiento térmico de la tubería conductora de Hidrosulfuro de sodio NaHS

5.1.1. Cálculo de la pérdida de calor por transferencia de la tubería sin aislamiento.

$$Q = AV = \rho \dot{m}$$

, donde Q: es el caudal del fluido, A es el área de la sección transversal, considerando que el D_{externo} es 48.3 mm (0.0483m) y D_{interno} es 40.9mm (0.0409m) y convirtiendo las unidades de densidad y flujo del cuadro 5, se tiene:

$$(1500 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{\pi}{4}\right) (0.0409 \text{ m})^2 V = (0.416 \text{ kg/s})$$

$$V = 0.211 \text{ m/s}$$

Por lo que el número de Re, se obtiene de la ecuación 17, reemplazando:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\left(0.211 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0.0409 \text{ m})}{4.788 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 180.32$$

Por lo que el flujo es laminar; teniendo en cuenta esto, el número de Nusselt completamente desarrollado para tuberías circulares y considerando temperatura superficial constante, y de acuerdo a la ecuación 25, se tiene:

$$Nu = \frac{hD}{k_f} = 3.66$$

$$h = 3.66 \frac{k}{D} = 3.66 \frac{(0.1932 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}})}{0.0409 \text{ m}}$$

$$h = 17.29 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Siendo la resistencia convectiva 1:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1 h_1} = \frac{1}{\pi (0.0409 \text{ m}) (17.29 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}})}$$

$$R_1 = 0.45 \frac{\text{m}^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Para determinar el R conductivo 2 de la tubería se considera la ecuación 7, en función de la longitud, se tiene:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot k} = \frac{\ln \left(\frac{0.0483}{0.0409} \right)}{2 \cdot \pi \cdot (48.9)}$$

$$R_2 = 0.0005614 \frac{m^\circ C}{W}$$

Para determinar el h convectivo total externo, se considera el h por radiación y el h por convección. Para el h por radiación se considera la ecuación 12, por lo que se tiene que:

$$h_r = \left(\frac{T_s^4 - T_\infty^4}{T_s - T_\infty} \right) \cdot C_r \quad W/m^2K$$

Siendo $C_r =$ de $2.5 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$, para este tipo de material, y de acuerdo a datos de Laboratorio de Minera Chinalco (2014), se considera una temperatura superficial, sin aislamiento de $15^\circ C$ (288K), por lo que:

$$h_r = \left(\frac{288^4 - 280^4}{288 - 280} \right) \cdot (2.5 \times 10^{-8}) \quad W/m^2K$$

$$h_r = 2.3 \quad W/m^2K$$

Para determinar el h convectivo 2 se considera las propiedades del aire a temperatura ambiente, $7^\circ C$, determinando en primer lugar el Re; siendo:

$$v = 1.74265 \times 10^{-5} \quad m^2/s$$

$$V = 2 \quad m/s$$

$$D_{\text{externo}} = 0.0483 \quad m$$

$$Re = \frac{VD}{v} = \frac{\left(2 \frac{m}{s} \right) (0.0483 \quad m)}{1.74265 \times 10^{-5} \quad m^2/s}$$

$$Re = 5543.28$$

Por lo que al flujo de aire sobre la tubería se considera turbulento. Para determinar el número de Nusselt, se considera convección forzada sobre cilindros circulares, ecuación 25, por lo que:

$$N_{U,cil} = \frac{hD}{k_f} = C Re^m Pr^n$$

Y utilizando el cuadro 3 y reemplazando los valores, se tiene que:

$$N_{U,cil} = C Re^m Pr^n = 0.193 (5543.28)^{0.618} (0.735)^{1/3}$$

$$N_{U,cil} = 35.86 = \frac{hD}{k_f}$$

$$h = 35.86 \frac{k_f}{D} = 35.86 \frac{(0.0242 \frac{W}{m^{\circ}C})}{0.0483 m}$$

$$h = 17.967 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Por lo que, el h convectivo total es:

$$h = (2.3 + 17.967) \frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$h = 20.27 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Siendo la resistencia convectiva 3:

$$R_3 = \frac{1}{2\pi r_1 h_1} = \frac{1}{\pi(0.0483 m)(20.27 \frac{W}{m^{\circ}C})}$$

$$R_3 = 0.325 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

De acuerdo a la figura 22, la resistencia térmica total del sistema es:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{total} = (0.45 + 0.0005614 + 0.325) \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_{total} = 0.776 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Entonces, la cantidad de calor perdido por unidad longitud, es:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad W/m$$

, trabajando con una temperatura interior de 40°C y una temperatura ambiente de 7°C, reemplazando se tiene:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad W/m$$

$$q_l = \frac{(40 - 7)}{0.776} \quad W/m$$

$$q_l = 42.53 \quad W/m$$

Este último dato representa la pérdida de calor por unidad de longitud, es decir, la cantidad de energía que se pierde por cada metro de tubería instalada bajo los parámetros y características del sistema.

De acuerdo con el cuadro 4, la cantidad total de tubería para el transporte de este fluido es de 71.9 metros, por lo el calor total perdido, es de:

$$Q = (42.53 \frac{W}{m})(71.90 m)$$

$$\mathbf{Q = 3057.91 W}$$

5.1.2. Cálculo de la pérdida de calor por transferencia de la tubería con aislamiento

Para poder seleccionar y aproximar el espesor del aislante, se toma como referencia dos aspectos importantes. Primero se considera la figura 15 y la ecuación 39, la cual se escribe como:

$$\frac{C'}{C''} = 2 \cdot k \left[\left(\frac{(T_{\infty 1} - T_a)}{q} \right) - \frac{1}{h_e} \right]$$

, donde $C'' = D_e \cdot \ln \frac{r_e}{r}$

Reemplazando valores se tiene:

$$C' = 0.0483 \ln \left(\frac{0.0483}{0.0409} \right) 2(48.9) \left[\left(\frac{(40 - 7)}{280.28} \right) - \frac{1}{20.27} \right]$$

$$\mathbf{C' = 0.055}$$

Con la constante determinada y el diámetro externo de tubería se ingresa al diagrama de la figura 15, obteniendo para ello un espesor de aislamiento, de manera aproximada, de 32 mm.

Tanto R_i convectivo como R_1 conductivo tienen los mismos valores con sus similares, cuando se analiza con y sin aislamiento, por lo que:

$$\mathbf{R_i = 0.45 \frac{m^{\circ}C}{W}}$$

$$\mathbf{R_1 = 0.0005614 \frac{m^{\circ}C}{W}}$$

Para determinar R_2 conductivo del aislamiento se considera la ecuación 7 y de acuerdo a la figura, en función de la longitud, se tiene:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot k_2} = \frac{\ln \left(\frac{0.108}{0.0483} \right)}{2 \cdot \pi \cdot (0.032)}$$

$$\mathbf{R_2 = 4.00 \frac{m^{\circ}C}{W}}$$

Para determinar el h convectivo total externo, se considera el h por radiación y el h por convección. Para el h por radiación se considera la ecuación 12, por lo que se tiene que:

$$h_r = \left(\frac{T_s^4 - T_\infty^4}{T_s - T_\infty} \right) \cdot C_r \quad W/m^2K$$

Siendo $C_r =$ de $2.5 \times 10^{-8} \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K}^4)$, para un revestimiento con chapa de aluminio, y de acuerdo a datos de Laboratorio de Minera Chinalco (2014), se considera una temperatura superficial, con aislamiento (de acuerdo a experiencia para una aproximación inicial de 9°C (282K), por lo que:

$$h_r = \left(\frac{282^4 - 280^4}{282 - 280} \right) \cdot (2.5 \times 10^{-8}) \quad W/m^2K$$

$$h_r = 2.22 \quad W/m^2K$$

Para determinar el h convectivo 2 se considera las propiedades del aire a temperatura ambiente, 7°C , determinando en primer lugar el Re ; siendo:

$$v = 1.74265 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V = 2 \text{ m/s}$$

$$D_{\text{externo}} = 0.108 \text{ m}$$

$$Re = \frac{VD}{v} = \frac{\left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) (0.108 \text{ m})}{1.74265 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 12394.92$$

Por lo que al flujo de aire sobre la tubería se considera turbulento. Para determinar el número de Nusselt, se considera convección forzada sobre cilindros circulares, ecuación 25, por lo que:

$$N_{U,cil} = \frac{hD}{k_f} = C Re^m Pr^n$$

Y utilizando el cuadro 3 y reemplazando los valores, se tiene que:

$$N_{U,cil} = C Re^m Pr^n = 0.193 (12394.92)^{0.618} (0.735)^{1/3}$$

$$N_{U,cil} = 58.97 = \frac{hD}{k_f}$$

$$h = 58.97 \frac{k_f}{D} = 58.97 \frac{(0.0242 \frac{W}{\text{m}^\circ\text{C}})}{0.108 \text{ m}}$$

$$h = 13.21 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Por lo que, el h convectivo total es:

$$h = (2.22 + 13.21) \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h = 15.43 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Siendo la resistencia convectiva R_0 :

$$R_0 = \frac{1}{2\pi r_1 h_1} = \frac{1}{\pi(0.108 \text{ m})(15.43 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})}$$

$$R_0 = 0.19 \frac{m \cdot ^\circ C}{W}$$

De acuerdo a la figura 22, la resistencia térmica total del sistema es:

$$R_{total} = R_i + R_2 + R_3 + R_0$$

$$R_{total} = (0.45 + 0.0005614 + 4.00 + 0.19) \frac{m \cdot ^\circ C}{W}$$

$$R_{total} = 4.64 \frac{m \cdot ^\circ C}{W}$$

Entonces, la cantidad de calor perdido por unidad longitud, es:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{total}} \quad W/m$$

, trabajando con una temperatura interior de 40°C y una temperatura ambiente de 7°C, reemplazando se tiene:

$$q_l = \frac{T_i - T_a}{R_{total}} \quad W/m$$

$$q_l = \frac{(40 - 7)}{4.64} \quad W/m$$

$$q_l = 7.11 \quad W/m$$

Este último dato representa la pérdida de calor por unidad de longitud, es decir, la cantidad de energía que se pierde por cada metro de tubería instalada bajo los parámetros y características del sistema.

De acuerdo con el cuadro 4, la cantidad total de tubería para el transporte de este fluido es de 71.90 metros, por lo el calor total perdido, es de:

$$Q = (7.11 \frac{W}{m})(71.90 \text{ m})$$

$$Q = 511.21 \text{ W}$$

5.1.3. Calculo de la eficiencia del aislamiento

Se puede obtener de la siguiente relación:

$$\eta = \left(\frac{Q_{\text{sin aislamiento}} - Q_{\text{con aislamiento}}}{Q_{\text{sin aislamiento}}} \right) \times 100\%$$

Reemplazando,

$$\eta = \left(\frac{3057.91 - 511.21}{3057.91} \right) \times 100\%$$
$$\eta = 83.28\%$$

5.1.4. Calculo de la caída de temperatura de la tubería más larga

Dentro del sistema de tuberías para el Hidrosulfuro de sodio, se considera el tramo más largo, de acuerdo con el cuadro 4, corresponde a la sección 1-1/2"-NA-286-003-S1-HC, que tiene una longitud de 20.60 m

Considerando las ecuaciones 39 y 40, se tiene que:

$$T_f - T_a = (T_{\infty 1} - T_a) \cdot e^{-\alpha} \text{ } ^\circ\text{C}$$
$$\alpha = \frac{hA_s}{\dot{m} \cdot C_p}$$

, reemplazando para α , se tiene:

$$\alpha = \frac{(20.60)}{(0.362)(1632)(4.64)}$$
$$\alpha = 0.00751$$

Por lo que la temperatura final del fluido en la tubería es de:

$$T_f - 7 = (40 - 7) \cdot e^{-0.00751} \text{ } ^\circ\text{C}$$
$$T_f = 39.73 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teniendo una caída de 0.27°C para una longitud de 20.60 m de tubería, siendo éste el tramo más largo en el transporte del hidrosulfuro de sodio.

5.1.5. Calculo económico para el análisis del sistema con y sin aislamiento

La pérdida total de energía en el transporte de hidrosulfuro de sodio con la tubería expuesta es de 3057.91 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 3057.91 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 11008.48 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

Por lo que la cantidad total de energía perdida al año es de:

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 11008.48 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} * 8640 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 95113267.20 \frac{\text{KJ}}{\text{año}}$$

La pérdida total de energía en el transporte de hidróxido de sodio con la tubería aislada es de 383.95 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 511.21 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1840.35 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

Siendo la pérdida total al año de:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 1840.35 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} * 8640 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 15900675.84 \frac{\text{KJ}}{\text{año}}$$

Siendo el ahorro en energía anual, de:

$$\text{Ahorro Energético} = 95113267.20 - 15900675.84$$

$$\text{Ahorro Energético} = 79212591.36 \frac{\text{KJ}}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro Energético} = 75093536.61 \frac{\text{BTU}}{\text{año}}$$

De acuerdo con el área de procesos y los datos obtenidos sobre los costos de operación de la empresa, se tiene que el costo de Lana de roca SPINTEX 342 G-70 de 50 mm de espesor es de U\$ 9.5/ pie² (incluido mano de obra) y el costo del calor generado es de U\$ 55/ millón de BTU. Teniendo en cuenta los datos anteriores, el ahorro económico del sistema de aislamiento sería de:

$$\text{Ahorro Económico} = 75093536.61 \frac{\text{BTU}}{\text{año}} * \frac{\text{U\$ } 55}{\text{millón de BTU}}$$

$$\text{Ahorro Económico} = \frac{\text{U\$ } 4130.14}{\text{año}}$$

La inversión total del sistema de aislamiento, esta función del área superficial:

$$\text{Inversión total} = A_{\text{sup.}} * \text{costo unitario}$$

$$\text{Inversión total} = (\pi DL_{\text{total}}) * \text{costo unitario}$$

$$\text{Inversión total} = \pi(0.108\text{m})(71.9\text{m}) * \frac{\text{U\$ } 9.5}{\text{pie}^2} * \frac{10.76\text{pie}^2}{1\text{m}^2}$$

$$\text{Inversión total} = \text{U\$ } 2493.67 \text{ dólares}$$


Por lo que el periodo de recuperación de la inversión, sería:

$$\text{PRI} = \frac{\text{Inversión total}}{\text{Ahorro económico}}$$

$$\text{PRI} = \frac{\text{U\$ } 2493.67}{(\text{U\$ } 4130.14 / \text{año})}$$

$$\text{PRI} = 0.6 \text{ años} = 7.24 \text{ meses}$$

ANEXO VI. Formatos de trabajo

 <b style="font-size: 1.2em; margin-left: 10px;">KAEFER KOSTEC		Código: FR-INMO-003 Versión: 01 Fecha: 01/07/2013 Página : 1 de 1
<i>Sistema Integrado de Gestión</i>		RECEPCIÓN DE EQUIPOS SIN AISLAMIENTO TÉRMICO
Elaborado: Coordinador HSEQ	Revisado: Gerente de Proyectos Instalación & Movilización	Aprobado: Gerente de PMQ
OBRA :		Presupuesto:
AREA :		FECHA :
Nº DE EQUIPO :		PLANO DE REFERENCIA :
ESPECIFICACIONES DE REFERENCIA :		
ORDEN DE SERVICIO Nº:		
ESTADO		
	SI	NO
a.- Limpio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b.- Pintado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c.- Con óxido	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d.- C/Soportes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e.- C/Barandas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f.- C/Escaleras	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g.- C/Plataformas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h.- C/ Anillos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i.- C/Platinas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
j.- C/Accesorios	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
k.- C/Prueba hidrostática	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
DIMENSIONES :		
OBSERVACIONES:		



KAEFER KOSTEC

Código: FR-INMO-004

Versión: 01

Fecha: 01/07/2013

Página : 1 de 1

Sistema Integrado de Gestión

RECEPCIÓN DE EQUIPOS CON AISLAMIENTO

Elaborado:
Coordinador HSEQ

Revisado:
Gerente de Proyectos Instalación & Movilización

Aprobado:
Gerente de PMQ

OBRA :

Presupuesto:

AREA :

FECHA :

Nº DE EQUIPO :

PLANO DE REFERENCIA :

ESPECIFICACIONES DE REFERENCIA :

ORDEN DE SERVICIO Nº:

CARACTERÍSTICAS GENERALES

1.- TIPO DE AISLAMIENTO

2.-EQUIPO

- a.- Lana de Roca
- b.- Lana de Vidrio
- c.- Fibra Ceramica
- d.- Silicato de Calcio
- e.- Poliuretano
- f.- Teknopor

<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	

OTROS: _____

CARACTERÍSTICAS A CONTROLAR

MATERIAL AISLANTE

- 1.- Densidad Kg/m³
- 2.- Espesor mm
- 3.- Malla

Verificado por:

MATERIAL DE SUJECION

- 1.- Fiejes Inoxidables 12 x 0.5 mm
- 2.- Alambre galvanizado N° 16
- 3.- Distancia entre atados

Verificado por:

OBSERVACIONES

--

KAEFER KOSTEC SAC

CLIENTE

Ejecutó:

Vº Bº:

Vº Bº:

Firma

Firma

Firma

Propietario:

Cliente:

Proyecto:

Firma

Anexo iii

