

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



**Análisis térmico de la implementación del sistema de aislamiento en
tuberías de vapor en la planta Termochilca**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN
ENERGÍA**

AUTORA:

Bach. Arteaga Rosas, Yuria Stefanie

ASESOR:

Mg. Pérez Pinedo, Oscar Fernando

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN ENERGÍA



CONFORMIDAD DEL ASESOR

El presente Proyecto de Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el título profesional en la universidad nacional del santa (Resolución N° 580- 2022- CU-R-UNS) de acuerdo con la denominación siguiente:

PROYECTO DE TESIS PARA TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍA

“ANÁLISIS TÉRMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS DE VAPOR EN LA PLANTA TERMOCHILCA”

TESISTA:

Bach. Arteaga Rosas Yuria Stefanie

Mg. Oscar Fernando Pérez Pinedo
Asesor
DNI: 41078015
Código ORCID: 0000-0002-5780-6115

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN ENERGÍA



CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente Jurado Evaluador da la conformidad del presente informe de tesis, desarrollado en cumplimiento con el objetivo propuesto y presentado conforme al Reglamento General para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa, titulado:

“ANALISIS TERMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN TUBERIAS DE VAPOR EN LA PLANTA TERMOCHILCA”

TESISTA:

Bach. Arteaga Rosas Yuria Stefanie

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:


Mg. José Luis Castillo Ventura
Presidente
DNI: 32781530
Código ORCID: 0000-0002-0905-3024


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayan
Secretario
DNI: 32788460
Código ORCID: 0000-0002-3579-3771


Mg. Oscar Fernando Pérez Pinedo
Integrante
DNI: 41078015
Código ORCID: 0000-0002-5780-6115

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las ocho horas del día miércoles 31 de diciembre del año dos mil veinticinco, en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, y en cumplimiento de lo establecido en el Artículo 68° del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado mediante Resolución N.° 337-2024-CU-R-UNS de fecha 12 de abril de 2024, se dio inicio a la sesión de sustentación, instalándose el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N.° 768-2025-UNS-CFI de fecha 10 de diciembre de 2025, conformado por los siguientes docentes:

- | | | |
|--|---|-------------|
| ➤ Mg. José Luis Castillo Ventura | : | Presidente |
| ➤ Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán | : | Secretario |
| ➤ Mg. Oscar Fernando Pérez Pinedo | : | Integrante |
| ➤ M.Sc. Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque | : | Accesitario |

Y según la Resolución Decanal N.° 998-2025-UNS-FI de fecha 30 de diciembre de 2025, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de Tesis, titulada: **"ANÁLISIS TÉRMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TÉRMICO EN TUBERÍAS DE VAPOR DE LA PLANTA TERMOCHILCA"**, presentado por la bachiller: **ARTEAGA ROSAS YURIA STEFANIE**, con código de matrícula N.° 0200911031, bajo la asesoría del Mg. Oscar Fernando Pérez Pinedo, designado mediante Resolución Decanal N.° 745-2024-UNS-FI de fecha 22 de noviembre de 2024.

Concluida la exposición, el bachiller absolvió las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y por el público asistente.

Acto seguido, el Jurado Evaluador deliberó sobre los aspectos relacionados con el contenido, desarrollo y exposición del trabajo, formulando las observaciones y recomendaciones pertinentes. En concordancia con lo establecido en el Artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, el Jurado acuerda declarar:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
ARTEAGA ROSAS YURIA STEFANIE	18	Bueno

Siendo las ocho y treinta horas del mismo día, se dio por concluida la sesión, firmando los miembros del Jurado en señal de conformidad.


Mg. José Luis Castillo Ventura
PRESIDENTE


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
SECRETARIO


Mg. Oscar Fernando Pérez Pinedo
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Yuria Arteaga
Título del ejercicio: Tesis
Título de la entrega: TESIS YURIA ARTEAGA.pdf
Nombre del archivo: TESIS_YURIA_ARTEAGA.pdf
Tamaño del archivo: 4.71M
Total páginas: 126
Total de palabras: 22,516
Total de caracteres: 119,160
Fecha de entrega: 10-ene-2026 12:04a.m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2831705723

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



PROYECTO DE TESIS PARA TÍTULO

"ANÁLISIS TÉRMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN TUBERÍAS DE VAPOR EN LA PLANTA TERMOCHILCA"

Para optar el Título Profesional de Ingeniería en Energía

AUTOR: Bach. Yuria Stefanie Arteaga Rosas
ASESOR: Mg. Oscar Fernando Pérez Pinedo

Nuevo Chimbote, Perú
2026

TESIS YURIA ARTEAGA.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

21 %

INDICE DE SIMILITUD

21 %

FUENTES DE INTERNET

1 %

PUBLICACIONES

7 %

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

7 %

2

docplayer.es

Fuente de Internet

4 %

3

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1 %

4

dspace.uib.es

Fuente de Internet

1 %

5

termicosyacusticos.es

Fuente de Internet

1 %

6

revistas.utadeo.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

7

hdl.handle.net

Fuente de Internet

<1 %

8

Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y
de Estudios Superiores de Monterrey

Trabajo del estudiante

<1 %

9

itscv.edu.ec

AGRADECIMIENTO

A mi asesor por la asesoría brindada, su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de la presente tesis. Su guía académica y profesional ha sido fundamental para culminar con éxito este trabajo.

A mi familia, por su aliento, confianza y motivación en los momentos más difíciles. Gracias por acompañarme, por creer en mí y por brindarme siempre palabras de ánimo que me impulsaron a continuar.

A todos los profesores de la EAP. Ingeniería en Energía, por involucrarse en mi desarrollo académico y profesional mediante sus pertinentes conocimientos y apoyo necesario a lo largo de la carrera.

Y a todas aquellas personas que, de alguna manera, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

Indice

RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I	18
INTRODUCCIÓN	18
1.1. ANTECEDENTES	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.1.1. Objetivo general	21
1.1.2. Objetivo específico	21
1.3. HIPOTESIS	22
1.4. JUSTIFICACIÓN Y LIMITACIONES DEL TRABAJO	22
1.4.1. Justificación	22
1.4.2. Limitaciones del trabajo	23
1.5. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y PROYECTO EN ESTUDIO	24
CAPÍTULO II	25
MARCO TEÓRICO	25
2.1. SISTEMA DE GENERACIÓN Y TRANSPORTE DE VAPOR	26
2.1.1. Generación de vapor	26
2.1.2. Transporte de vapor	27
2.1.3. Importancia para la eficiencia energética	27
2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR	28
2.2.1. Mecanismos de transferencia de calor	28
2.3. AISLAMIENTO TÉRMICO	32
2.3.1. Definición	32
2.3.2. El aislamiento térmico en la industria	33
2.3.3. Parámetros de operación del sistema de aislamiento térmico	34
2.3.4. Propiedades térmicas de los materiales aislantes	35
2.3.5. Tipos de aislantes térmicos	36
2.3.5.1. Aislantes fibrosos	36

2.3.5.2. Aislantes Granulares	37
2.3.5.3. Aislantes celulares	38
2.3.5.4. Aislantes refractarios o de alta temperatura	38
2.3.5.5. Conductividad térmica de los materiales aislantes	39
2.3.6. Pérdidas de calor en tuberías	40
2.3.7. Espesor optimo económico de aislamiento	40
2.3.8. Montaje de aislamiento térmico en tuberías	42
2.3.8.1. Requisitos de la instalación previos al montaje del aislamiento	42
2.3.8.2. Sistema de soportes	43
2.3.8.3. Instalación del material aislante	43
2.3.8.4. Instalación del recubrimiento exterior	44
2.3.9. Mantenimiento en sistemas de aislamiento térmico	47
CAPÍTULO III	48
MATERIALES Y MÉTODO	48
3.1. MATERIALES Y EQUIPOS	49
3.1.1. Materiales	49
3.1.2. Equipos e instrumentos de medición	50
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	50
3.2.1. Método de la investigación	50
3.2.2. Diseño	51
3.2.3. Población y muestra	51
3.2.4. Variables e indicadores	52
3.2.5. Procedimiento de la investigación	52
3.2.6. Aplicación de ecuaciones para cálculo de pérdidas de calor sin aislamiento	53
3.2.7. Aplicación de ecuaciones para cálculo de pérdidas de calor con aislamiento	60
3.2.8. Aplicación ecuaciones para calcular la temperatura superficial	61
3.2.9. Aplicación ecuaciones para calcular la eficiencia, ahorro económico, ahorro energético, inversión y el periodo de retorno de la inversión	62
Eficiencia	62

3.2.10. Aplicación ecuaciones para calcular el espesor optimo.	63
3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
CAPÍTULO IV	64
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1. RESULTADOS	65
4.1.1. Consideraciones iniciales	65
4.1.2. Cálculo de la pérdida de calor por transferencia de la tubería sin aislamiento.	66
4.1.3. Cálculo de perdida de calor por transferencia de la tubería con aislamiento	72
4.1.4. Cálculo de la eficiencia con aislamiento térmico	76
4.1.5. Cálculo energético, económico y costo de la inversión para el análisis del sistema con y sin aislamiento	77
4.1.6. Cálculo del espesor óptimo económico del aislante seleccionado	82
4.2. DISCUSIÓN	94
CAPÍTULO V	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
5.1. Conclusiones	98
5.2. Recomendaciones	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Propiedades térmicas de los materiales aislantes	36
Tabla 2: Tabla de conductividad térmica de materiales aislantes	39
Tabla 3: Materiales utilizados para el aislamiento térmico de tuberías	49
Tabla 4: Dimensiones de las tuberías en estudio	51
Tabla 5: Criterios del Reynolds	56
Tabla 6: Rugosidad absoluta de materiales	58
Tabla 7: Consideraciones iniciales para el análisis	65
Tabla 8: Pérdida de calor sin aislamiento en tuberías	72
Tabla 9: Pérdida de calor en las tuberías de estudio	76
Tabla 10: Eficiencia energética en diferentes diámetros de tuberías con aislamiento térmico	77
Tabla 11: Ahorro energético y económico para las tuberías en estudio	79
Tabla 12: Inversión del aislamiento térmico de las tuberías en estudio	80
Tabla 13: Periodo de retorno de la inversión	81
Tabla 14: Cálculo del espesor óptimo para tubería 18" Ø	82
Tabla 15: Cálculo del espesor óptimo para tubería 14" Ø	83
Tabla 16: Cálculo del espesor óptimo para tubería 12" Ø	84
Tabla 17: Cálculo del espesor óptimo para tubería 10" Ø	85
Tabla 18: Cálculo del espesor óptimo para tubería 8" Ø	86
Tabla 19: Cálculo del espesor óptimo para tubería 6" Ø	87
Tabla 20: Cálculo del espesor óptimo para tubería 4" Ø	88
Tabla 21: Cálculo del espesor óptimo para tubería 3" Ø	89
Tabla 22: Cálculo del espesor óptimo para tubería 2" Ø	90
Tabla 23: Cálculo del espesor óptimo para tubería 1 1/2" Ø	91
Tabla 24: Cálculo temperatura superficie para tubería 18"	120
Tabla 25: Cálculo temperatura superficie para tubería 14"	120
Tabla 26: Cálculo temperatura superficie para tubería 12"	120
Tabla 27: Cálculo temperatura superficie para tubería 10"	120
Tabla 28: Cálculo temperatura superficie para tubería 8"	121
Tabla 29: Cálculo temperatura superficie para tubería 6"	121
Tabla 30: Cálculo temperatura superficie para tubería 4"	121

Tabla 31: Calculo temperatura superficie para tubería 3"	121
Tabla 32: Calculo temperatura superficie para tubería 2"	122
Tabla 33: Calculo temperatura superficie para tubería 1 1/2"	122
Tabla 34: Pérdidas de calor en las tuberías de estudio	123
Tabla 35: Eficiencia energética en diferentes diámetros de tuberías con lana mineral	124
Tabla 36: Ahorro energético y económico	124
Tabla 37: Inversión requerida con lana mineral roca	125
Tabla 38: Período de retorno de la inversión con lana mineral	126
Tabla 39: Pérdidas de calor en las tuberías de estudio	127
Tabla 40: Eficiencia energética en diferentes diámetros de tuberías	128
Tabla 41: Ahorro energético y económico	128
Tabla 42: Inversión requerida con silicato calcio	129
Tabla 43: Período de retorno de la inversión con silicato calcio	130

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la Planta Termochilca	24
Figura 2: Los cuatro modos fundamentales de transferencia de calor ilustrados con una fogata.	31
Figura 3: Grafica de costos en función del espesor del aislamiento	42
Figura 4: Ejemplo de colocación del recubrimiento metálico para evitar entrada de agua.	45
Figura 5: Instalación cubierta metálica a codo	46
Figura 6: Instalación cubierta metálica a válvula	47
Figura 7: Tubería sin aislamiento	54
Figura 8: Distribución de resistencia en una tubería sin aislamiento	54
Figura 9: Red de resistencias térmicas para la tubería con aislamiento.	60
Figura 10: Diámetro de tuberías en función al ahorro energético y económico	79
Figura 11: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 18" Ø	82
Figura 12: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 14" Ø	83
Figura 13: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 12" Ø	84
Figura 14: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 10" Ø	85
Figura 15: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 8" Ø	86
Figura 16: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 6" Ø	87
Figura 17: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 4" Ø	88
Figura 18: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 3" Ø	89
Figura 19: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 2" Ø	90

Figura 20: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 1 1/2" Ø	91
Figura 21: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para el sistema HP	92
Figura 22: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para el sistema IP	93
Figura 23: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para el sistema LP	93
Figura 24: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para los sistemas de LP, IP y HP.	94
Figura 25: Proceso de instalación de aislamiento térmico	119
Figura 26: Lugar donde se ejecutó el estudio	119

ÍNDICE ANEXO

Anexo A: Tablas de vapor sobrecalentado	105
Anexo B: Tabla de propiedades del aire	109
Anexo C: Tabla de dimensiones de la tubería acero al carbono, cedula 40.	110
Anexo D: Ficha técnica de la cámara termográfica	111
Anexo E: Ficha técnica del velocímetro	113
Anexo F: Ficha técnica del silicato de calcio	114
Anexo G: Ficha técnica de la lana mineral	116
Anexo H: Ficha técnica plancha aluminio liso	117
Anexo I: Fotos de instalación de aislamiento térmico	118
Anexo J: Iteraciones de la temperatura de superficie	120
Anexo K: Evaluación del sistema con lana mineral de roca	123
Anexo L: Evaluación del sistema con silicato de calcio	127

RESUMEN

El presente informe de tesis se desarrolló con el propósito de determinar los parámetros óptimos del aislamiento térmico en las líneas de vapor de la planta, de modo que se reduzcan las pérdidas de calor y se incremente la eficiencia del sistema. Para ello, se realizó una evaluación técnica y económica comparando el comportamiento térmico de las tuberías con materiales aislantes, espesores y condiciones operativas.

Este estudio consta de cinco capítulos, en el primer capítulo se plantea el problema, la justificación y los objetivos del estudio. En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico, donde se abordan los fundamentos del aislamiento térmico, las propiedades de los materiales y los mecanismos de transferencia de calor. En el tercer capítulo se describe la metodología aplicada. Por otra parte, en el cuarto capítulo se presentan los resultados y análisis de la investigación y finalmente en el quinto capítulo se muestra las conclusiones y recomendaciones destacando la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto.

Al realizar la evaluación técnica y económica se concluye que es adecuado instalar aislamiento térmico a las líneas de vapor dado que reducen efectivamente la eficiencia del sistema en aproximadamente un 94% garantizando de esa manera un ahorro energético acumulado de 72923.30 MMBTU/año y un ahorro económico anual en 1336319.54 USD. Para lograr ello la inversión requerida es de 42274.61 USD el cual se logra recuperar en un tiempo corto de 117 días (aproximadamente 4 meses) de operación confirmando que el costo del aislamiento es insignificante frente a los beneficios operacionales y ahorros del combustible. Con ello se justifica que instalar aislamiento térmico a líneas de vapor es una medida estratégica de alta rentabilidad para la planta.

Palabras claves: Aislamiento térmico, Temperatura, Pérdidas de calor, Espesor óptimo, Material aislante, Balance energía, Calor transferido, Tubería vapor y Eficiencia.

ABSTRACT

This thesis report was developed with the aim of determining the optimal parameters for thermal insulation in the plant's steam lines, in order to reduce heat loss and increase system efficiency. To this end, a technical and economic evaluation was carried out, comparing the thermal performance of pipes with different insulation materials, thicknesses, and operating conditions.

This study consists of five chapters. The first chapter presents the problem, justification, and objectives of the study. The second chapter develops the theoretical framework, addressing the fundamentals of thermal insulation, material properties, and heat transfer mechanisms. The third chapter describes the methodology applied. The fourth chapter presents the results and analysis of the research, and finally, the fifth chapter shows the conclusions and recommendations, highlighting the technical and economic feasibility of the proposed system.

The technical and economic evaluation concludes that it is appropriate to install thermal insulation on the steam lines, as this effectively reduces the efficiency of the system by approximately 96%, thereby guaranteeing cumulative energy savings of 72,923.30 MMBTU/year and annual economic savings of 1,336,319.54 USD. To achieve this, the required investment is 42,274.61 USD, which can be recovered in a short period of 117 days (approximately 4 months) of operation, confirming that the cost of insulation is insignificant compared to the operational benefits and fuel savings. This justifies that installing thermal insulation on steam lines is a highly profitable strategic measure for the plant.

Keywords: Thermal insulation, Temperature, Heat loss, Optimal thickness, Insulating material, Energy balance, Heat transfer, Steam piping, and Efficiency.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Cabrera, M. & Baca, L. (2016) en su tesis titulada “Estudio del sistema de aislamiento térmico industrial para determinar y analizar su rendimiento energético en el transporte de NaSH y soda cáustica en una empresa minera”, tiene como objetivo analizar el rendimiento energético de los sistemas de aislamiento térmico industrial en el transporte de NaSH y soda cáustica en una empresa minera, utilizando lana de roca como material aislante con un espesor de 30 mm. El sistema de transporte de NaOH alcanza una eficiencia de aislamiento del 83.96%, mientras que el sistema de transporte de NaSH, presenta una eficiencia del 83.28%, lo que permite conservar casi en su totalidad el calor necesario para su posterior aplicación.

Chepe, C. & Núñez, S. (2018) en su tesis titulada “Diseño de un sistema de aislamiento térmico para la red de tuberías de vapor en la empresa agroindustrial Pucalá S.A.C.” tiene como objetivo principal determinar la geometría óptima del aislamiento térmico, definida por el espesor del material, ya sea de fabricación interna o comercial, así como la secuencia más adecuada de estos para minimizar los costos anuales de energía térmica en la empresa. La investigación concluyó que la falta de aislamiento en un promedio del 50% de las tuberías de vapor en la empresa generaba pérdidas de S/. 86,915 millones de soles/año. En base a estos resultados, se recomendó a la gerencia de la empresa considerar la renovación del material aislante en toda la longitud de las tuberías, utilizando un material aislante de mejor calidad y mayor durabilidad.

Aristizábal et al. (2014) en su trabajo de investigación titulado “*Análisis de pérdidas energéticas y económicas por transporte de vapor en tuberías sin un adecuado aislamiento térmico*”, tuvieron como objetivo calcular las pérdidas de recursos energéticos y económicos debido al deterioro o ausencia de aislamiento térmico en las tuberías de transporte de vapor dentro de una empresa dedicada a la producción de licores. La investigación concluyó que la aplicación del aislamiento térmico en las tuberías de transporte de vapor mejora la eficiencia de los procesos energéticos (relacionados con el transporte y distribución de vapor) con costos de inversión que pueden recuperarse en pocos meses, ya que el aislamiento permite un ahorro inmediato en el consumo de gas natural y

agua. Además, los tres tipos de aislamiento evaluados (fibra de vidrio - acero inoxidable, fibra de vidrio - acero galvanizado, lana de roca-aluminio) demostraron ser capaces de generar ahorros energéticos de al menos el 90%, en comparación con el escenario en el que las tuberías se encontraban sin ningún tipo de recubrimiento.

Pérez et al. (2017) en su trabajo de investigación titulado “*Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos, 23 de Agosto, en Camagüey*”, tuvieron como objetivo principal evaluar la eficiencia energética del generador de vapor. A partir de los resultados obtenidos concluyeron que el uso de aislamiento con lana mineral permitió una reducción promedio de las pérdidas de calor al ambiente del 89.97 % en las tuberías horizontales, y del 90.12 % en las tuberías verticales. Estos valores se encuentran dentro del rango establecido por la bibliografía consultada (Isachenko, Osipova & Sukomel, 1973) (Fonte, Nemiróvich & González, 1986), que va de un 75% a un 95 %.

Toala et al. (2021) en su artículo de investigación titulada “*Optimización energética mediante recubrimiento térmico en una red de distribución a vapor. Dominio de las Ciencias*”, tuvieron como objetivo optimizar el uso de la energía en una instalación de vapor, mejorando la red de distribución de vapor en el área de calderas. La investigación concluyó que un mayor espesor y una mayor porosidad del recubrimiento térmico proporciona una forma efectiva del aislamiento. La capa base del recubrimiento actúa como una resistencia térmica, lo que permite retener el calor y reducir la temperatura superficial de la tubería. Al aplicar aislamiento a las tuberías, se logró reducir en un 10% la formación de condensado, debido a que disminuye la variación de temperatura (ΔT) entre la temperatura interna y externa de la tubería. Esta reducción de la ΔT se traduce en una disminución global del 90% en las pérdidas térmicas.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El presente estudio se enfoca en la operación de la Planta Termochilca, una instalación que depende fundamentalmente de la calidad y eficiencia de su sistema de distribución de vapor para sus procesos energéticos y operativos.

Las tuberías de vapor cuando no cuentan con un sistema de aislamiento térmico provocan una serie de inconvenientes técnicos, económicos y de seguridad que comprometen la operación eficiente de la planta:

- La transferencia de calor cuando no se controla al ambiente genera pérdidas de energía provocando un mayor consumo de combustible para poder mantener la temperatura y presión requerida del vapor.
- Las pérdidas térmicas conllevan a la caída en la calidad y presión del vapor afectando directamente el rendimiento y la estabilidad de los procesos.
- Las tuberías de vapor sin aislamiento presentan superficies extremadamente calientes, generando un riesgo grave de quemaduras para el personal de operación y mantenimiento.

Por ello, implementar un sistema de aislamiento térmico es una necesidad urgente y fundamental para toda planta. Para la instalación del sistema del aislamiento térmico en las tuberías de vapor, los parámetros más relevantes a considerar son: la selección del espesor óptimo del material aislante, la caída de presión y la temperatura del vapor. Estos parámetros determinan una cantidad considerable en la variable de calor, el cual se le conoce como el calor perdido. Para reducir o mitigar el calor perdido en tuberías de vapor es esencial el uso de materiales aislantes térmicos en las tuberías.

Por lo tanto, la investigación busca responder la siguiente pregunta:

¿Cuáles son los parámetros que se deben establecer en el sistema de aislamiento térmico para minimizar las pérdidas de calor en las tuberías de vapor?

1.1.1. Objetivo general

Analizar térmicamente la implementación del sistema de aislamiento en tuberías de vapor en la Planta Termochilca.

1.1.2. Objetivo específico

Calcular las pérdidas calor de la tubería de vapor con y sin aislamiento.

Calcular la eficiencia para el aislamiento térmico
Determinar el espesor óptimo del aislamiento.
Calcular el ahorro energético y el costo inversión.

1.3. HIPOTESIS

Para la instalación del sistema del aislamiento térmico en las tuberías de vapor de la Planta Termochilca, los parámetros más relevantes a considerar son: la selección del espesor óptimo del material aislante, la caída de presión y la temperatura del vapor. Estos parámetros determinan una cantidad considerable en la variable Calor, el cual se le conoce como el calor perdido. Para reducir o mitigar el calor perdido en tuberías de vapor es esencial el uso de materiales aislantes térmicos en las tuberías. El presente estudio sugiere que la implementación de un sistema de aislamiento térmico en las tuberías de vapor de la Planta Termochilca permitirá reducir al menos el 15% de las pérdidas de calor durante el transporte del vapor.

1.4. JUSTIFICACIÓN Y LIMITACIONES DEL TRABAJO

1.4.1. Justificación

En el ámbito industrial, la eficiencia energética constituye un factor determinante para optimizar los procesos y reducir los costos operativos. En la Planta Termochilca, el sistema de transporte de vapor cumple un papel esencial en las operaciones productivas; sin embargo, las pérdidas de calor que se generan a lo largo de las tuberías representan una disminución en la eficiencia del sistema, además de un incremento en el consumo de combustible y en las emisiones térmicas al ambiente.

La aplicación de un sistema de aislamiento térmico adecuado en las líneas de vapor es una medida técnica efectiva para minimizar dichas pérdidas. No obstante, para lograr un diseño eficiente es necesario establecer parámetros óptimos que consideren la temperatura del vapor, la caída de presión y, principalmente, el espesor y tipo de material

aislante. La determinación de estos parámetros permitirá garantizar una operación térmicamente eficiente y económicamente viable.

Por tanto, este proyecto de investigación se justifica en la necesidad de evaluar, cuantificar y optimizar los parámetros del sistema de aislamiento térmico en las tuberías de vapor de la Planta Termochilca, con el propósito de reducir las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia energética del proceso.

Además, el estudio permitirá estimar el ahorro energético y el costo de inversión asociados a la implementación del aislamiento, generando información técnica que contribuya a la toma de decisiones en el diseño, mantenimiento y gestión energética de los sistemas térmicos industriales. En ese sentido, la investigación tiene un impacto directo en la optimización de los recursos energéticos de la planta, promueve el uso racional de la energía y aporta conocimientos aplicables a otros procesos industriales que utilicen sistemas de vapor como medio de transferencia térmica.

1.4.2. Limitaciones del trabajo

Las limitaciones en el presente trabajo de investigación son las siguientes:

- Solamente se utilizará dos materiales de estudio lana mineral roca y silicato calcio.
- Solamente se utilizará las ecuaciones de balance de energía convencionales.
- Se cuenta con información limitada de los procesos de la planta, debido a que la empresa (Termochilca) tiene un acuerdo de confidencialidad y no divulgación de la información de sus procesos.
- El estudio estará limitado a un grupo de 10 líneas de vapor.

1.5. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y PROYECTO EN ESTUDIO

El presente estudio se ejecuta en la Central Termoeléctrica Termochilca, la cual se encuentra ubicada en la Avenida Santo Domingo de los Olleros S/N del distrito de Chilca, provincia de Cañete por el km 63.5 al Sur de Lima.

El proceso de generación de energía se realiza mediante la utilización de gas natural como combustible principal. La central cuenta con dos ciclos de generación: ciclo simple con una capacidad instalada de 210 MW y ciclo combinado con una capacidad total de 334 MW.



Figura 1: Ubicación de la Planta Termochilca

Fuente: Google maps

El presente estudio se centra en el análisis termo-económico de las pérdidas de calor que ocurren a través de un estudio limitado de tuberías de vapor de proceso de la planta. El análisis abarca tres sistemas principales: Sistema de alta presión (HP), Sistema de presión intermedia (IP) y Sistema de baja presión (LP).

La eficiencia energética de una central termoeléctrica está directamente relacionada con la capacidad de mantener el contenido energético del vapor desde su generación hasta la turbina. Las pérdidas de calor en las tuberías representan una disminución significativa de la eficiencia y un costo operativo debido al consumo de combustible adicional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. SISTEMA DE GENERACIÓN Y TRANSPORTE DE VAPOR

2.1.1. Generación de vapor

El vapor se obtiene mediante la conversión de agua en estado líquido a vapor saturado o sobrecalentado a través de calderas. El calor necesario se transfiere por combustión de combustible fósil o mediante energía térmica residual. El vapor generado es utilizado como fluido de trabajo para transferencia de calor, accionamiento de turbinas o procesos industriales.

Las etapas fundamentales en la generación de vapor abarcan:

Preparación del agua alimentadora: tratamiento químico, de aireación, eliminación de contaminantes disueltos. (Manual de Walter Essentials Handbook: Fundamentals of Industrial Boilers and Steam Generation Systems publicado por ChemTreat, 2023).

Alimentación del agua a presión al generador de vapor (caldera, generador de recuperación, etc.).

Aporte térmico a la caldera puede provenir de combustibles fósiles como carbón, gas natural o petróleo, así como de energía residual, biomasa o fuentes nucleares. (John B. Kitto y Steven C. Stultz, 2005).

Evaporación: el agua alcanza su punto de ebullición para la presión de operación y se transforma en vapor. Más allá de la saturación, en muchas aplicaciones se genera vapor sobrecalentado para mejorar su calidad térmica. (John B. Kitto y Steven C. Stultz, 2005).

Separación de vapor y retorno de agua (en sistemas de recirculación) y el envío del vapor al sistema de distribución.

Este proceso es crítico para la planta industrial porque determina la presión, temperatura y caudal del vapor disponible para los usuarios (turbinas, procesos térmicos, etc.). Las características de diseño (presión, temperatura, calidad del vapor) impactan directamente en la eficiencia energética global.

2.1.2. Transporte de vapor

Luego de generarse el vapor, este debe ser transportado desde el punto de generación hasta los puntos de utilización como son las turbinas, intercambiadores y procesos térmicos.

El transporte involucra un sistema que incluyen:

- **Red de tuberías de vapor:** diseñadas para soportar la presión, temperatura y expansión térmica del vapor.
- **Aislación térmica:** para minimizar pérdidas de calor durante el trayecto.
- **Trampas de condensado:** para extraer condensado generado durante el transporte, lo cual evita golpes de ariete, pérdidas de eficiencia y permite retorno del condensado a la caldera.
- **Válvulas de aislamiento y control:** permiten la operación segura del sistema.
- **Sistema de retorno de agua (condensado o drenaje):** reduce el consumo de agua y energía al reutilizar el calor de condensado.
- **Expansión térmica y soportes:** los tramos de tubería deben incluir juntas de expansión para absorber elongaciones por temperatura.

El vapor al transportarse por tuberías bajo presión, durante su trayecto pierde energía térmica hacia el entorno por conducción, convección y radiación, lo cual disminuye su temperatura y calidad energética, provocando condensación parcial. Estas pérdidas afectan directamente el rendimiento de todo el sistema.

2.1.3. Importancia para la eficiencia energética

El sistema de generación y transporte de vapor desempeña un papel de alta importancia en la eficiencia energética de instalaciones industriales. Las pérdidas térmicas ya sea por fugas de vapor, condensado sin retorno, pérdidas de calor en tuberías o un aislamiento deficiente, incrementan el consumo de combustible y disminuyen el rendimiento

global del sistema afectando la productividad y la sostenibilidad operativa.

2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor se refiere al intercambio de energía entre diferentes materiales (sólido/líquido/gas) debido a una diferencia de temperatura. La energía libre termodinámica es la cantidad de trabajo que un sistema puede realizar dentro de un proceso termodinámico. La entalpía representada por la letra "H", es un potencial termodinámico que se calcula sumando la energía interna del sistema (U) y el producto de la presión (P) por el volumen (V). El joule es una unidad utilizada para medir la energía, el trabajo y la cantidad de calor (Unamacor, 2023).

La transferencia de calor, tanto termodinámica como mecánica, se determina mediante el coeficiente de transferencia de calor, que establece la relación entre el flujo de calor y la fuerza motriz termodinámica que lo impulsa. El flujo de calor es una medida cuantitativa del paso de calor a través de una superficie, representada como un vector. (Unamacor, 2023)

2.2.1. Mecanismos de transferencia de calor

a) Conducción

La transferencia de energía entre objetos en contacto físico se conoce como conducción térmica. La conductividad térmica es la capacidad de un material para transferir calor y se evalúa principalmente a través de la Ley de Fourier, que describe la conducción del calor. (Puig, 1950)

La conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor dentro de un sólido o entre sólidos en contacto térmico. Los fluidos, especialmente los gases, tienen una conductividad térmica mucho menor. La conductancia de contacto térmico se refiere al estudio de la conducción de calor entre cuerpos sólidos que están en contacto. Este proceso de transferencia de calor sin movimiento de las partículas ocurre por ejemplo cuando se coloca una mano sobre un

vaso de agua fría: el calor fluye desde la piel caliente hasta el vaso frío, y si la mano se mantiene a cierta distancia del vaso, la transferencia de calor será mínima, ya que el aire es un mal conductor térmico.

La conducción en estado estacionario es un modelo idealizado que describe la transferencia de calor por conducción cuando la diferencia de temperatura que impulsa el proceso se mantiene constante. En este caso, después de un tiempo, la distribución de temperaturas dentro del objeto conductor ya no cambia (según la Ley de Fourier). En este tipo de conducción, la cantidad de calor que entra en una sección es igual a la que sale, ya que no hay variación de temperatura en el sistema. (Thermal Engineering, 2018).

La conducción es la transferencia de calor a través de un material sólido. Se describe por la ley de Fourier:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde:

- Q : flujo de calor (W),
- k : conductividad térmica del material (W/m·K),
- A : área de transferencia (m²),
- dT/dx : gradiente de temperatura.

En tuberías cilíndricas (como las de vapor), el flujo de calor radial se expresa como (Holman, 2010):

$$Q = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2)$$

La ecuación muestra que el aumento del espesor o del material aislante (r_2) reduce la pérdida de calor.

b) Convección

La transferencia de calor por convección se produce cuando el calor se transporta de un lugar a otro mediante el movimiento de un fluido, un proceso que involucra la transferencia de calor a través del desplazamiento de masa. El movimiento del fluido facilita la transferencia de calor en diversas situaciones físicas, como, por ejemplo, entre una superficie sólida y el fluido circundante. (Academia Lab, 2019).

Se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

Donde:

- h : coeficiente de transferencia convectiva ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),
- T_s : temperatura superficial,
- T_{∞} : temperatura del ambiente.

El coeficiente h depende de factores como velocidad del aire, posición de la tubería y temperatura.

c) Radiación

La transferencia de calor por radiación involucra la emisión de energía en forma de radiación electromagnética, específicamente a través de ondas térmicas. Este proceso puede ocurrir a través del vacío o cualquier medio transparente como sólidos, líquidos o gases. Todos los objetos cuya temperatura es superior al cero absoluto emiten radiación térmica debido a los movimientos aleatorios de átomos y moléculas. Como estos átomos y moléculas están formados por partículas cargadas (protones y electrones), su movimiento genera la emisión de radiación electromagnética que transporta energía. En general, la radiación térmica es relevante en ingeniería principalmente para objetos muy calientes o aquellos con una gran diferencia de temperatura. (Academia Lab, 2019).

Se calcula mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

Donde:

- Q : Flujo de calor.
- ε : Emisividad (para un cuerpo negro, la unidad es 1),
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann,
- A : Factor de vista entre las superficies de los objetos a y b
- T_a y T_b :Temperaturas absolutas de los objetos expresados en kelvin (°K) o grados Rankine (°R).

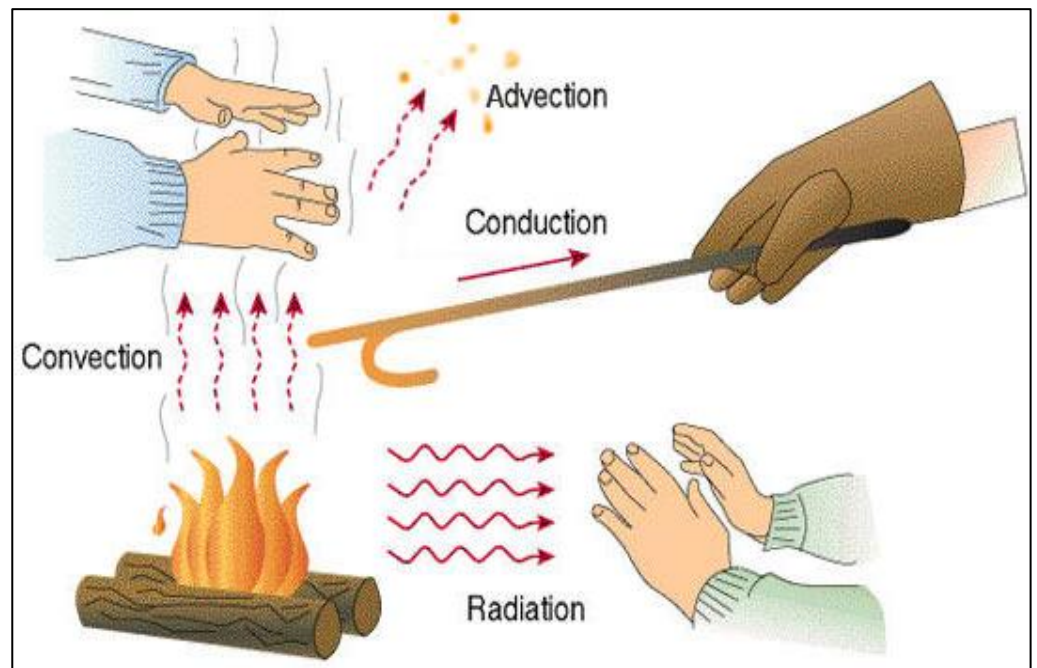


Figura 2: Los cuatro modos fundamentales de transferencia de calor ilustrados con una fogata.

Fuente: Cabrera, M. & Baca, L. (2016)

2.3. AISLAMIENTO TÉRMICO

2.3.1. Definición

El aislamiento térmico se define como la capacidad que tienen determinados materiales para oponerse a la transferencia de calor por conducción térmica. Es decir, es la capacidad de resistencia térmica que tienen los materiales (Digamma, 2018).

Es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción. Se evalúa por la resistencia térmica que tienen. La medida de la resistencia térmica o, lo que es lo mismo, de la capacidad de aislar térmicamente, se expresa, en el Sistema Internacional de Unidades (SI) en $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (metro cuadrado y kelvin por vatio). (Industriales, 2013).

La Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes (ANDIMAT) define el aislamiento térmico como la capacidad de controlar la transmisión de calor cuando se desea que no exceda ciertos límites (Energéticos, 2017).

El aislamiento térmico es la aplicación de materiales que mantienen la temperatura interna regulada e independiente de la temperatura externa. (Osorio, 2023)

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y en la industria, caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso de calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura. (Hispania, 2016). Asimismo, un aislante térmico es un material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura. (Lumitos, 2019).

En aplicaciones industriales, el aislamiento térmico cumple los siguientes objetivos (Perry & Green, 2008):

- Minimizar pérdidas de calor y mejorar la eficiencia energética.
- Mantener la temperatura del fluido en transporte.
- Proteger al personal de quemaduras por contacto.
- Prevenir la condensación del vapor.

- Reducir costos operativos y emisiones de CO₂.

2.3.2. El aislamiento térmico en la industria

El aislamiento térmico es necesario para garantizar la seguridad, reducir las pérdidas de energéticas (calor-frío) y para aumentar la sostenibilidad de los procesos. Las razones básicas para el aislamiento térmico de equipos y procesos: protección personal, mejorar la seguridad del proceso, reducción de las pérdidas de calor y frío, economizando energía, reducción el impacto ambiental, aumento de la sostenibilidad de los procesos y equipos. (Gobain, 2023).

Protección personal: Para proteger al personal de lesiones producidas por el contacto con las superficies de los equipos y tuberías a altas o bajas temperaturas.

Mejorar la seguridad en los procesos: Para mantener una temperatura óptima en las tuberías o tanques de almacenamiento de productos líquidos o gaseosos que a su vez eviten la corrosión producida por condensaciones (altos niveles de humedad / punto del rocío). También para evitar la congelación de los equipos que trabajan a muy baja temperatura.

Reducir las pérdidas de calor para economizar: Para reducir la pérdida o ganancia de calor y por lo tanto reducir la cantidad de energía necesaria para mantener el equilibrio del proceso y por lo tanto ahorrar de costes. Optimizando el aislamiento se reducen los costes de instalación proporcionando el máximo ahorro de energía durante la vida útil de la instalación.

Reducir impactos en el Medioambiente: Optimizando la eficiencia de aislamiento para maximizar el potencial de ahorro de CO₂ (reducción de costos de emisión de CO₂), así como proporcionar una protección contra futuros costes de la energía.

Mejorar la sostenibilidad a través de la máxima eficiencia energética: La gama de productos técnicos, está diseñada para proporcionar una conductividad térmica óptima para cada aplicación. La conductividad térmica del aislamiento se mide en la escala de

temperatura de acuerdo con la norma EN 12667 para los productos planos y EN ISO 8497 para las secciones de la tubería.

El intercambio de calor es un proceso de gran importancia para la industria. Este debe ir de la mano con un apropiado aislamiento térmico que le permitirá aumentar la seguridad del ambiente de trabajo y un ahorro considerable de los recursos energéticos, incrementando las ganancias mensuales. En ese sentido el poliuretano se postula como la solución más eficiente y duradera. (IPUR, 2023).

El objetivo, es reducir la cantidad de energía necesaria para mantener el equilibrio del proceso y evitar el flujo de calor a través del material. Esto se consigue, gracias a la instalación del aislamiento, reduciendo las pérdidas de calor. El aislamiento reduce las pérdidas energéticas, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento. La optimización del aislamiento en la instalación inicial reducirá los costes de instalación y proporcionará ahorros energéticos máximos alargando el tiempo de vida de la instalación. (Adima, 2020).

2.3.3. Parámetros de operación del sistema de aislamiento térmico

El aislamiento térmico cumple un papel fundamental en los sistemas industriales para garantizar la seguridad, reducir las pérdidas de energéticas (calor-frío) y para aumentar la sostenibilidad de los procesos. Por ello se indica los siguientes parámetros de operación necesarios del sistema de aislamiento térmico:

- Temperatura
 - La temperatura del fluido (vapor) y de la superficie externa de la tubería determina la cantidad de calor que se transfiere hacia el ambiente.
 - La diferencia de temperatura entre el interior de la tubería y el entorno es el principal impulsor de la transferencia de calor.
 - Adicionalmente la temperatura máxima que soporta el material aislante sin degradarse o perder sus propiedades (temperatura

límite de servicio).

- Transferencia calor
 - La pérdida de calor ocurre por conducción a través de la pared de la tubería, así como por convección-radiación entre el material aislante y el ambiente.
 - Para calcular las pérdidas de calor se utilizan leyes de transferencia de calor como la ecuación de conducción radial en cilindros (Ley de Fourier) y el balance de energía.
 - Reducir la transferencia de calor implica minimizar el flujo de calor perdido (W/m o kcal/h) y, por tanto, aumentar la eficiencia del sistema de vapor.
- Espesor del material aislante.
 - El espesor del material aislante es uno de los parámetros más importantes porque influye directamente en la cantidad de calor perdido y en el costo del aislamiento.
 - Existe un espesor óptimo, tanto desde el punto de vista económico como técnico, en el cual el ahorro energético generado supera el costo adicional asociado al material y su instalación.
 - El cálculo de este valor requiere considerar propiedades del material aislante, tales como la conductividad térmica (k), la temperatura de operación, el diámetro de la tubería y la temperatura ambiente.
 - Seleccionar el espesor óptimo del aislante permite un equilibrio entre costo de inversión y ahorro energético (Holman, 2010).

2.3.4. Propiedades térmicas de los materiales aislantes

Las propiedades que se consideran para la elección del material son:

Tabla 1: Propiedades térmicas de los materiales aislantes

Propiedad	Descripción	Importancia
Conductividad térmica (k)	Capacidad de conducir calor. Materiales aislantes tienen k baja.	Cuanto menor es k, mejor aislamiento.
Densidad	Masa por unidad de volumen.	Afecta la resistencia mecánica y peso total.
Temperatura máxima de servicio	Temperatura máxima sin degradarse.	Esencial para tuberías de vapor (>200 °C).
Emisividad (ϵ)	Capacidad para emitir radiación térmica.	Superficies con baja emisividad reducen pérdidas por radiación.
Absorción de humedad	Capacidad de absorber agua.	Importante para evitar corrosión y pérdida de capacidad aislante.

Fuente: Elaboración propia

2.3.5. Tipos de aislantes térmicos

2.3.5.1. Aislantes fibrosos

- Lana mineral: Las mantas o paneles de lana mineral de roca están formados en un 98 % por roca volcánica (basalto) y un 2% de ligante orgánico. Este material no absorbe agua debido a su estructura no capilar, lo que le ofrece una alta permeabilidad al vapor. Además, su disposición multidireccional mejora significativamente el aislamiento térmico de los elementos constructivos en los que se utiliza. (Unamacor, 2023).
- Lana de vidrio: Se produce al fundir arena a temperaturas elevadas, y su estructura se compone de finas fibras de vidrio unidas por un aglomerante o resina. Los productos de lana de

vidrio no absorben el agua, ya que presentan una estructura de fibras dispuestas de forma aleatoria. Gracias a su porosidad abierta, la lana de vidrio atrapa aire en su interior, lo que reduce significativamente su conductividad térmica y le ofrece excelentes propiedades como material aislante. (Unamacor, 2023).

2.3.5.2. Aislantes Granulares

- Perlita expandida: es un vidrio volcánico natural amorfo que tiene un contenido relativamente alto de agua, típicamente formado por la hidratación de la obsidiana. Es un mineral industrial y un producto comercial útil por su baja conductividad térmica, excelente propiedad térmica y de peso ligero. En la industria este material se utiliza para el aislamiento térmico de recipientes, tanques entre otros.
- Vermiculita expandida: es un mineral natural, específicamente un silicato de magnesio, hierro y aluminio, que experimenta un notable aumento de volumen al ser sometido a altas temperaturas, entre 900 y 1200 grados. Este fenómeno, conocido como expansión, permite que los granos se inflen hasta aproximadamente diez veces su tamaño original, creando una textura ligera y aireada.

La vermiculita es un material versátil y eficaz en aplicaciones de aislamiento térmico, capaz de soportar temperaturas que oscilan entre 200 y 1200 °C. Esta propiedad la convierte en una opción ideal para entornos donde se requiere una alta resistencia al calor, como en la construcción de chimeneas, hornos y otros equipos industriales. Además de su resistencia a temperaturas extremas ofrece ventajas adicionales, como su ligereza y facilidad de manejo. (Termicosyacusticos.es)

2.3.5.3. Aislantes celulares

- Poliuretano (PUR): es un material derivado de la reacción química entre polioles y diisocianatos. Este proceso da como resultado un material con una estructura celular cerrada, lo que lo convierte en un excelente aislante térmico. (Espumlatex.es).
- Poli-isocianurato (PIR): es una evolución del PUR, en las espumas PIR se trabaja con índices de isocianatos muy altos y se promueve de este consigo mismo generando lo que se conoce como Isocianurato. Esto le confiere propiedades adicionales, como una mayor resistencia al fuego y estabilidad térmica a temperaturas más altas.
- Poliestireno expandido (EPS): es un material de plástico celular y rígido que se emplea como aislante térmico. Se fabrica mediante el moldeo de perlas pre expandidas de poliestireno expandido, dando lugar a una estructura cerrada repleta de aire.

2.3.5.4. Aislantes refractarios o de alta temperatura

- Ladrillo refractario: es fabricado con materiales como alúmina, sílice, magnesita o arcilla refractaria, que le otorgan una alta resistencia al calor (hasta 1,500 °C o más, según el tipo).

Los ladrillos refractarios son materiales cerámicos diseñados para resistir altas temperaturas, corrosión y desgaste en entornos extremos.

- Fibra cerámica: está compuesta por fibras entretrejidas largas y flexibles, fabricadas a través del proceso “spun”, creando con esto un producto durable, fuerte y ligero. Este material puede usarse para aplicaciones con temperaturas que van desde los 538 0C (1000 0F) hasta los 1425°0C (2000°0F). (Nutec.com).

La manta de cerámica se utiliza en hornos industriales, cámaras de combustión, paredes calderos, ductos calientes, chimeneas, tuberías para alta temperatura, turbinas entre otros. (Nutec.com).

- Silicato calcio: es un material aislante utilizado principalmente en entornos comerciales e industriales. Se emplea cuando se requiere resistencia a la compresión, al desgaste y a la incombustibilidad. Gracias a su baja conductividad térmica, es particularmente adecuado para el aislamiento térmico de equipos y tuberías que operan a altas temperaturas. (Prefiterm S.A.).

El silicato de calcio contribuye al ahorro energético al reducir el consumo de energía, lo que también disminuye los costos de producción a corto plazo. Además, facilita el control de la temperatura y ayuda a reducir las emisiones de contaminantes en sistemas que operan con temperatura medias y altas.

2.3.5.5. Conductividad térmica de los materiales aislantes

La conductividad térmica de los materiales aislantes es importante para reducir la transferencia de calor, manteniendo la eficiencia energética en aplicaciones industriales y domésticas. Cuando los materiales aislantes tienen baja conductividad térmica eso significa que son efectivos para reducir la transferencia de calor.

Tabla 2: Tabla de conductividad térmica de materiales aislantes

Material aislante	Rango de conductividad térmica (k)	Temperatura máxima de uso	Característica principal
Lana mineral de roca	0.035 – 0.065 W/m·K	150 – 700 °C	Bajo costo, buena resistencia térmica, no inflamable.
Fibra de vidrio	0.032 – 0.040 W/m·K	450 °C	Ligera, fácil instalación, buen aislante térmico y acústico.
Silicato de calcio	0.050 – 0.078 W/m·K 0.050 – 0.078	650 – 1000 °C	Alta resistencia mecánica, ideal para tuberías de alta presión y temperatura.

	W/m·K		
	0.050 – 0.078		
	W/m·K		
Fibra cerámica	0.080 – 0.120 W/m·K	1 200 – 1 400 °C	Alta resistencia térmica, apta para zonas cercanas a hornos o calderas.
Espuma elastomérica (tipo Armaflex)	0.033 – 0.038 W/m·K	105 – 150 °C	Flexible, buena para evitar condensación, usada en vapor de baja presión y refrigeración.
Aerogel	0.014 – 0.020 W/m·K	650 °C	Flexible, buena para evitar condensación, usada en vapor de baja presión y refrigeración.

Fuente: Cengel e Incropera

2.3.6. Pérdidas de calor en tuberías

Las tuberías de vapor sin aislamiento permiten que el calor fluya libremente hacia el ambiente, lo cual provoca:

- Reducción de la temperatura del vapor.
- Formación de condensado.
- Aumento del consumo de combustible.
- Riesgos de quemaduras por contacto.

Según García & Agudelo (2019), una tubería de vapor de 150 °C sin aislamiento puede perder hasta 700 W por metro lineal, lo que representa pérdidas significativas en plantas termoeléctricas.

2.3.7. Espesor optimo 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.

El espesor óptimo se determina mediante análisis económico-energético:

$$C_{total} = C_{energía\ perdida} + C_{aislamiento} \quad (5)$$

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.

El último grado (de 0,030 a 0,050 m) es el más grueso y se conoce como 50 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.



Figura 3: Grafica de costos en función del espesor del aislamiento

Fuente: Google Maps.

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”. 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.

El espesor del aislamiento térmico para el cual el costo total (costo del material de aislamiento + costo de la energía) es mínimo se denomina espesor económico.

2.3.8. Montaje de aislamiento térmico en tuberías

2.3.8.1. Requisitos de la instalación previos al montaje del aislamiento

- La superficie donde se va a realizar el aislamiento térmico tiene que haber superado todas las pruebas de correcto funcionamiento, solo así cuando el cliente haya notificado al instalador que la línea o equipo esta liberada se podrá proceder con la instalación del aislamiento térmico.

- Las superficies donde se colocará el aislamiento térmico deberán estar secas, libres de suciedad, aceite, grasa o cualquier materia extraña.
- Todo material aislante deberá estar en buenas condiciones y contará con fichas técnicas para corroborar que el material cumple con los requerimientos del cliente.

2.3.8.2. Sistema de soportes

- Se colocará sistemas de soportes cuando la posición de las tuberías sea horizontal o vertical y según las características del material aislante y del recubrimiento (externo) seleccionado para la instalación.
- Generalmente cuando se instala preformados no requiere montar estructura de soporte, pero si se instala manta o silicato calcio es necesario que se coloquen.
- La estructura de soportes de los materiales de recubrimiento, es necesario diseñarla de tal forma que mantenga su función, en especial, la diferencia de dilatación entre las superficies a aislar (temperatura de trabajo) y la superficie del recubrimiento (temperatura cercana al ambiente).

2.3.8.3. Instalación del material aislante

- El montaje del material aislante a instalar dependerá de los materiales seleccionados para tal fin y de los soportes de aislamiento previamente instalados en las superficies a aislar.
- El material de aislante que se encuentra en el mercado es como: mantas o paneles flexibles y se instalará en una o varias capas hasta alcanzar el espesor requerido.
- En cada capa de aislamiento, el instalador se asegurará de que:
 - Se realice una completa cubrición de las superficies a aislar de manera uniforme como sea posible.

- Los materiales de aislamiento deben quedar correctamente fijados a la superficie a aislar.
- Evitar dejar huecos o zonas sin material de aislamiento a menos que existan necesidades de operación o mantenimiento en algún componente (bridas, válvulas, ventanas de inspección, etc.).
- Las distintas piezas adyacentes se ciñan perfectamente unas a otras evitando fisuras, y se fijen entre sí mediante el uso de alambre o malla, cintas o pegamentos, en función de la tipología del material aislante.
- Tener en cuenta las dilataciones de la superficie a aislar cuando se caliente y se diseñe como absorber el exceso de longitud cuando sea apreciable. Si el material de aislamiento es flexible, se puede montar para que este exceso de longitud lo absorba por sí mismo. Si el material es rígido, es necesario instalar juntas de dilatación de materiales flexibles para dicha absorción de la dilatación.
- Tener especial cuidado en el remate de los extremos de aislamiento para evitar posibles fisuras.

2.3.8.4. Instalación del recubrimiento exterior

- Es recomendable proteger el aislamiento frente a las influencias del tiempo y a las cargas mecánicas.
- Elegir el revestimiento adecuado dependerá de diversos factores, tales como la resistencia al paso, cargas por viento o nieve, temperatura y condiciones ambientales, entre otros.
- El óptimo montaje del material de recubrimiento es el requisito principal para garantizar la durabilidad en el tiempo y la calidad del aislamiento en las superficies aisladas.
- Un sistema de aislamiento resistente al paso (zona transitable) debe de poder soportar a una persona de 100 kg de peso, herramientas incluidas, sin sufrir deformación.

- El montaje del recubrimiento a instalar dependerá de los materiales seleccionados para tal fin (metálicos o no metálicos) y de los soportes de aislamiento y/o distanciadores previamente instalados en las superficies (cuando sean necesarios).
- Para la elección del material de recubrimiento adecuado hay que tener en cuenta que:
 - En ambientes externos generalmente se utiliza aluminio, fácil de trabajar, más económico que el acero inoxidable y relativamente resistente frente a la corrosión.
 - En ambientes corrosivos usaremos acero inoxidable o composites a base de poliéster reforzado con fibra de vidrio.
 - En ambientes con riesgo de incendio utilizaremos acero inoxidable.
 - La temperatura superficial del recubrimiento dependerá del tipo de material utilizado. Generalmente cuanto más brillante sea la superficie, mayor será la temperatura superficial.
- En el caso del recubrimiento metálico, debemos asegurar que:
 - Se realice un completo revestimiento de las superficies aisladas, incluyendo tapas, finales de aislamiento y cualquier parte del mismo que pueda quedar al aire durante los trabajos normales de operación y mantenimiento.
 - Se realice el montaje de las piezas metálicas, siempre la superior sobre la inferior, a favor del agua para evitar que ésta penetre al interior del aislamiento y lo deteriore. Este es el criterio de instalación principal en el montaje del recubrimiento.



Figura 4: Ejemplo de colocación del recubrimiento metálico para evitar entrada de agua.

Fuente: Fenercom.com

- Se bordoneen todos los extremos de recubrimiento que queden vistos, para dificultar la entrada de agua al aislamiento.
- La cubierta metálica deberá ser fabricado en función al desarrollo de la tubería aislada, y se monten con un solape longitudinal de mínimo 30 mm (siempre a favor de agua), y cerradas con tornillos de acero inoxidable y junta elastomérica, instalados cada 250 mm máximo. Alternativa o complementariamente se podrán usar otros sistemas de cierre como remaches, flejes, etc.
- La unión entre cada cubierta metálica se podrá realizar mediante pestaña macho/hembra engatillando la unión o mediante solapes del superior (con macho) y del inferior (con hembra), permitiendo la dilatación.
- Tener en cuenta las dilataciones de la superficie a aislar cuando se calienta. En base a ello, se instalará los solapes necesarios (en número y longitud) para absorber el movimiento relativo entre las chapas, y garantizar que el aislamiento interior nunca quede expuesto a la intemperie.
- Tener cuidado en el remate de los cortes en el recubrimiento metálico, por existencia de soportes, tubuladuras, instrumentos, etc., mediante la colocación de cortes o rosetas ajustadas.
- En todos aquellos remates que haya riesgo de entrada de agua, se rematen con un elastómero flexible tipo silicona o similar, que soporte las condiciones de funcionamiento y ambientales previstas.
- El recubrimiento en codos, accesorios, soportes entre otros., se realizará mediante segmentos según la caída de agua.

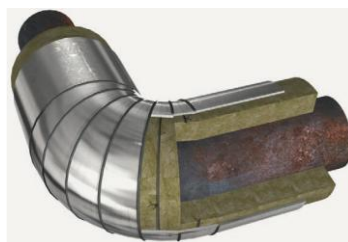


Figura 5: Instalación cubierta metálica a codo

Fuente: Isover

- Se fabricarán cajas metálicas para las válvulas y bridas del tipo desmontable con cierres de apertura rápida de acero inoxidable, sujetos con ganchos de acero inoxidable.

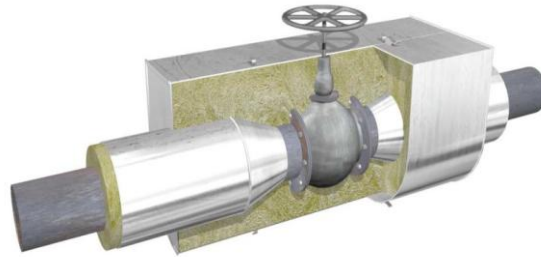


Figura 6: Instalación cubierta metálica a válvula

Fuente: Isover

2.3.9. Mantenimiento en sistemas de aislamiento térmico

Para prevenir costos operativos adicionales o el daño irreversible de los sistemas de aislamiento térmico, es fundamental identificar posibles fallas que puedan afectar su rendimiento:

- Falta de reposición del aislamiento.
- Aislamiento afectado por la humedad.
- Daños en la barrera de vapor.
- Arrugas o deformaciones que indican la necesidad de instalar juntas de expansión.
- Áreas sin aislamiento, especialmente fuera de los equipos o tuberías.
- Daños ocasionados por tráficos de personas o maquinaria en zonas con alto riesgo de abuso mecánico.
- Condensación o congelamiento en sistemas que operan a bajas temperaturas.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODO

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1. Materiales

Los materiales que se utilizaron para el aislamiento térmico de las líneas de vapor fueron seleccionados según las especificaciones técnicas del proveedor Rockfibras y la normativa ASTM C533 para aislamiento con silicato de calcio y ASTM C547 para lana mineral.

Tabla 3: Materiales utilizados para el aislamiento térmico de tuberías

Material	Descripción	Especificaciones técnicas
Silicato de calcio	Material aislante rígido para líneas de alta temperatura.	Conductividad térmica: 0.078 W/m·K.
	Presentación: media caña.	Densidad: 120 kg/m ³ .
Lana mineral	Material aislante en forma de preformado o manta flexible con malla galvanizada	Conductividad térmica: 0.065 W/m·K.
		Densidad: 100 kg/m ³ .
Plancha de aluminio liso	Recubrimiento exterior de protección mecánica	0.8 mm 1 mm:
Alambre galvanizado N°18	Fijación de mantas aislantes.	Alta resistencia mecánica y térmica.
Fleje y grapa de acero inoxidable de ½" y ¾"	Elemento de fijación del recubrimiento metálico	½" utilizado para tuberías de diámetro menor o igual de 6"
		¾" utilizado para tuberías mayores a 6".
Autorroscantes con arandelas neopreno de acero inoxidable	Fijación del recubrimiento metálico.	Tamaño: 10 x 3/4".

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Equipos e instrumentos de medición

Los equipos o instrumentos que se utilizaron para la medición son:

- Termocuplas para registrar la temperatura en diferentes puntos del proceso.
- Cámara termográfica bolsillo marca Fluke PTi120, para registro visual del gradiente de temperatura superficial. Anexo D.
- Cinta métrica metálica (5 m), para medición de longitudes de tuberías y secciones aisladas.
- Calibrador Vernier para verificación del espesor del aislamiento aplicado.
- Ficha técnica de los materiales aislantes (silicato de calcio y lana mineral). Anexo F y G.
- Computadora portátil para el procesamiento de datos térmicos y elaboración de gráficos.
- Para mayor detalle, se especifica las características técnicas de los instrumentos de medición en los Anexos.

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método de la investigación

El presente estudio de investigación se clasifica como descriptivo correlacional, con un enfoque cuantitativo y de diseño no experimental.

- Descriptiva, porque analiza las características físicas y térmicas del sistema de tuberías de vapor y los materiales aislantes empleados, describiendo su comportamiento frente a la pérdida de calor.
- Correlacional, porque busca establecer la relación entre los parámetros del sistema de aislamiento (espesor, conductividad térmica, temperatura del vapor) y la magnitud de las pérdidas de calor.
- Cuantitativa, ya que se realiza a través de la obtención de datos medibles, aplicando fórmulas de transferencia térmica, eficiencia y ahorro energético.

- No experimental, porque no se manipulan las variables, sino que se observan y analizan en su entorno industrial (Planta Termochilca).

3.2.2. Diseño

Se utilizará el diseño descriptivo correlacional, las características de la investigación serán:



Donde:

M: Representa la muestra a tomar.

Ox: Aislante térmico

Oy: Pérdidas de Calor

r: Representa el grado de relación entre las variables.

3.2.3. Población y muestra

La población para este trabajo de investigación son las tuberías de vapor de la Planta Termochilca.

La muestra consiste en el material aislante térmico utilizado para reducir las pérdidas de calor existentes, según las tuberías seleccionadas que se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4: Dimensiones de las tuberías en estudio

Diámetro (Pulg.)	Espesor Aislante (Pulg.)	Longitud (m)	Tipo Aislante
18	6	30	Silicato Calcio
14	4	35	Silicato Calcio
12	4	25	Silicato Calcio
10	4	30	Silicato Calcio
8	4	35	Silicato Calcio

6	2	25	Silicato calcio
4	2	40	Lana Mineral
3	2	35	Lana Mineral
2	2	50	Lana Mineral
1 1/2	2	45	Lana Mineral

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Variables e indicadores

Variable independiente: Aislamiento térmico

Indicadores:

- Tipo material aislante (lana mineral y silicato calcio)
- Espesor de material aislante
- Conductividad térmica.
- Temperatura.

Variable dependiente: Pérdidas de Calor

Indicadores:

- Calor transferido.
- Balance de energía.

3.2.5. Procedimiento de la investigación

Para realizar el procedimiento de la investigación se consideró lo siguiente:

Paso N°01: Recolección de datos

- Identificar el diámetro y longitud de cada tramo de tubería.
- Registrar el tipo de material aislante existente y su espesor, de acuerdo con la ficha técnica del fabricante (Rockfibras, 2023).

- Obtener la conductividad térmica (k) y densidad (ρ) de los materiales aislantes según las fichas técnicas y normas ASTM C533 y C547.

Paso N°02: Medición de temperatura

- Realizar la medición de la temperatura de las tuberías de vapor con el uso de la cámara termográfica y termocuplas.

Paso N°03: Interpretación de datos

- Realizar el análisis e interpretación de los datos.

Paso N°04: Realizar los cálculos

- Aplicación de las ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de calor.
- Aplicar las ecuaciones de conducción cilíndrica y convección superficial, considerando los casos con y sin aislamiento.
- Determinar la eficiencia de aislamiento mediante el porcentaje de reducción de pérdidas.
- Estimar el espesor óptimo usando criterios técnico–económicos que minimicen el costo total anual.
- Calcular el ahorro energético anual, el costo de inversión y el período de retorno de la inversión.

Paso N°05: Análisis e interpretación de resultados

- Comparar los valores obtenidos y evaluar el cumplimiento de la hipótesis de investigación.

3.2.6. Aplicación de ecuaciones para cálculo de pérdidas de calor sin aislamiento

Para determinar la cantidad de calor que se pierde por transferencia de calor de la tubería expuesta hacia la parte externa del ambiente, considerando los coeficientes de transferencia de calor por convección y conducción, se considera la siguiente Figura 7.

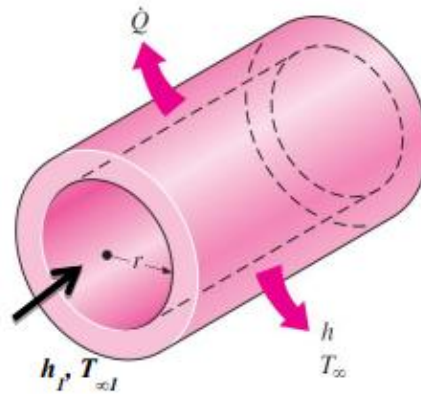


Figura 7: Tubería sin aislamiento

Fuente: Cengel,2011.

El flujo de calor se expresa mediante:

$$q = \frac{T_i - T_{\infty}}{R_{total}} \quad \frac{W}{m} \quad (6)$$

Donde:

q : flujo de calor (W/m)

T_s : temperatura superficial (K)

T_{∞} : temperatura del ambiente (K)

R_{total} : Resistencia térmica total ($m^2 K/W$)

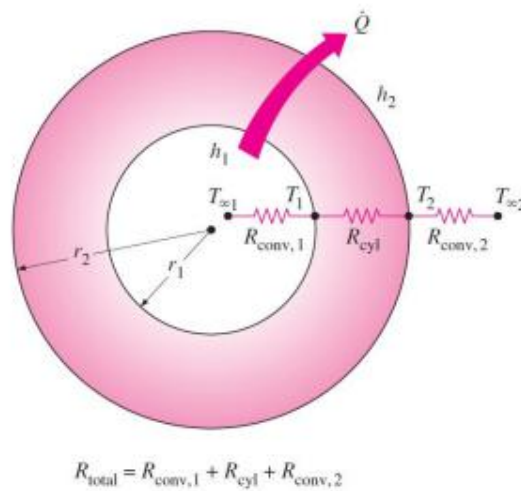


Figura 8: Distribución de resistencia en una tubería sin aislamiento

Fuente: Cengel,2011.

Mediante la distribución de la resistencia térmica según la figura 8, tenemos:

$$R_{total} = R_{cov,1} + R_{cil} + R_{conv,2} \quad (7)$$

Para determinar $R_{conv,1}$. convectivo tenemos que caracterizar al fluido si es laminar o turbulento por lo que se debe evaluar el Reynolds (Re). Para determinar Re, debemos conocer a qué velocidad se traslada el fluido. Para ello sabemos que el caudal volumétrico es:

$$Q = AV = \dot{m} / \rho \quad (8)$$

Donde:

$\dot{Q}$: es el caudal del fluido (m³/s) .

A: es el área de la sección transversal (m²).

V: es la velocidad del fluido (m/s).

$\dot{m}$: es el caudal masico.

ρ : es la densidad del fluido (kg/m³)

Despejando de la ecuación 8, obtenemos que la velocidad es:

$$V = \frac{\dot{m} v_g}{A} \quad (9)$$

Siendo v_g el volumen específico (m³/kg)

El Número de Reynolds es un valor adimensional crucial para determinar si el flujo dentro de la tubería es laminar o turbulento, lo cual es fundamental para seleccionar la correlación adecuada para el Número de Nusselt. Por lo que el número de Reynolds (Re), se obtiene (Cengel,2011):

$$Re = \frac{\rho V D_{int}}{\mu} = \frac{V D_{int}}{\nu} \quad (10)$$

Donde:

D_{int} : diámetro interior de la tubería.

V : velocidad del fluido (m/s).

ρ : densidad del fluido (kg/m³).

μ : viscosidad dinámica (kg/m.s).

ν : viscosidad cinemática (m²/s)

El criterio general del Re para el flujo interno (en tuberías circulares) es el siguiente:

Tabla 5: Criterios del Reynolds

Rango Re	Régimen de flujo	Características
$Re < 2000$	Flujo laminar	Las fuerzas viscosas dominan; el fluido se mueve en capas ordenadas.
$2000 < Re < 4000$	Flujo de transición	Es inestable, oscila entre laminar y turbulento.
$Re > 4000$	Flujo turbulento	Las fuerzas de inercia dominan; el movimiento es caótico, con remolinos y mezcla.

Fuente: Cengel, 2011.

Si el flujo es laminar con flujo de calor constante, se considera la siguiente fórmula para calcular el Numero de Nusselt (Cengel, 2011):

$$N_u = \frac{h D_{int}}{k_f} = 3.66 \quad (11)$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor con convección (W/m²K).

k_f : Conductividad térmica del fluido (W/m. K)

D_{int} : Diámetro de la tubería interna (m).

Si el flujo es turbulento se considera la correlación de Gnielinski especialmente cuando la diferencia de temperatura entre la pared y el fluido es grande y para un amplio rango de Reynolds:

$$N_u = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (12)$$

Donde:

Re : Numero de Reynolds.

Pr : Numero de Prandtl.

f : Factor de fricción de Darcy.

Para poder calcular el Nusselt, se calculará primero el Prandtl, mediante la ecuación:

$$Pr = \frac{\mu \times C_p}{k} \quad (13)$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica (kg/m. s).

C_p : Calor específico (J/kgK).

k : Conductividad térmica del fluido (W/m.K)

Luego se calculará el factor de fricción mediante la ecuación de Haaland (Cengel, 2011):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D_{int.}}}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (14)$$

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_{int.}}{3.7} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} \quad (15)$$

Donde:

D_{int} : Diámetro de la tubería interna (m).

Re: Numero de Reynolds.

ϵ : Rugosidad absoluta de la tubería

Tabla 6: Rugosidad absoluta de materiales

Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0.0015	Fundición asfaltada	0.06-0.18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0.01	Fundición	0.12-0.60
Tubos estirados de acero	0.0024	Acero comercial y soldado	0.03-0.09
Tubo de latón o cobre	0.0015	Hierro forjado	0.03-0.09
Fundición revestida de cemento	0.0024	Hierro galvanizado	0.06-0.24
Fundición con revestimiento bituminoso	0.0024	Madera	0.18-0.90
Fundición centrífuga	0.003	Hormigón	0.3-3

Fuente: Hidráulica general – Gilberto Sotelo

Con el valor del factor de fricción, ya se puede reemplazar en la ecuación del Nusselt y con ello poder calcular el Coeficiente convectivo del fluido:

$$h_1 = \frac{Nu_{cil} k_f}{D_i} \quad (16)$$

Siendo la resistencia convectiva 1:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1 h_1} \quad (17)$$

Para determinar el R conductivo 2, en función de la longitud y la conductividad térmica de la tubería acero al carbono se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k} \quad (18)$$

Para determinar el h2 convectivo total externo, se considera el h2 por radiación y el h2 por convección. Para el h por radiación, se tiene que:

$$h_r = C_r \left(\frac{T_s^4 - T_\infty^4}{T_s - T_\infty} \right) \quad (19)$$

Donde:

T_s : Temperatura de superficie (°C).

T_∞ : Temperatura del ambiente (°C).

C_r : Coeficiente de radiación (W/m²K⁴)

Para determinar el h2 convectivo se considera las propiedades del aire a la temperatura de película, tenemos:

$$T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (20)$$

Con ello se determinará primero el Re para saber si el flujo es laminar o turbulento y poder calcular el Nu.

$$N_{u,cil} = \frac{h_{cov} \cdot D}{k_f} = C Re^m Pr^n \quad (21)$$

Donde:

Re: Numero de Reynolds.

Pr: Numero de Prandtl

C: Constante.

m y n: Exponentes constantes.

El coeficiente total:

$$h_{total} = h_{rad} + h_{conv}. \quad (22)$$

Calculando el Coeficiente total, se podrá calcular R_3 :

$$R_3 = \frac{1}{2\pi r_2 h_{total}} \quad (23)$$

La resistencia térmica total del sistema se calcula mediante:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (24)$$

Al obtener la R_{total} se podrá calcular las pérdidas de calor en la tubería sin aislamiento mediante la ecuación 8.

3.2.7. Aplicación de ecuaciones para cálculo de pérdidas de calor con aislamiento

Para realizar el cálculo de las pérdidas de calor en una tubería con aislamiento térmico, se considera la siguiente figura:

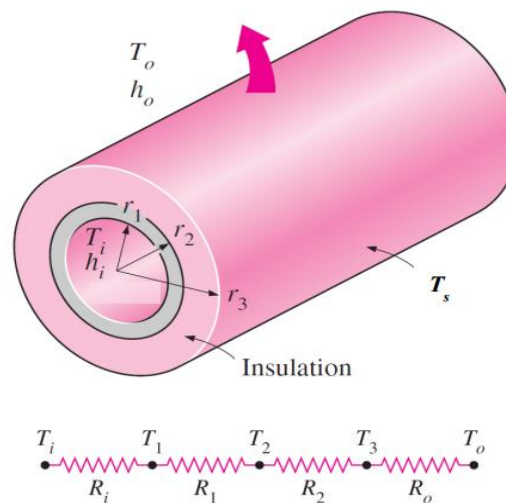


Figura 9: Red de resistencias térmicas para la tubería con aislamiento.

Fuente: (Cengel,2011)

De acuerdo con la figura 24, la resistencia térmica total del sistema para cada tipo de aislante es:

$$R_{TOTAL} = R_i + R_1 + R_2 + R_o \quad (25)$$

Tanto R_i convectivo como R_1 conductivo tienen los mismos valores, cuando se analiza sin aislamiento.

Para determinar R_2 conductivo considerando el tipo de aislamiento (silicato calcio y lana mineral) y de acuerdo con la figura, en función de la longitud y el tipo de aislante:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi k_2} \quad (26)$$

Se aplicarán las mismas ecuaciones que se realizaron cuando se analizaron las pérdidas de calor sin aislamiento, para poder calcular la transferencia de calor con aislamiento.

3.2.8. Aplicación ecuaciones para calcular la temperatura superficial

Para el cálculo de la Temperatura superficial se encontrará en el equilibrio donde el calor que atraviesa el aislamiento es igual al calor disipado al ambiente.

$$q_{cond.} = q_{ext.} \quad (27)$$

Para ello se realizará iteraciones y se considera T_s correcta cuando cumple el criterio de que la temperatura calculada es prácticamente idéntica a la temperatura asumida al inicio de la misma iteración.

Para realizar el cálculo se considera la siguiente ecuación:

$$\frac{T_i - T_s}{R_{int.} + R_{pared} + R_{aisl}} = h_{total,ext.} * (\pi D_{aisl}) * (T_s - T_{\infty}) \quad (28)$$

Despejando T_s tenemos:

$$T_s = \frac{\frac{T_i}{R_{int.} + R_{pared} + R_{aisl}} + h_{total,ext.} * \pi D_{aisl} * T_{\infty}}{\frac{1}{R_{int.} + R_{pared} + R_{aisl}} + h_{total,ext.} * \pi D_{aisl}} \quad (29)$$

3.2.9. Aplicación ecuaciones para calcular la eficiencia, ahorro económico, ahorro energético, inversión y el periodo de retorno de la inversión

Eficiencia

Se puede obtener de la siguiente relación:

$$n = \left(\frac{Q_{\text{sin aislamiento}} - Q_{\text{con aislamiento}}}{Q_{\text{sin aislamiento}}} \right) \times 100\% \quad (30)$$

Ahorro energético

$$\text{Ahorro energético} = Q_{sa} - Q_{ca} \quad (31)$$

Donde:

Q_{sa} : Pérdidas de calor sin aislamiento (W).

Q_{ca} : Pérdidas de calor con aislamiento (W).

Ahorro económico

$$\text{Ahorro económico} = \text{Ahorro energético} * Co \quad (32)$$

Donde:

Co : Costo del calor generado (USD/MMBTU).

Inversión

$$\text{Inversión} = A_{sup.} * Coa \quad (33)$$

Donde:

Coa : Costo del aislante térmico (USD/m²).

$A_{sup.}$: Área de la tubería (m²).

Periodo de retorno de la inversión (PRI)

$$PRI = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro económico}} \quad (34)$$

3.2.10. Aplicación ecuaciones para calcular el espesor optimo.

Para calcular el espesor optimo se tiene en cuenta el costo de pérdidas de calor y el costo del aislamiento térmico:

$$\text{Costo total} = \text{Costo por perdida calor} + \text{Costo del aislamiento térmico} \quad (37)$$

El costo por perdidas de calor:

$$C_{\text{pérdida de calor}} = \frac{q_{\text{perdida}} * t * C_{\text{energia}}}{\eta} \quad (35)$$

Donde:

q_{perdida} : Pérdidas de calor para un espesor dado (W/m).

t : Horas de operación anual (h/año).

η : Eficiencia de la caldera.

El costo del aislamiento térmico ($C_{\text{aislamiento}}$)

$$C_{\text{aislamiento}} = \frac{C_{me} * A}{V_u} \quad (36)$$

Donde:

C_{me} : Costo del material más instalación (USD/m²).

A : Área de la tubería a aislar (m²).

V_u : Vida útil del material aislante.

3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La información obtenida será debidamente procesada, a través de sistemas informáticos utilizando el Software Microsoft Word y Microsoft Excel donde se llevará a cabo el análisis de los parámetros que se debe establecer en el sistema de aislamiento térmico para minimizar las pérdidas de calor en las tuberías de vapor en la Planta Termochilca.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Consideraciones iniciales

Tabla 7: Consideraciones iniciales para el análisis

Propiedades y Características	Valores
Línea HP	
Fluido de trabajo	Vapor sobrecalentado
Temperatura del fluido	562°C
Presión P (bar)	123.2
Calor específico Cp (kJ/kg.K)	3.0
Densidad (kg/m ³)	32.39
Viscosidad dinámica (kg/m.s)	3.4×10^{-5}
Flujo másico $\dot{m}$ (kg/s)	79.5
Coefficiente de conducción térmica k (W/mK)	0.075
Línea IP	
Fluido de trabajo	Vapor sobrecalentado
Temperatura del fluido	550°C
Presión P (bar)	24
Calor específico Cp (kJ/kg.K)	2.48
Densidad (kg/m ³)	6.359
Viscosidad dinámica (kg/m.s)	3.2×10^{-6}
Flujo másico $\dot{m}$ (kg/s)	70
Coefficiente de conducción térmica k (W/mK)	0.057
Línea LP	
Fluido de trabajo	Vapor sobrecalentado
Temperatura del fluido	272.7°C
Presión P (bar)	4.4
Calor específico Cp (kJ/kg.K)	2.06
Densidad (kg/m ³)	1.748
Viscosidad dinámica (kg/m.s)	2×10^{-5}
Flujo másico $\dot{m}$ (kg/s)	14.70
Coefficiente de conducción térmica k (W/mK)	0.04
Tubería conducción	
Tipo	Acero al carbono

Coeficiente de conducción térmica k (W/mK)	45
Emisividad ϵ (sin recubrimiento, pulido)	0.3
Aislante térmico – silicato calcio	
Tipo	Silicato de calcio marca Rockfibras
Coeficiente de conducción térmica k (W/mK)	0.078
Emisividad ϵ (aluminio liso mate grisáceo)	0.2
Coeficiente de radiación del revestimiento metálico de aislamiento (W/ m ² K ⁴)	1.134×10^{-8}
Aislante térmico – lana mineral	
Tipo	Lana mineral roca marca Rockfibras
Coeficiente de conducción térmica k (W/mK)	0.065
Emisividad ϵ (aluminio liso)	0.2
Coeficiente de radiación del revestimiento metálico (aluminio liso mate grisáceo) de aislamiento (W/ m ² K ⁴)	1.134×10^{-8}
Condiciones climatológicas del lugar	
Zona	Chilca - Cañete
Velocidad del aire m/s (promedio)	5
Temperatura ambiente °C (promedio)	25

Fuente: Elaboración Propia.

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

Se debe considerar la figura 8 para determinar la cantidad de calor que se pierde por transferencia de calor de la tubería expuesta hacia la parte externa del ambiente, considerando los coeficientes de transferencia de calor por convección y conducción.

Para determinar R_1 convectivo tenemos que caracterizar al fluido si es laminar o turbulento, lo que se debe evaluar el Re , sin embargo, la velocidad del fluido se obtiene a partir de la ecuación 9.

Donde, tenemos que el área de la sección transversal, considerando para la tubería 18", el Dexterno es 457.2 mm (0.4572 m) y Dinterno es 428.7 mm (0.4287 m) y convirtiendo las unidades de densidad y flujo del cuadro, se tiene:

$$V_{FLUJO} = \frac{79.7 \frac{kg}{s} \times 0.030887 m^3/kg}{0.1443 m^2}$$

$$V_{FLUJO} = 17.060 \frac{m}{s}$$

Por lo que el número de Re, se obtiene de la ecuación 10, reemplazando:

$$Re = \frac{32.37 \frac{kg}{m^3} \times 17.060 \frac{m}{s} \times 0.4287 m}{3.4 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 6964124.98$$

Por lo que el flujo es turbulento (el flujo turbulento ocurre cuando $Re > 4000$) teniendo en cuenta esto, el número de Nusselt completamente desarrollado para tuberías circulares y considerando temperatura superficial constante.

Para poder calcular el Nusselt, se calculará primero el Prandtl, según los datos de la Tabla N°7 en los 3 sistemas HP, IP e LP.

$$P_r = \frac{3.4 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s} \times 3000 \frac{J}{kg \cdot K}}{0.075 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$P_r = 1.360 (HP)$$

$$P_r = 1.392 (IP)$$

$$P_r = 1.030 (LP)$$

Luego se calculará el factor de fricción mediante la ecuación 16. Se considera tuberías rugosas (ásperas) dado que las tuberías industriales no son hidráulicamente lisas, por lo que la rugosidad absoluta de la

tubería (acero al carbono) en estudio es de 0.0465mm, entonces el factor de fricción para la tubería de 18" será:

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\frac{6.9}{6964124.98} + \left(\frac{0.045/428.7}{3.7} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2}$$

$$f = \{-1.8 \log[9.9079 \times 10^{-7} + 8.9675 \times 10^{-6}]\}^{-2}$$

$$f = 0.01233$$

Con el valor del factor de fricción, ya se puede calcular el Nusselt:

$$N_u = \frac{(0.01233/8)(6964124.98 - 1000)(1.36)}{1 + 12.7 (0.01233/8)^{0.5} (1.36^{2/3} - 1)}$$

$$N_u = 13115.2353$$

Con el valor del Nusselt se calculará el Coeficiente convectivo (h):

$$h_1 = \frac{13115.2353 \ k_f}{D_i}$$

$$h_1 = \frac{13115.2353 \times 0.075 \frac{W}{m \ K}}{0.4287 \ m}$$

$$h_1 = 2294.4778 \frac{W}{m^2 K}$$

Siendo la resistencia convectiva 1:

$$R_1 = \frac{1}{\pi \times 0.4287 \ m \times 2294.4778 \frac{W}{m^2 \ ^\circ C}}$$

$$R_1 = 3.236 \times 10^{-4} \frac{m^2 \ ^\circ C}{W}$$

Para determinar el R conductivo 2, en función de la longitud y la conductividad térmica de la tubería acero al carbono de 45 W/mK se tiene:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k}$$

$$R_2 = \frac{\ln \left(\frac{0.4572}{0.4287} \right)}{2\pi \times 45 \frac{W}{mK}}$$

$$R_2 = 0.000228 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Para determinar el h2 convectivo total externo, se considera el h2 por radiación y el h2 por convección.

Para el h por radiación, se tiene que $Cr = \epsilon\sigma = 0.3 \times 5.67 \times 10^{-8} = 1.70 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$, para este tipo de material de acero al carbono según cedula 40, se considera una temperatura superficial sin aislamiento de 514 °C (787.15 K), y una temperatura ambiente de 25°C (298.15 K) por lo que:

$$h_r = \left(\frac{787.15^4 - 298.15^4}{787.15 - 298.15} \right) \times 2.84 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K}$$

$$h_r = 13.0796 \frac{W}{m^2K}$$

Para determinar el h2 convectivo se considera las propiedades del aire a la temperatura de película de 269.5 °C (542.65 K), tenemos:

$$v_{aire} = 4.35386 \times 10^{-5} m^2/s$$

$$V_{aire} = 5 \frac{m}{s}$$

$$D_{ext} = 0.4572 m$$

Determinando en primer lugar el Re; siendo:

$$Re = \frac{5 \frac{m}{s} \times 0.4572 m}{4.35386 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re = 52505.1334$$

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

Para un Re entre 40000 y 400000 las constantes de correlación de Zhukauskas son:

$$C = 0.0266 \text{ y } m = 0.805$$

$$Pr = 0.6942$$

Reemplazando los valores, se tiene que:

$$N_{u,cil} = 0.0266 \times (52505.1334)^{0.805} \times 0.6942^{\frac{1}{3}}$$

$$N_{u,cil} = \frac{h D}{k_f} = 148.525$$

$$h_{cov} = \frac{0.0422 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}}{0.4572 m} \times 148.525$$

$$h_{cov} = 13.73 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Por lo que, el h total es:

$$h_{total} = 13.0796 + 13.730$$

$$h_{total} = 26.8095 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Siendo la resistencia convectiva 3:

$$R_3 = \frac{1}{\pi \times 0.4572 \text{ m} \times 26.8095 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}}$$

$$R_3 = 0.0260 \frac{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{W}$$

De acuerdo con la figura 24, la resistencia térmica total del sistema es:

$$R_{TOTAL} = 3.236 \times 10^{-4} + 0.000228 + 0.0260$$

$$R_{TOTAL} = 0.0265 \frac{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{W}$$

Considerando que la temperatura interior de 562 °C y una temperatura ambiente de 25 °C, reemplazando se tiene:

$$q_i = \frac{562 - 25}{0.0265} W/m$$

$$q_i = 20248.718 W/m$$

De acuerdo con la cantidad total de tubería para el transporte de este fluido por una tubería 18" Ø y 30 metros, por lo tanto, el calor total perdido, es de:

$$Q_{sin \text{ aislamiento}} = 20248.718 W/m \times 30 m$$

$$Q_{sin \text{ aislamiento}} = 607461.532 W$$

$$Q_{sin \text{ aislamiento}} = 0.6074 MW$$

La pérdida de calor obtenida es para una tubería de 18"Ø sin aislamiento térmico, para las demás tuberías en estudio se realizaron los mismos cálculos, los valores obtenidos se presentan en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8: Pérdida de calor sin aislamiento en tuberías

Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)	Tinterior (°C)	R total (m°C/W)	q (W/m)	Q sin aislamiento (W)
18	30	562	0.0265	20248.718	607461.532
14	35	562	0.0330	16262.234	569178.181
12	25	562	0.0358	14980.653	374516.324
10	30	562	0.0417	12887.501	386625.035
8	35	550	0.0511	10276.544	359679.053
6	25	550	0.0646	8131.767	203294.185
4	40	272.7	0.1073	2309.314	92372.551
3	35	272.7	0.1324	1870.747	65476.157
2	50	272.7	0.1833	1351.694	67584.688
1 1/2	45	272.7	0.2207	1122.120	50495.416

Fuente: Elaboración propia

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

Para realizar el cálculo de las pérdidas de calor en una tubería con aislamiento térmico, se considera la Figura 9.

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

$$R_i = 0.0003236 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

$$R_1 = 0.000228 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Para determinar R_2 conductivo considerando el aislamiento (silicato calcio y lana mineral) y de acuerdo con la figura 9, en función de la longitud y el tipo de aislante:

$$r_3 = \frac{0.4572 \text{ m}}{2} + 0.152 = 0.3806 \text{ m}$$

Para la tubería de 18" Ø se considera el aislamiento térmico con Silicato de calcio, con Conductividad térmica de $k_2 = 0.078$ (W/mK) y radio $r_2 = 0.2286$ m:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{0.3806}{0.2286}}{2\pi \times 0.078}$$

$$R_2 = 1.0402 \frac{m^2C}{W}$$

Para determinar el h convectivo total externo, se considera el h por radiación y el h por convección.

Para calcular el h por radiación se considera $Cr = \epsilon\sigma = 0.2 \times 5.67 \times 10^{-8} = 1.134 \times 10^{-8}$ W/(m² K⁴) para un revestimiento con plancha de aluminio liso (superficie mate gris), se considera una temperatura superficial con aislamiento de 38.01 °C (311.16 K), y una temperatura ambiente de 25°C (298.15 K) por lo que:

$$h_{rad.} = \left(\frac{311.16^4 - 298.15^4}{311.16 - 298.15} \right) \times 1.134 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K}$$

$$h_{rad.} = 1.2832 \frac{W}{m^2K}$$

Para determinar el h_2 convectivo se considera las propiedades del aire a la temperatura de película de 31.51 °C (304.66 K), tenemos:

$$v_{aire} = 1.6221 \times 10^{-5} m^2/s$$

$$V_{aire} = 5 \frac{m}{s}$$

$$D_{ext} = 0.7612 \text{ m}$$

Determinando en primer lugar el Re ; siendo:

$$Re = \frac{5 \frac{m}{s} \times 0.7612 \text{ m}}{1.6221 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re = 234627.32$$

Por lo que el flujo de aire sobre la tubería se considera turbulento.

Para determinar el número de Nusselt, se considera las siguientes constantes de correlación de Zhukauskas:

$$C = 0.0266 \text{ y } m = 0.805$$

$$Pr = 0.7278$$

Reemplazando los valores, se tiene que:

$$N_{u,cil} = 0.0266 \times (234627.32)^{0.805} (0.7278)^{\frac{1}{3}}$$

$$N_{u,cil} = \frac{h D}{k_f} = 503.5425$$

Entonces $h_{cov.}$

$$h_{cov.} = \frac{k_a}{D} \times 503.5425$$

$$h_{conv.} = \frac{0.02599 \frac{W}{m^2 C}}{0.7612 m} \times 503.5425$$

$$h_{conv.} = 17.1936 \frac{W}{m^2 C}$$

Por lo que, el h convectivo total es:

$$h_{total} = 1.2832 + 17.1936$$

$$h_{total} = 18.4768 \frac{W}{m^2 C}$$

Siendo la resistencia convectiva R_0 :

$$R_0 = \frac{1}{\pi \times 0.7612 m \times 18.4768 \frac{W}{m^2 C}}$$

$$R_0 = 0.0226 \frac{m^2 C}{W}$$

De acuerdo con la figura 9, la resistencia térmica total del sistema para cada tipo de aislante es:

$$R_{TOTAL} = 0.0003236 + 0.000228 + 1.0402 + 0.0226$$

$$R_{TOTAL} = 1.0634 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

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

$$q_{la} = \frac{562 - 25}{1.0634}$$

$$q_{la} = 505.006 \text{ W/m}$$

Este dato representa la perdida 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. Entonces, la cantidad total de tubería 18"Ø para el transporte de este fluido es de 30 metros, por lo cual el calor total perdido para el aislante de silicato calcio es de:

$$Q_{con \text{ aislamiento}} = 505.006 \times 30$$

$$Q_{con \text{ aislamiento}} = 15150.188 \text{ W}$$

La pérdida de calor obtenida es para una tubería de 18" Ø y 6" espesor de aislamiento térmico con silicato de calcio, para las demás tuberías en estudio se realizaron los mismos cálculos, los valores obtenidos se presentan en la siguiente Tabla N°9.

Tabla 9: Perdida de calor en las tuberías de estudio

Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)	T interior (°C)	R total (m°C/W)	q (W/m)	Q con aislamiento (W)
18	30	562	1.0634	505.006	15150.188
14	35	562	0.9551	562.260	19679.111
12	25	562	1.0280	522.369	13059.218
10	30	562	1.1723	458.090	13742.698
8	35	550	1.3800	380.439	13315.382
6	25	550	1.2107	433.627	10840.678
4	40	272.7	1.6225	152.662	6106.490
3	35	272.7	1.9374	127.849	4474.728
2	50	272.7	2.5002	99.072	4953.586
1 1/2	45	272.7	2.8602	86.603	3897.154

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Cálculo de la eficiencia con aislamiento térmico

Se calcular la eficiencia mediante la ecuación (26).

Reemplazando:

$$n_{18''\varnothing} = \left(\frac{607461.532 - 15150.188}{607461.532} \right) \times 100\%$$

$$n_a = 97.51 \%$$

De acuerdo con el resultado, la eficiencia de la tubería de 18'' Ø aislado con silicato de calcio, tiene un 97.51 %, esto significa que el material y espesor seleccionado para el aislamiento térmico es el adecuado. Asimismo, solo se pierde el 2.49 % del calor teórico disponible en el vapor a lo largo de la sección de la tubería. Se realizaron los mismos cálculos para poder determinar la eficiencia de las demás tuberías en estudio.

Tabla 10: Eficiencia energética en diferentes diámetros de tuberías con aislamiento térmico

Diámetro (Pulg.)	Q sin aislamiento (W)	Q con aislamiento (W)	η (%)
18	607461.532	15150.188	97.51
14	569178.181	19679.111	96.54
12	374516.3237	13059.218	96.51
10	386625.0352	13742.698	96.45
8	359679.0527	13315.382	96.30
6	203294.185	10840.678	94.67
4	92372.55147	6106.490	93.39
3	65476.15744	4474.728	93.17
2	67584.68849	4953.586	92.67
1 1/2	50495.4159	3897.154	92.28

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Cálculo energético, económico y costo de la inversión para el análisis del sistema con y sin aislamiento

La pérdida total de energía en el transporte de vapor en la tubería 18” sin aislamiento es de 607461.532 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 607461.532 \frac{J}{s}$$

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 2186.8615 \frac{MJ}{h}$$

Por lo que la cantidad total de energía perdida al año considerando que la planta opera a 8000 h/año tenemos:

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 2186.8615 \frac{MJ}{h} \times \frac{8000 h}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{sin aislamiento}} = 17494892.12 \frac{MJ}{\text{año}}$$

La pérdida total de energía en el transporte de vapor considerando la tubería aislada con silicato de calcio es de 15150.188 W, lo cual equivale a decir:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 54.5406 \frac{MJ}{h}$$

Siendo la pérdida total al año considerando que la planta opera a 8000 h/año tenemos:

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 54.5406 \frac{MJ}{h} \times \frac{8000 h}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{con aislamiento}} = 436325.42 \frac{MJ}{\text{año}}$$

Entonces el ahorro energético anual es:

$$\text{Ahorro Energético} = 17494892.12 - 436325.42$$

$$\text{Ahorro Energético} = 17058566.70 \frac{MJ}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro Energético} = 17058566.70 \frac{MJ}{\text{año}} \times 947.8171 \frac{BTU}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro Energético} = 16168401220.19 \frac{BTU}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro Energético} = 16168.40 \frac{MMBTU}{\text{año}}$$

Según los datos obtenidos sobre los costos de operación de la empresa, se tiene que el costo de Silicato de calcio de marca ROCKFIBRAS de 150 mm de espesor es de USD 180/ m² (incluido materiales y mano de obra) y el costo del calor generado es de 18.325 USD/MMBTU. Teniendo en cuenta los datos anteriores, el ahorro económico del sistema de aislamiento sería de:

$$\text{Ahorro Económico} = 16168.40 \frac{MMBTU}{\text{año}} \times 18.325 \frac{USD}{MMBTU}$$

$$\text{Ahorro Económico} = 296285.95 \frac{USD}{\text{año}}$$

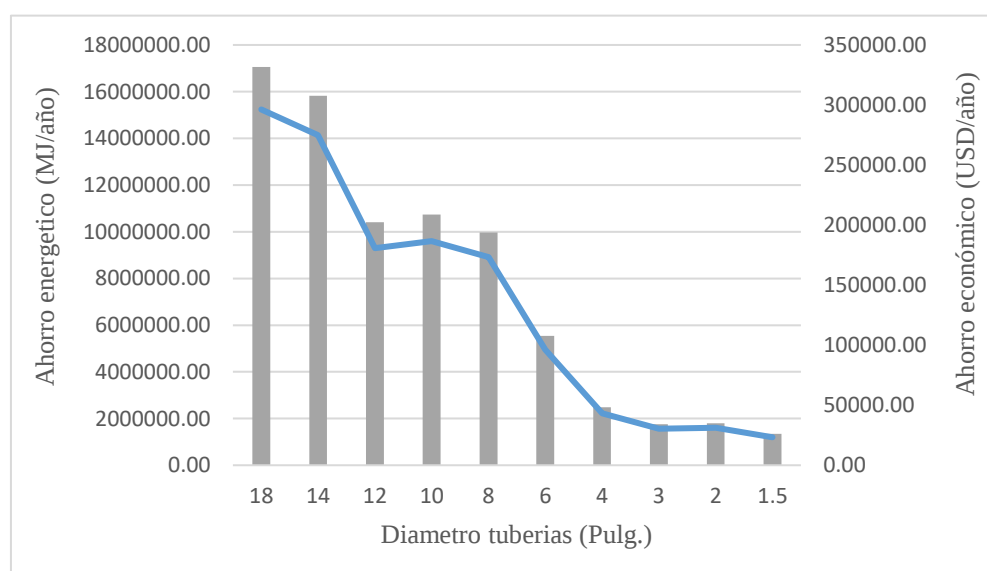
El ahorro energético y económico calculado es solamente para la tubería de 18" Ø, para las demás tuberías en estudio se realizó el mismo calculo, y considerando el costo del calor generado (18.325 USD/MMBTU), tal como se muestra en la siguiente Tabla 11.

Tabla 11: Ahorro energético y económico para las tuberías en estudio

Diámetro (Pulg.)	Q sin aislamiento (MJ/año)	Q con aislamiento (MJ/año)	Ahorro energético (MJ/año)	Ahorro económico (USD/año)
18	17494892.12	436325.42	17058566.70	296285.95
14	16392331.61	566758.41	15825573.20	274870.40
12	10786070.12	376105.48	10409964.64	180808.06
10	11134801.01	395789.69	10739011.32	186523.19
8	10358756.72	383483.01	9975273.71	173258.02
6	5854872.53	312211.51	5542661.01	96269.08
4	2660329.48	175866.91	2484462.57	43152.01
3	1885713.33	128872.16	1756841.18	30514.13
2	1946439.03	142663.29	1803775.74	31329.33
1 1/2	1454267.98	112238.05	1342029.93	23309.38
TOTAL	79968473.93	3030313.92	76938160.01	1336319.54

Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Diámetro de tuberías en función al ahorro energético y económico



Fuente: Elaboración propia

La figura 10 muestra que el ahorro energético y económico disminuye a medida que se reduce el diámetro de las tuberías en estudio, obteniendo mayores beneficios en las tuberías de mayor diámetro. Además, en los diámetros menores, la aplicación de aislamiento térmico continúa siendo energéticamente efectiva y económicamente rentable, evidenciando la conveniencia del aislamiento en todo el sistema analizado.

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

$$Inversión\ total = \pi(0.7612\ m)(30\ m) * 180\ \frac{USD}{m^2}$$

$$Inversión\ total = 12913.45\ USD$$

La inversión calculada sería solo para la tubería de 18" Ø, para las demás tuberías en estudio se realizó el mismo cálculo, y considerando los precios del mercado, tal como se muestra en la siguiente Tabla 12.

Tabla 12: Inversión del aislamiento térmico de las tuberías en estudio

Diámetro (Pulg.)	Tipo Aislante	Área (m ²)	Precio (USD/m ²)	Inversión USD
18	Silicato Calcio	71.741	180	12913.45
14	Silicato Calcio	61.531	135	8306.72
12	Silicato Calcio	41.461	120	4975.34
10	Silicato Calcio	44.966	115	5171.05
8	Silicato Calcio	46.522	100	4652.23
6	Lana Mineral	21.198	70	1483.85
4	Lana Mineral	27.131	60	1627.85
3	Lana Mineral	20.947	55	1152.06
2	Lana Mineral	25.431	45	1144.40
1 1/2	Lana Mineral	21.192	40	847.66
TOTAL INVERSIÓN				42,274.61

Fuente: Elaboración propia

El periodo de Retorno de la inversión (PRI) se calcula mediante la ecuación 36:

$$PRI = \frac{12913.45 \text{ USD}}{296285.95 \frac{\text{USD}}{\text{año}}} * \frac{365 \text{ dias}}{\text{año}}$$

$$PRI = 15.9 \text{ dias} = 16 \text{ dias}$$

El periodo de retorno de la inversión para la tubería de 18" Ø es de 16 días aproximadamente. Para las demás tuberías en estudio se aplicaron los mismos cálculos, lo cual se muestra en la siguiente Tabla 13.

Tabla 13: Periodo de retorno de la inversión

Diámetro (Pulg.)	Tipo Aislante	Ahorro económico (USD/año)	Inversión (USD)	Periodo Retorno (Días)
18	Silicato Calcio	296285.95	12913.45	16
14	Silicato Calcio	274870.40	8306.72	11
12	Silicato Calcio	180808.06	4975.34	10
10	Silicato Calcio	186523.19	5171.05	10
8	Silicato Calcio	173258.02	4652.23	10
6	Lana Mineral	96269.08	1483.85	6
4	Lana Mineral	43152.01	1627.85	14
3	Lana Mineral	30514.13	1152.06	14
2	Lana Mineral	31329.33	1144.40	13
1 1/2	Lana Mineral	23309.38	847.66	13
TOTAL				117

Fuente: Elaboración propia

El periodo de retorno de la inversión se estaría realizando en 117 días (aproximadamente 4 meses) se estaría recuperando toda la inversión realizada por la instalación del aislamiento térmico a las tuberías.

4.1.6. Cálculo del espesor óptimo económico del aislante seleccionado

Para determinar el espesor óptimo es necesario repetir los cálculos de transferencia de calor para el aislante térmico (silicato calcio y lana mineral) con diferentes espesores.

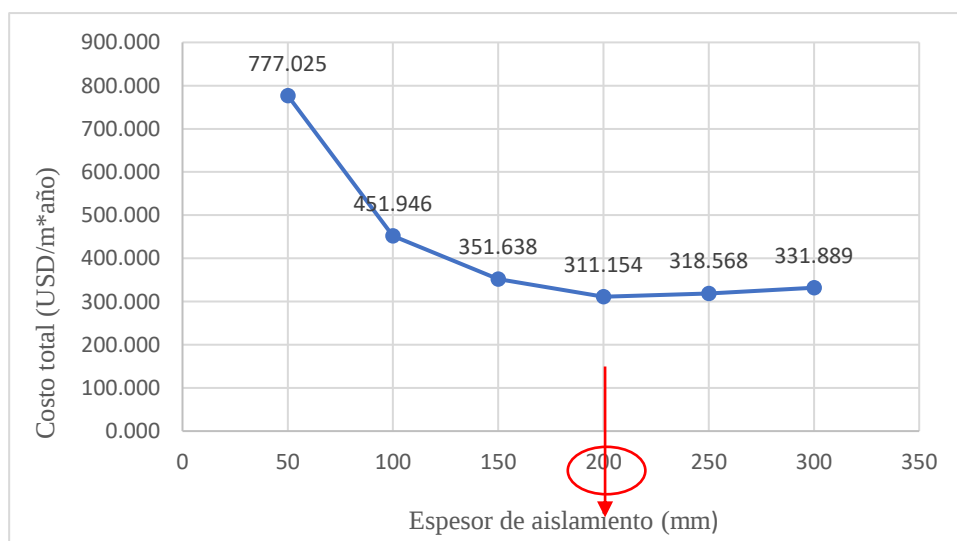
Las siguientes Tablas resume los resultados de este análisis para las diferentes líneas en estudio, donde se comparan los costos de pérdida de calor con los costos del aislante de acuerdo con datos de la empresa.

Tabla 14: Cálculo del espesor óptimo para tubería 18" Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Pérdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
50	75	1222.806	93.961	764.59	12.435	777.025
100	120	689.574	96.59	431.17	20.772	451.946
150	180	505.006	97.51	315.77	35.871	351.638
200	250	407.230	97.99	254.63	56.522	311.154
250	400	347.835	98.28	217.49	101.076	318.568
300	500	307.457	98.48	192.25	139.644	331.889

Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 18" Ø



Fuente: Elaboración propia

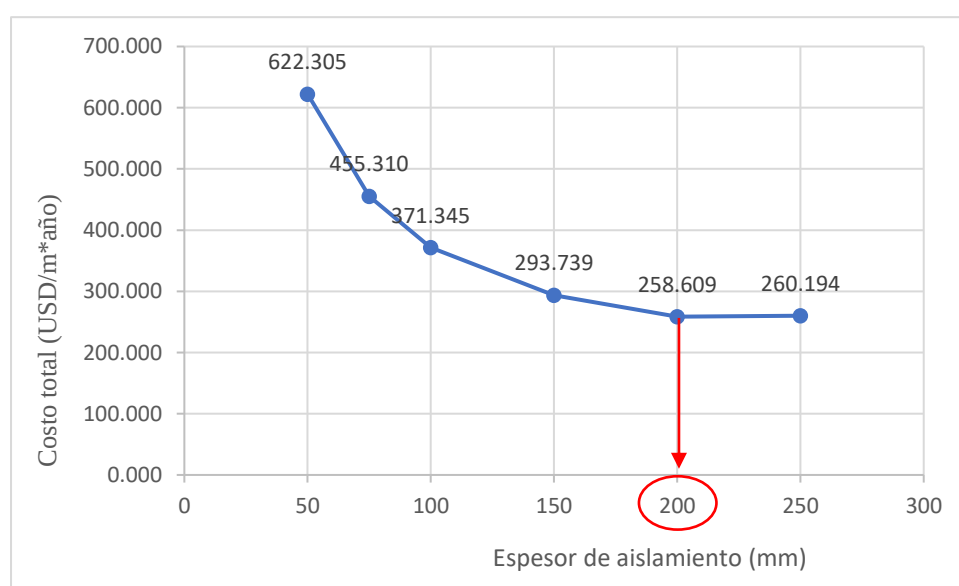
En la figura 11 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 50 mm hasta 300 mm, alcanzando un valor mínimo de 311.154 USD/m*año para un espesor de 200 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 15: Cálculo del espesor óptimo para tubería 14" Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
50	80	979.936	93.974	612.73	9.576	622.305
75	102	706.480	95.656	441.74	13.565	455.310
100	135	562.260	96.543	351.57	19.778	371.345
150	190	417.303	97.434	260.93	32.810	293.739
200	230	340.212	97.908	212.73	45.883	258.609
250	340	293.188	98.197	183.32	76.871	260.194

Fuente: Elaboración propia

Figura 12: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 14" Ø



Fuente: Elaboración propia

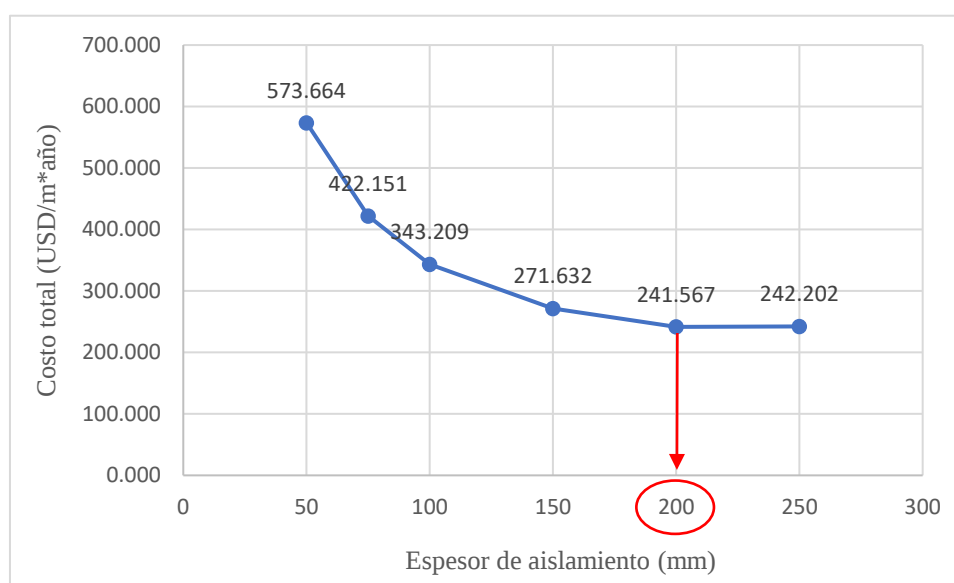
En la figura 12 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 50 mm hasta 250 mm, alcanzando un valor mínimo de 258.609 USD/m*año para un espesor de 200 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 16: Cálculo del espesor óptimo para tubería 12" Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
50	75	904.097	93.965	565.31	8.355	573.664
75	102	654.205	95.633	409.06	13.093	422.151
100	120	522.369	96.513	326.62	16.584	343.209
150	170	389.728	97.398	243.69	27.945	271.632
200	220	319.068	97.870	199.51	42.062	241.567
250	320	275.892	98.158	172.51	69.693	242.202

Fuente: Elaboración propia

Figura 13: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 12" Ø



Fuente: Elaboración propia

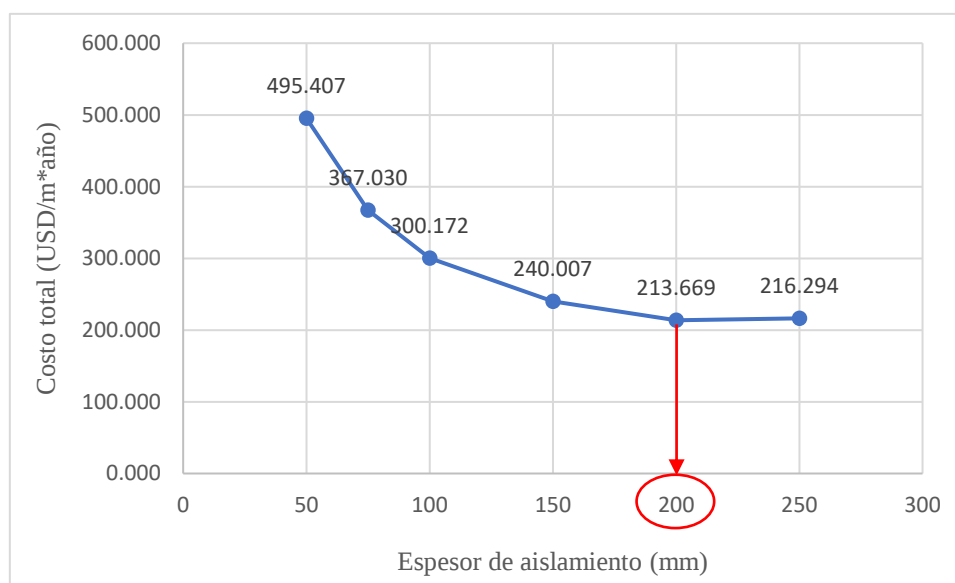
En la figura 13 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 50 mm hasta 250 mm, alcanzando un valor mínimo de 241.567 USD/m*año para un espesor de 200 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 17: Cálculo del espesor óptimo para tubería 10" Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de perdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
50	65	782.105	93.931	489.03	6.376	495.407
75	95	570.066	95.577	356.45	10.583	367.030
100	110	458.090	96.445	286.43	13.739	300.172
150	160	345.182	97.322	215.83	24.174	240.007
200	200	284.820	97.790	178.09	35.579	213.669
250	300	247.805	98.080	154.95	61.347	216.294

Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 10" Ø



Fuente: Elaboración propia

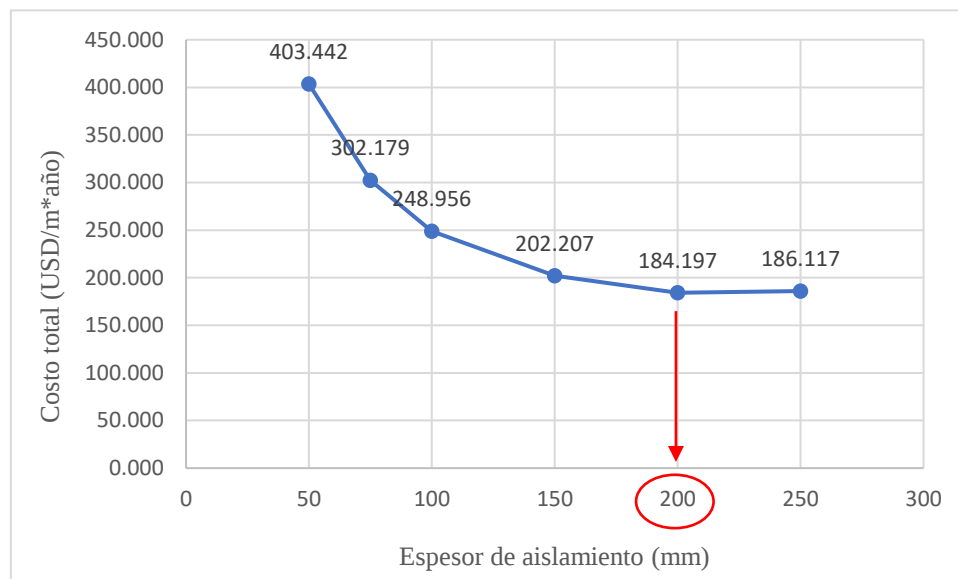
En la figura 14 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 50 mm hasta 250 mm, alcanzando un valor mínimo de 213.669 USD/m*año para un espesor de 200 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 18: Cálculo del espesor óptimo para tubería 8" Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
50	60	637.167	93.800	398.40	5.038	403.442
75	90	469.275	95.430	293.43	8.753	302.179
100	100	380.439	96.300	237.88	11.077	248.956
150	150	290.535	97.170	181.66	20.542	202.207
200	200	242.207	97.640	151.45	32.751	184.197
250	280	212.415	97.930	132.82	53.299	186.117

Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 8" Ø



Fuente: Elaboración propia

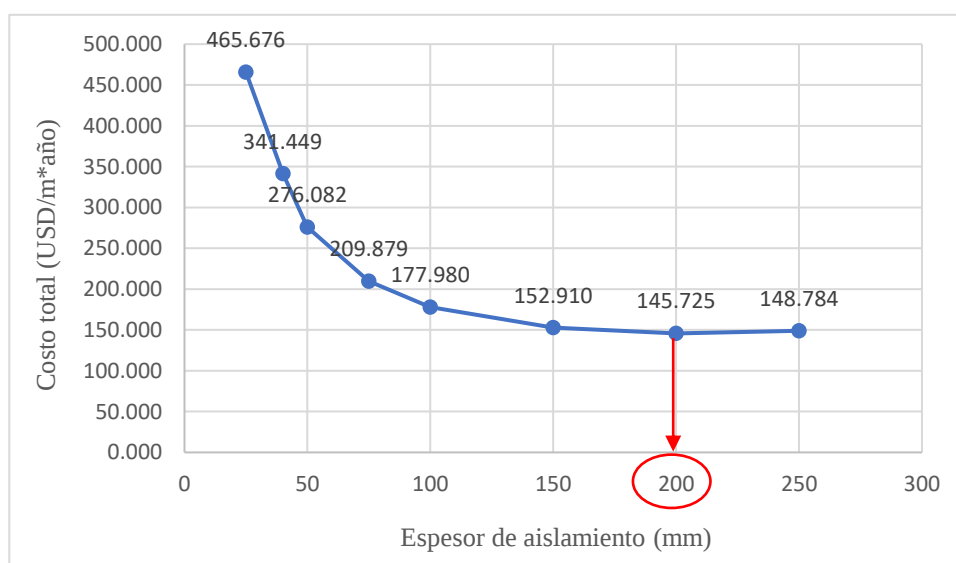
En la figura 15 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 50 mm hasta 250 mm, alcanzando un valor mínimo de 184.197 USD/m*año para un espesor de 200 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 19: Cálculo del espesor óptimo para tubería 6" Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
25	60	739.249	90.910	462.23	3.442	465.676
40	65	539.424	93.370	337.29	4.161	341.449
50	70	433.627	94.670	271.14	4.946	276.082
75	95	322.903	96.030	201.90	7.976	209.879
100	130	264.378	96.750	165.31	12.671	177.980
150	200	204.999	97.480	128.18	24.730	152.910
200	250	172.902	97.87	108.111	37.614	145.725
250	300	153.0003	98.12	95.667	53.116	148.784

Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 6" Ø



Fuente: Elaboración propia

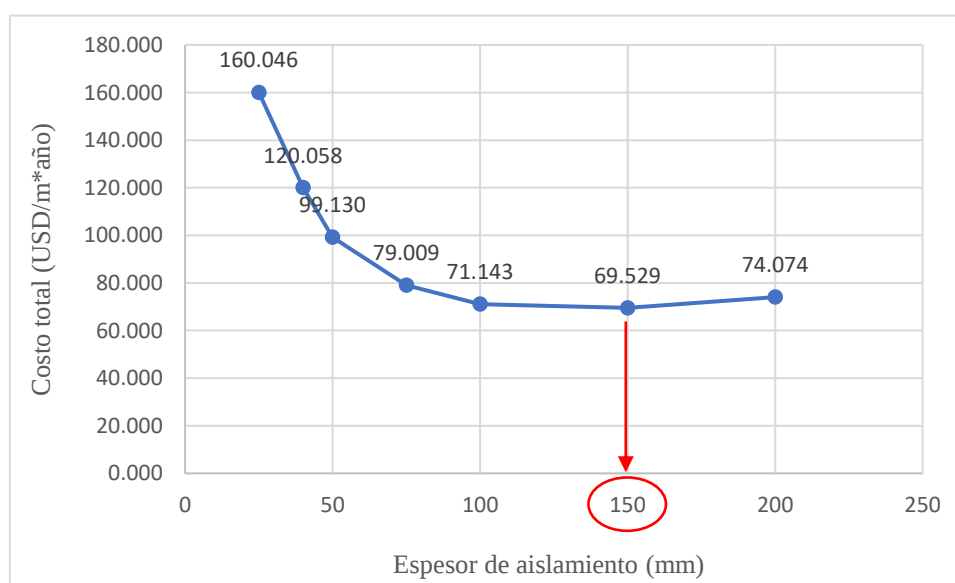
En la figura 16 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 25 mm hasta 250 mm, alcanzando un valor mínimo de 145.725 USD/m*año para un espesor de 200 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 20: Cálculo del espesor óptimo para tubería 4"Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
25	52	252.366	89.070	157.80	2.248	160.046
40	60	187.222	91.890	117.07	2.992	120.058
50	65	152.662	93.390	95.46	3.674	99.130
75	90	116.308	94.960	72.72	6.284	79.009
100	125	97.161	95.793	60.75	10.390	71.143
150	195	77.046	96.664	48.17	21.355	69.529
200	240	66.1420652	97.14	41.357	32.717	74.074

Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 4" Ø



Fuente: Elaboración propia

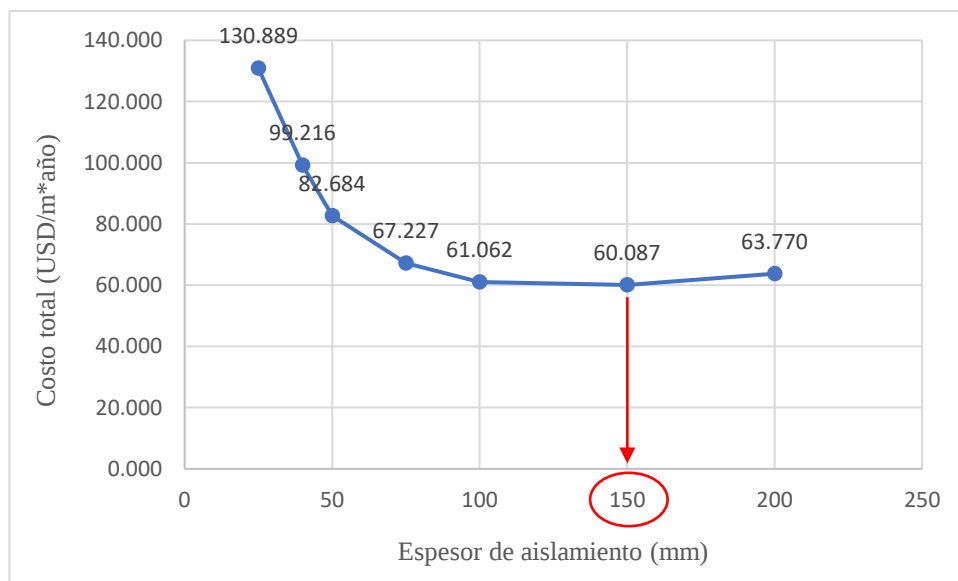
En la figura 17 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 25 mm hasta 200 mm, alcanzando un valor mínimo de 69.529 USD/m*año para un espesor de 150 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 21: Cálculo del espesor óptimo para tubería 3"Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
25	45	206.699	88.950	129.24	1.646	130.889
40	50	155.220	91.700	97.05	2.161	99.216
50	55	127.849	93.166	79.94	2.743	82.684
75	85	98.928	94.710	61.86	5.370	67.227
100	115	83.591	95.530	52.27	8.794	61.062
150	175	67.249	96.410	42.05	18.037	60.087
200	210	58.43701	96.88	36.539	27.231	63.770

Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 3" Ø



Fuente: Elaboración propia

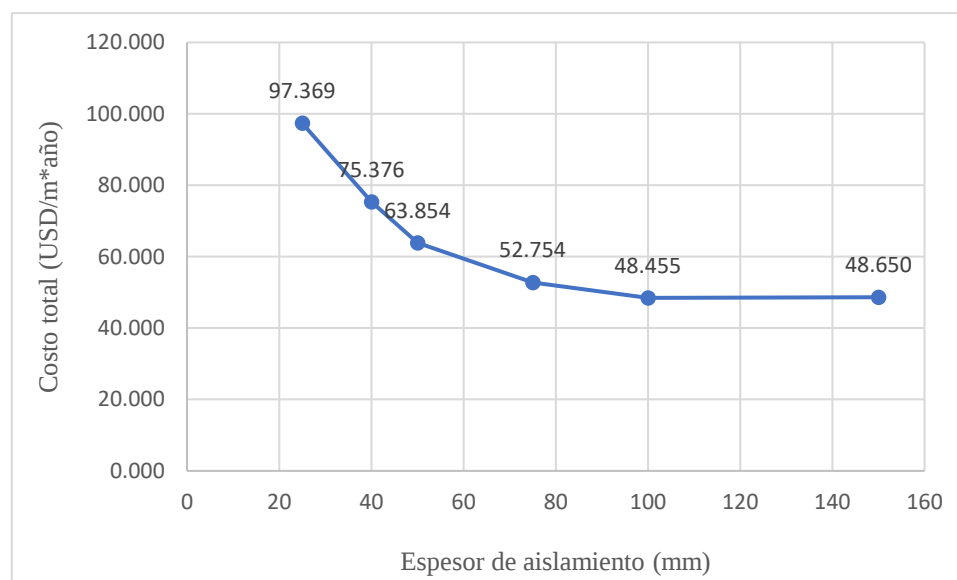
En la figura 18 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 25 mm hasta 200 mm, alcanzando un valor mínimo de 60.087 USD/m*año para un espesor de 150 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 22: Cálculo del espesor óptimo para tubería 2"Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
25	35	154.094	88.600	96.35	1.018	97.369
40	40	118.262	91.251	73.95	1.429	75.376
50	45	99.072	92.670	61.95	1.907	63.854
75	65	78.580	94.190	49.13	3.620	52.754
100	90	67.564	95.000	42.25	6.209	48.455
150	145	55.639	95.880	34.79	13.860	48.650

Fuente: Elaboración propia

Figura 19: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 2" Ø



Fuente: Elaboración propia

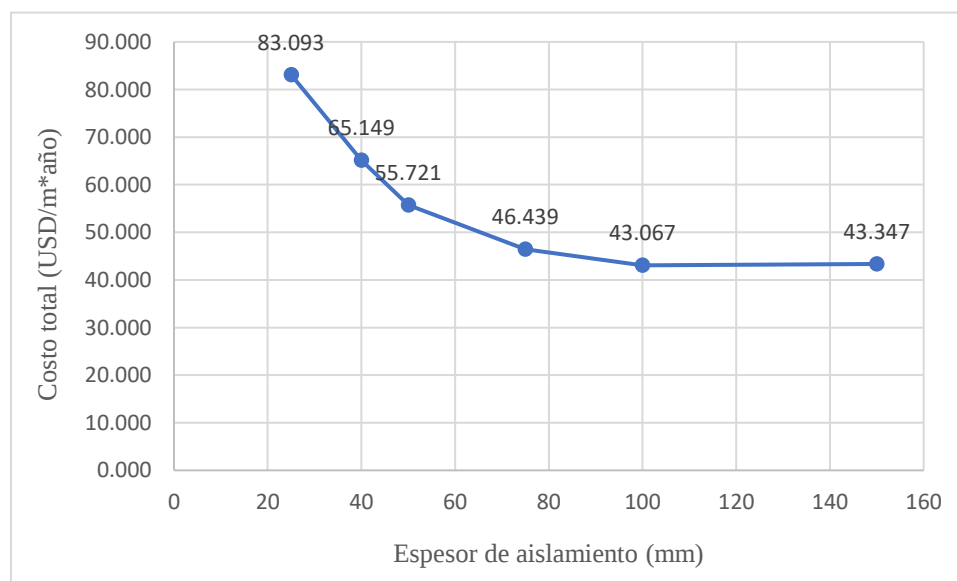
En la figura 19 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 25 mm hasta 150 mm, alcanzando un valor mínimo de 48.455 USD/m*año para un espesor de 100 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

Tabla 23: Cálculo del espesor óptimo para tubería 1 1/2"Ø

Espesor del aislante (mm)	Costo del aislante (USD/m ²)	Perdida de calor (W/m)	Eficiencia de aislamiento (%)	Costo de pérdida de calor (USD/m*año)	Costo del aislamiento térmico (USD/m*año)	Costo Total (USD/m*año)
25	30	131.646	88.270	82.31	0.778	83.093
40	35	102.368	90.880	64.01	1.141	65.149
50	40	86.603	92.280	54.15	1.570	55.721
75	55	69.648	93.790	43.55	2.890	46.439
100	80	60.452	94.610	37.80	5.267	43.067
150	128	50.402	95.510	31.51	11.832	43.347

Fuente: Elaboración propia

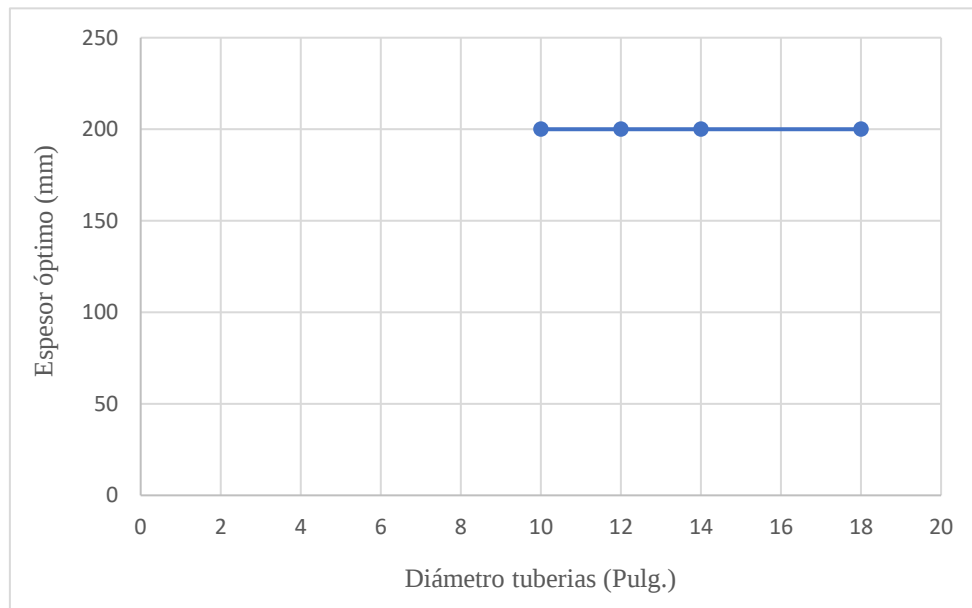
Figura 20: Costo total anual en función del espesor del aislamiento térmico para tubería de 1 1/2" Ø



Fuente: Elaboración propia

En la figura 20 se observa que el costo total disminuye significativamente al incrementar el espesor desde 25 mm hasta 150 mm, alcanzando un valor mínimo de 43.067 USD/m*año para un espesor de 100 mm. A partir de este punto, el costo total comienza a incrementarse, debido a que el aumento del costo del aislamiento supera el beneficio económico obtenido por la reducción adicional de las pérdidas de calor.

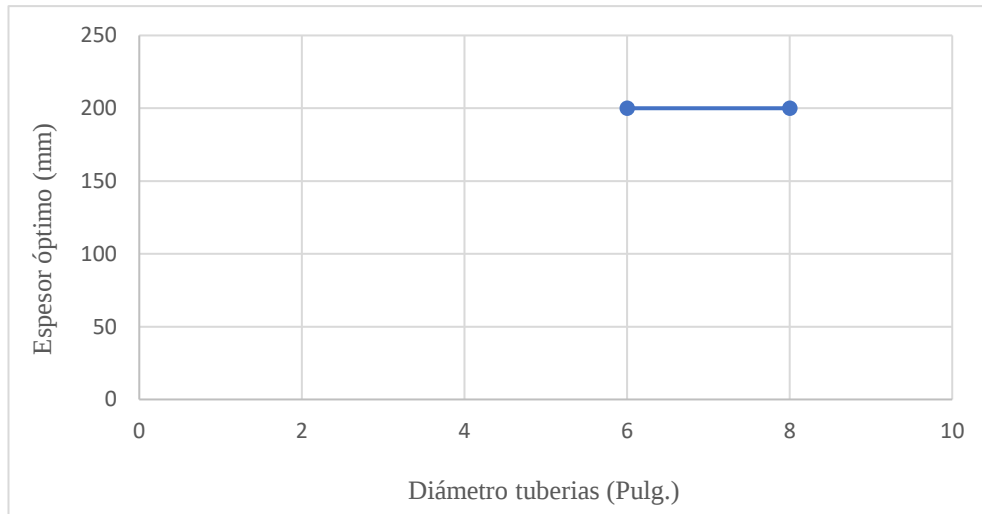
Figura 21: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para el sistema HP



Fuente: Elaboración propia

La figura 21 muestra que el espesor óptimo de aislamiento para el sistema de HP permanece constante en 200 mm para los diámetros de tuberías de 18", 14", 12" y 10". Este resultado permite estandarizar el criterio de diseño del aislamiento térmico para la línea de HP optimizando los costos de implementación y operación del sistema.

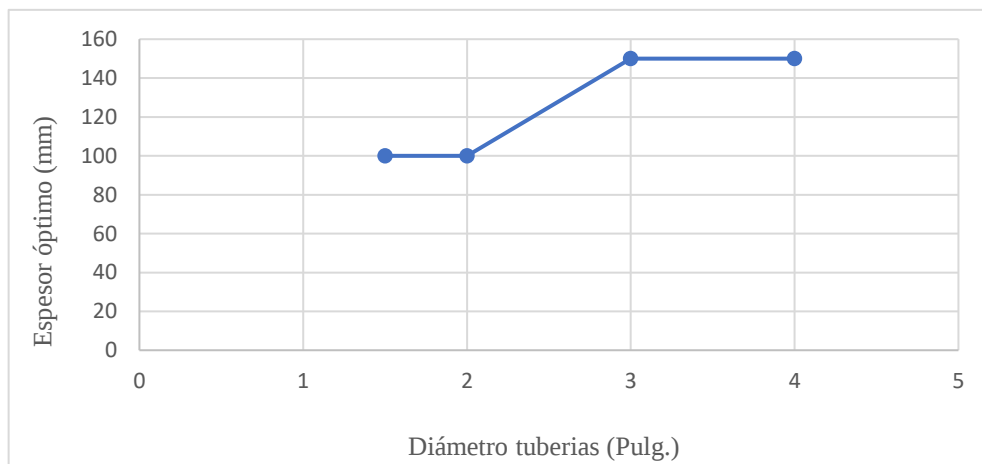
Figura 22: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para el sistema IP



Fuente: Elaboración propia

La figura 22 muestra que el espesor óptimo de aislamiento para el sistema de IP permanece constante en 200 mm para los diámetros de tuberías de 8" y 6".

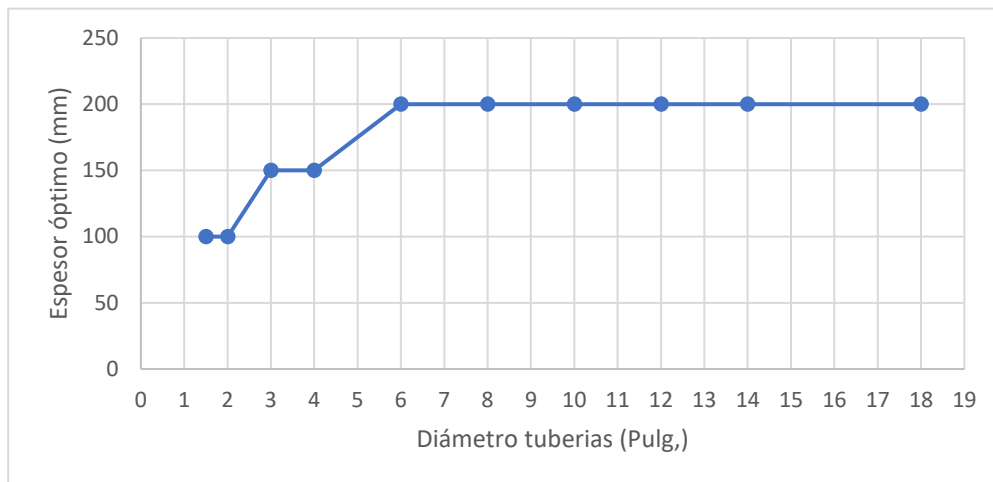
Figura 23: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para el sistema LP



Fuente: Elaboración propia

La figura 23 muestra que para las tuberías de 3" y 4" el espesor óptimo de aislamiento es de 150 mm y para las tuberías de 1 1/2" y 2" el espesor óptimo es de 100 mm, esto se debe a que en diámetros mayores las pérdidas de calor son significativas lo que justifica un mayor espesor de aislamiento, en comparación con una tubería de menor diámetro.

Figura 24: Diámetro tuberías en función del espesor óptimo para los sistemas de LP, IP y HP.



Fuente: Elaboración propia

La figura 24 muestra que el espesor óptimo de aislamiento térmico aumenta de forma escalonada con el diámetro de las tuberías en estudio. Para diámetros pequeños (1½" y 2") el espesor óptimo es de 100 mm, para diámetros intermedios (3" y 4") es de 150 mm, y para diámetros mayores o iguales a 6" se mantiene constante en 200 mm. Este comportamiento refleja que las tuberías de mayor diámetro presentan mayores pérdidas térmicas, lo que justifica el uso de un mayor espesor de aislamiento desde el punto de vista técnico económico.

4.2. DISCUSIÓN

En el presente estudio se evaluaron diez líneas de vapor de diámetros entre 1 ½" y 18" de la Planta Termochilca y se determinó que las pérdidas de calor total del sistema sin aislamiento fueron de 79,968,473.93 MJ/año mientras que con aislamiento se redujo a 3,030,313.92 MJ/año, lo que representa una reducción aproximada de 96 %. Los resultados obtenidos validan y superan ampliamente la hipótesis inicial del estudio donde se establecía que la instalación de aislamiento térmico permitirá reducir al menos el 15% de las pérdidas de calor durante el transporte del vapor.

Esto demuestra que la aplicación de aislamiento térmico no solo cumple con el nivel mínimo de reducción esperado, sino que también aporta un beneficio

energético mucho mayor del previsto, garantizando un ahorro energético acumulado de 72923.30 MMBTU/año y un ahorro económico anual estimado en 1336319.54 USD.

Al evaluar la eficiencia de cada una de las líneas de vapor se obtuvo que las tuberías de HP/IP alcanzan una eficiencia superior al 96%, asegurando que la máxima entalpía sea entregada a la turbina, lo cual es importante para la eficiencia del ciclo en comparación de las tuberías LP que solo alcanzan una eficiencia superior al 92% igual de importante.

La inversión de 42274.61 USD por la instalación del aislamiento térmico de las líneas de vapor se justifica como una medida estratégica de alta rentabilidad. El análisis económico demuestra que la inversión se recupera en un periodo corto de 117 días (aproximadamente 4 meses) confirmando que el costo del aislamiento es insignificante frente a los beneficios operacionales y el ahorro de combustible generado por la reducción de las pérdidas de calor a lo largo de la vida útil de la planta.

Además, mediante la evaluación técnico-económica aplicada al análisis del espesor óptimo, se determinó el dimensionamiento adecuado del aislamiento térmico para cada sistema. En el caso del sistema de Alta y Media Presión (HP/IP), el Silicato de Calcio requiere un espesor de 8 pulgadas para mitigar de manera efectiva las elevadas pérdidas térmicas, mientras que para las líneas de Baja Presión (LP), la Lana Mineral demanda un espesor entre 4 y 6 pulgadas. Estos valores superan los espesores especificados en los planos de planta, evidenciando que las configuraciones actuales no alcanzan el nivel de aislamiento necesario para minimizar las pérdidas de calor bajo las condiciones operativas evaluadas. Sin embargo, es importante precisar que el espesor óptimo calculado no siempre puede adoptarse directamente, debido a restricciones físicas y estructurales propias de la instalación. Un mayor espesor implica un incremento del diámetro exterior y del peso total del sistema, lo que puede exceder el espacio disponible y la capacidad de carga de los soportes existentes. Por este motivo, y considerando la viabilidad constructiva y operativa, el espesor indicado en los planos constituye una alternativa adecuada, ya que evita el sobredimensionamiento del aislamiento y asegura un

equilibrio entre desempeño térmico, factibilidad de instalación y costos. Por lo tanto, el análisis económico demuestra que la adopción del espesor especificado en los planos permite maximizar el retorno de la inversión, alcanzando un periodo de recuperación de solo 117 días de operación, lo que confirma la conveniencia técnica y financiera de la propuesta.

Finalmente, la instalación estratégica del aislamiento térmico en las líneas de vapor confirman ser una medida de eficiencia energética sobresaliente y económicamente indispensable. Este proyecto contribuye directamente a la eficiencia energética global de la Planta, garantizando que las líneas HP, IP y LP operen con una eficiencia superior al 94%.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se calculo las pérdidas de calor en las tuberías de vapor con y sin aislamiento. Los resultados mostraron que el sistema sin aislamiento registra pérdidas totales de 79,968,473.93 MJ/año, mientras que dichas pérdidas disminuyen a 3,030,313.92 MJ/año con la instalación del aislamiento térmico.

Se calculo la eficiencia del aislamiento térmico para cada una de las líneas de vapor obteniéndose una eficiencia promedio superior al 94%, este valor significa que el aislamiento instalado tiene alta eficacia para minimizar las pérdidas de calor.

Se cumplió con el objetivo de determinar el espesor óptimo de aislamiento para cada una de las tuberías analizadas. Los resultados obtenidos indican que, para el sistema de alta y media presión (HP/IP), el espesor óptimo calculado es de 8 pulgadas, valor que supera los espesores establecidos en los planos de diseño, los cuales varían entre 4” y 6”. De igual forma, en el sistema de baja presión (LP), el espesor óptimo se encuentra en el rango de 4” a 6”, superando el espesor existente de 2 pulgadas. Estos resultados evidencian que los espesores actualmente instalados o considerados en los planos son inferiores a los requeridos para minimizar eficazmente las pérdidas de calor en las condiciones operativas evaluadas.

Finalmente, se calculó el ahorro energético acumulado de 72923.30 MMBTU/año y un ahorro económico anual estimado de 1336319.54 USD. La comparación de las pérdidas de calor con y sin aislamiento evidencia un considerable ahorro energético anual, el cual compensa la inversión de la implementación del aislamiento térmico (42274.61 USD). La inversión es rentable dado que se logra recuperar en un plazo de 117 días (aproximadamente 4 meses).

5.2. Recomendaciones

Se recomienda implementar un programa de inspección termográfica semestral o anualmente del aislamiento térmico en zonas donde exista mayor pérdida de calor, ello permitirá identificar rápidamente posibles fallas localizadas (aislamiento mojado o dañado) que puedan afectar su desempeño térmico.

física del material y la posible presencia de humedad o deterioro, factores que pueden afectar su desempeño térmico.

Se recomienda establecer un procedimiento detallado para el retiro temporal y la reinstalación del aislamiento durante el mantenimiento anual garantizando que los materiales (Silicato de Calcio y Lana Mineral) se manejen correctamente para evitar daños y pérdida de sus propiedades aislantes.

Se recomienda investigar la viabilidad técnica y económica de reemplazar los aislantes actuales (Silicato calcio y Lana mineral) con materiales aislantes con menores conductividades térmicas (como aerogeles o lanas microporosas), que podrían reducir el espesor requerido sin comprometer la eficiencia del sistema.

Se recomienda promover la capacitación continua del personal de mantenimiento y operación en técnicas de instalación, control y reparación de aislamiento térmico teniendo en cuenta los procedimientos del fabricante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TESIS

- Aristizábal et al. (2014). Análisis de pérdidas energéticas y económicas por transporte de vapor en tuberías sin un adecuado aislamiento térmico. Artículo de Investigación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Redes de Ingeniería, Bogotá. <https://doi.org/10.14483/2248762X.6358>
- Chepe Fiestas, C. M., & Núñez Díaz, S. J. (2018). Diseño de un sistema de aislamiento térmico para la red de tuberías de vapor en la Empresa Agroindustrial Pucalá SAC. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería Arquitectura y Urbanismo, Pimentel. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/4872>
- Cabrera, M. & Baca, L. (2016). Estudio del sistema de aislamiento térmico industrial para determinar y analizar su rendimiento energético en el transporte de NASH y soda cáustica en una empresa minera, Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero en Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote. <https://hdl.handle.net/20.500.14278/2641>
- Ovando et al (2011). Determinación de pérdidas de calor en la red de transporte de vapor del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, con base en el estado físico del aislamiento térmico de vapor ductos. Revista mexicana de Geoenergía ISSN 0186-5897, Geotermia Vol 24, Comisión Federal De Electricidad Subdirección De Generación Gerencia De Proyectos Geo termoeléctricos. <https://publications.mygeoenergynow.org/journals/Geotermia-Vol24-2.pdf#page=13>
- Fierro et al. (2018). Control y Mantenimiento de Las Redes de Distribución de Vapor en la Industria. Trabajo de Titulación para optar al Título Profesional de Ingeniero de Ejecución en Mantenimiento Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María Sede Concepción-Rey Balduino de Bélgica, Chile. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/45997/3560901543867UTF SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pérez et al. (2017). Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos, 23 de agosto, en Camagüey, Artículo de Investigación, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. <https://doi.org/10.21789/22561498.1198>

Toala et al. (2021). Optimización energética mediante recubrimiento térmico en una red de distribución a vapor, Artículo de Investigación, Dominio de las Ciencias, Universidad de la Rioja. España.
<http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i1.1686>

LIBROS

Cengel, Y. B. (2011). Transferencia de calor y masa. México: Mc Graw Hill.

Kreith, F. (1998). Principios de transferencia de calor (4.^a ed.).

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). Fundamentos de transferencia de calor (5.^a ed.). Prentice Hall.

Faires, V. M., & Simmang, C. S. (1984). Termodinámica (5.^a ed.). McGraw-Hill.

Moran, Shapiro, Boettner & Bailey (2011) – Fundamentos de Termodinámica Técnica

LINKOGRAFÍA

Adima, A. (2020). Guía de buenas prácticas: Aislamiento térmico en la industria. <https://afelma.org/wp-content/uploads/2020/10/Gu%C3%ADa-Buenas-Pr%C3%A1cticas-Aislamiento-en-la-Industria.pdf>

Energéticos, S. (2017, 30 de enero). Aislamiento térmico. Remica. <https://www.remica.es/aislamiento-termico/>

Gobain, S. (2023). Aislamiento térmico en la Industria. Isover. <https://www.isover-aislamiento-tecnico.es/industria/aplicaciones/aislamiento-termico-industria>

Hispania, V. (2016). Conceptos Básicos del Aislamiento Térmico. <https://www.vipeq.es/aislamiento-termico/conceptos-basicos-del-aislamiento-termico/>

- IPUR. (2023). La importancia del aislamiento térmico en la industria. IPUR.
<https://aislaconpoliuretano.com/la-importancia-del-aislamiento-termico-en-la-industria/>
- Lumitos. (2019). Aislante térmico. Química.es.
https://www.quimica.es/enciclopedia/Aislante_t%C3%A9rmico.html
- Osorio, U. R. (2023, 15 de marzo). Aislamiento térmico: qué es y tipos. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/aislamiento-termico-que-es-y-tipos-4348.html>
- Puig, A. (1950). Fenómenos de transporte. http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/transporte/cond_calor/conduccion/conduccion.html
- S&P. (2018, 1 de octubre). Materiales aislantes térmicos. S&P.
<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/materiales-aislantes-termicos/>
- Spirax Sarco. (2011). The Steam and Condensate Loop.
<https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/introduction/the-steam-and-condensate-loop>
- Thermal Engineering. (2018). Qué es la ley de conducción térmica de Fourier - Definición. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ley-de-conduccion-termica-de-fourier-definicion/>
- TLV. (2018). ¿Que es el vapor de agua? <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-steam.html>
- TLV. (2018). ¿Que es el vapor de agua? <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-steam.html>
- Unamacor. (2023). Aislamiento termico. Grupo Unamacor.
<https://www.grupounamacor.com/aislamiento-termico-tipos-y-recomendaciones/>
- Adima, A. (2020). Guía de buenas prácticas: Aislamiento térmico en la industria.
<https://afelma.org/wp-content/uploads/2020/10/Gu%C3%ADa-Buenas-Pr%C3%A1cticas-Aislamiento-en-la-Industria.pdf>

- Fierro, F. (2018). Control y Mantenimiento de Las Redes de Distribución de Vapor en la Industria.
<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/45997/3560901543867UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Industriales, P. (05 de 2013). Pro-Industriales.
<http://proindustriales.blogspot.com/2013/05/aislamiento-termico.html>
- Spirax Sarco. (2014). Water essentials: Fundamentos de las calderas industriales y los sistemas de generación de vapor.
<https://es.chemtreat.com/solutions/water-essentials-handbook-fundamentals-of-industrial-boilers-and-steam-generation-systems/>
- The Babcock & Wilcox Company (2005). Steam/its generation and use (41st ed.). Barberton, Ohio. Kitto, J.B., & Stultz, S.C. (Eds.)
https://www.academia.edu/41579939/Steam_Its_Generation_and_Use?
- Carvalho, L. (2018). Water Essentials Handbook: Fundamentals of Industrial Boilers and Steam Generation Systems. ChemTreat.
<https://www.chemtreat.com/solutions/water-essentials-handbook-fundamentals-of-industrial-boilers-and-steam-generation-systems/>
- Tawil, E. (2021). Steam Distribution Systems – D02-008. Continuing Education & Development, Inc. (Manual formativo sobre sistemas de distribución de vapor).
<https://www.cedengineering.com/userfiles/D02-008%20-%20Steam%20Distribution%20Systems%20-%20US.pdf?>
- Proindesa. (s.f.). Manta cerámica 2. Proindesa.
<https://proindesa.com/producto/manta-ceramica-2/>
- Perlita expandida: usos y aplicaciones para aislante térmico. (s.f.).
<https://www.aislamientotermico.com.ar/materiales-aislantes/perlita-expandida>
- Aplicaciones efectivas del aislamiento térmico con vermiculita expandida. (2025, octubre). <https://termicosyacusticos.es/aislamiento/aplicaciones-del-aislamiento-termico-con-vermiculita-expandida/>

Minetech. (s.f.). Vermiculita expandida. <https://minetech.es/aislamiento-natural/vermiculita-expandida/>

Espumlatex. (s.f.). Sistemas de poliuretano PIR y PUR: soluciones avanzadas para aislamiento térmico en la industria. <https://espumlatex.com/sistemas-de-poliuretano-pir-y-pur-soluciones-avanzadas-para-aislamiento-termico-en-la-industria/>

Paneles de poliisocianurato: aislamiento PIR y panel aislante térmico. (s.f.). <https://www.danosa.com/es-es/familia/poliisocianurato-pir/>

Poliestireno expandido EPS: características y usos principales. (s.f.). <https://www.raipintores.com/blog/poliestireno-expandido/>

Genz Clima. (s.f.). ¿Qué es un ladrillo refractario y para qué sirve? <https://genzclima.com/ladrillo-refractario/>

Tablas de rugosidad absoluta 2015. (2015). Scribd. <https://es.scribd.com/document/303269150/Tablas-de-Rugosidad-absoluta-2015>

Anexo A: Tablas de vapor sobrecalentado

918

TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)*}$					$P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61°C)}$			
Sat. [†]	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
$P = 0.20 \text{ MPa (120.21°C)}$					$P = 0.30 \text{ MPa (133.52°C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61°C)}$			
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
$P = 0.50 \text{ MPa (151.83°C)}$					$P = 0.60 \text{ MPa (158.83°C)}$				$P = 0.80 \text{ MPa (170.41°C)}$			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

*La temperatura entre paréntesis es la temperatura de saturación a la presión especificada.

† Propiedades del vapor saturado a la presión especificada.

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 1.00 \text{ MPa (179.88 °C)}$					$P = 1.20 \text{ MPa (187.96 °C)}$				$P = 1.40 \text{ MPa (195.04 °C)}$			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
$P = 1.60 \text{ MPa (201.37 °C)}$					$P = 1.80 \text{ MPa (207.11 °C)}$				$P = 2.00 \text{ MPa (212.38 °C)}$			
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
$P = 2.50 \text{ MPa (223.95 °C)}$					$P = 3.00 \text{ MPa (233.85 °C)}$				$P = 3.50 \text{ MPa (242.56 °C)}$			
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K		
$P = 4.0 \text{ MPa (250.35 °C)}$					$P = 4.5 \text{ MPa (257.44 °C)}$					$P = 5.0 \text{ MPa (263.94 °C)}$				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737		
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571		
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111		
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516		
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483		
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210		
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781		
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605		
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136		
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458		
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619		
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648		
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566		
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388		
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124		
$P = 6.0 \text{ MPa (275.59 °C)}$					$P = 7.0 \text{ MPa (285.83 °C)}$					$P = 8.0 \text{ MPa (295.01 °C)}$				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450		
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937		
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321		
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658		
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579		
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266		
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800		
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221		
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822		
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185		
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372		
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419		
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350		
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181		
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925		
$P = 9.0 \text{ MPa (303.35 °C)}$					$P = 10.0 \text{ MPa (311.00 °C)}$					$P = 12.5 \text{ MPa (327.81 °C)}$				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638		
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596						
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130		
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433		
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749		
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651		
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317		
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828		
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227		
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540		
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967		
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195		
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269		
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220		
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065		
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819		

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (conclusión)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 15.0 \text{ MPa (342.16 °C)}$					$P = 17.5 \text{ MPa (354.67 °C)}$				$P = 20.0 \text{ MPa (365.75 °C)}$			
Sat.	0.010341	2455.7	2610.8	5.3108	0.007932	2390.7	2529.5	5.1435	0.005862	2294.8	2412.1	4.9310
350	0.011481	2520.9	2693.1	5.4438								
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531
900	0.035503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574
$P = 25.0 \text{ MPa}$					$P = 30.0 \text{ MPa}$				$P = 35.0 \text{ MPa}$			
375	0.001978	1799.9	1849.4	4.0345	0.001792	1738.1	1791.9	3.9313	0.001701	1702.8	1762.4	3.8724
400	0.006005	2428.5	2578.7	5.1400	0.002798	2068.9	2152.8	4.4758	0.002105	1914.9	1988.6	4.2144
425	0.007886	2607.8	2805.0	5.4708	0.005299	2452.9	2611.8	5.1473	0.003434	2253.3	2373.5	4.7751
450	0.009176	2721.2	2950.6	5.6759	0.006737	2618.9	2821.0	5.4422	0.004957	2497.5	2671.0	5.1946
500	0.011143	2887.3	3165.9	5.9643	0.008691	2824.0	3084.8	5.7956	0.006933	2755.3	2997.9	5.6331
550	0.012736	3020.8	3339.2	6.1816	0.010175	2974.5	3279.7	6.0403	0.008348	2925.8	3218.0	5.9093
600	0.014140	3140.0	3493.5	6.3637	0.011445	3103.4	3446.8	6.2373	0.009523	3065.6	3399.0	6.1229
650	0.015430	3251.9	3637.7	6.5243	0.012590	3221.7	3599.4	6.4074	0.010565	3190.9	3560.7	6.3030
700	0.016643	3359.9	3776.0	6.6702	0.013654	3334.3	3743.9	6.5599	0.011523	3308.3	3711.6	6.4623
800	0.018922	3570.7	4043.8	6.9322	0.015628	3551.2	4020.0	6.8301	0.013278	3531.6	3996.3	6.7409
900	0.021075	3780.2	4307.1	7.1668	0.017473	3764.6	4288.8	7.0695	0.014904	3749.0	4270.6	6.9853
1000	0.023150	3991.5	4570.2	7.3821	0.019240	3978.6	4555.8	7.2880	0.016450	3965.8	4541.5	7.2069
1100	0.025172	4206.1	4835.4	7.5825	0.020954	4195.2	4823.9	7.4906	0.017942	4184.4	4812.4	7.4118
1200	0.027157	4424.6	5103.5	7.7710	0.022630	4415.3	5094.2	7.6807	0.019398	4406.1	5085.0	7.6034
1300	0.029115	4647.2	5375.1	7.9494	0.024279	4639.2	5367.6	7.8602	0.020827	4631.2	5360.2	7.7841
$P = 40.0 \text{ MPa}$					$P = 50.0 \text{ MPa}$				$P = 60.0 \text{ MPa}$			
375	0.001641	1677.0	1742.6	3.8290	0.001560	1638.6	1716.6	3.7642	0.001503	1609.7	1699.9	3.7149
400	0.001911	1855.0	1931.4	4.1145	0.001731	1787.8	1874.4	4.0029	0.001633	1745.2	1843.2	3.9317
425	0.002538	2097.5	2199.0	4.5044	0.002009	1960.3	2060.7	4.2746	0.001816	1892.9	2001.8	4.1630
450	0.003692	2364.2	2511.8	4.9449	0.002487	2160.3	2284.7	4.5896	0.002086	2055.1	2180.2	4.4140
500	0.005623	2681.6	2906.5	5.4744	0.003890	2528.1	2722.6	5.1762	0.002952	2393.2	2570.3	4.9356
550	0.006985	2875.1	3154.4	5.7857	0.005118	2769.5	3025.4	5.5563	0.003955	2664.6	2901.9	5.3517
600	0.008089	3026.8	3350.4	6.0170	0.006108	2947.1	3252.6	5.8245	0.004833	2866.8	3156.8	5.6527
650	0.009053	3159.5	3521.6	6.2078	0.006957	3095.6	3443.5	6.0373	0.005591	3031.3	3366.8	5.8867
700	0.009930	3282.0	3679.2	6.3740	0.007717	3228.7	3614.6	6.2179	0.006265	3175.4	3551.3	6.0814
800	0.011521	3511.8	3972.6	6.6613	0.009073	3472.2	3925.8	6.5225	0.007456	3432.6	3880.0	6.4033
900	0.012980	3733.3	4252.5	6.9107	0.010296	3702.0	4216.8	6.7819	0.008519	3670.9	4182.1	6.6725
1000	0.014360	3952.9	4527.3	7.1355	0.011441	3927.4	4499.4	7.0131	0.009504	3902.0	4472.2	6.9099
1100	0.015686	4173.7	4801.1	7.3425	0.012534	4152.2	4778.9	7.2244	0.010439	4130.9	4757.3	7.1255
1200	0.016976	4396.9	5075.9	7.5357	0.013590	4378.6	5058.1	7.4207	0.011339	4360.5	5040.8	7.3248
1300	0.018239	4623.3	5352.8	7.7175	0.014620	4607.5	5338.5	7.6048	0.012213	4591.8	5324.5	7.5111

Anexo B: Tabla de propiedades del aire

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, ISBN 0-306067020-8.

Anexo C: Tabla de dimensiones de la tubería acero al carbono, cedula 40.

TABLA F.1 Cédula 40

Tamaño nominal de la tubería		Diámetro exterior		Espesor de pared		Diámetro interior			Área de flujo	
NPS (in)	DN (mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(ft)	(mm)	(ft ²)	(m ²)
⅛	5	0.405	10.3	0.068	1.73	0.269	0.0224	6.8	0.000 394	3.660×10^{-5}
¼	8	0.540	13.7	0.088	2.24	0.364	0.0303	9.2	0.000 723	6.717×10^{-5}
⅜	10	0.675	17.1	0.091	2.31	0.493	0.0411	12.5	0.001 33	1.236×10^{-4}
½	15	0.840	21.3	0.109	2.77	0.622	0.0518	15.8	0.002 11	1.960×10^{-4}
¾	20	1.050	26.7	0.113	2.87	0.824	0.0687	20.9	0.003 70	3.437×10^{-4}
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	1.049	0.0874	26.6	0.006 00	5.574×10^{-4}
1¼	32	1.660	42.2	0.140	3.56	1.380	0.1150	35.1	0.010 39	9.653×10^{-4}
1½	40	1.900	48.3	0.145	3.68	1.610	0.1342	40.9	0.014 14	1.314×10^{-3}
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	2.067	0.1723	52.5	0.023 33	2.168×10^{-3}
2½	65	2.875	73.0	0.203	5.16	2.469	0.2058	62.7	0.033 26	3.090×10^{-3}
3	80	3.500	88.9	0.216	5.49	3.068	0.2557	77.9	0.051 32	4.768×10^{-3}
3½	90	4.000	101.6	0.226	5.74	3.548	0.2957	90.1	0.068 68	6.381×10^{-3}
4	100	4.500	114.3	0.237	6.02	4.026	0.3355	102.3	0.088 40	8.213×10^{-3}
5	125	5.563	141.3	0.258	6.55	5.047	0.4206	128.2	0.139 0	1.291×10^{-2}
6	150	6.625	168.3	0.280	7.11	6.065	0.5054	154.1	0.200 6	1.864×10^{-2}
8	200	8.625	219.1	0.322	8.18	7.981	0.6651	202.7	0.347 2	3.226×10^{-2}
10	250	10.750	273.1	0.365	9.27	10.020	0.8350	254.5	0.547 9	5.090×10^{-2}
12	300	12.750	323.9	0.406	10.31	11.938	0.9948	303.2	0.777 1	7.219×10^{-2}
14	350	14.000	355.6	0.437	11.10	13.126	1.094	333.4	0.939 6	8.729×10^{-2}
16	400	16.000	406.4	0.500	12.70	15.000	1.250	381.0	1.227	0.1140
18	450	18.000	457.2	0.562	14.27	16.876	1.406	428.7	1.553	0.1443
20	500	20.000	508.0	0.593	15.06	18.814	1.568	477.9	1.931	0.1794
24	600	24.000	609.6	0.687	17.45	22.626	1.886	574.7	2.792	0.2594

Anexo D: Ficha técnica de la cámara termográfica

Especificaciones generales

Temperatura	
En funcionamiento	De -10 °C a 50 °C
Almacenamiento	De -40 °C a 70 °C
Humedad relativa	95 % sin condensación
Altitud	
En funcionamiento	2000 m
Almacenamiento	12 000 m
Pantalla	Pantalla táctil 8,9 cm diagonal horizontal QVGA (320 x 240) LCD con retroiluminación
Batería	Batería recargable de Iones de litio
Duración de la batería según los ensayos realizados	≥2 horas de funcionamiento continuo sin Wi-Fi (la duración real depende de los ajustes seleccionados y del uso que se haga)
Tiempo de carga	≤1,5 horas
Temperatura de carga	De 0 °C a 40 °C
Modo de carga	Cable Micro USB conectado entre el Producto y un PC; puede cargarse durante la descarga de Imágenes
Ahorro de energía	Modos de reposo y desconexión seleccionables por el usuario
Seguridad	IEC 61010-1: Grado de contaminación 2
Radio inalámbrica	
Frecuencia	2412 MHz a 2462 MHz
Potencia suministrada	<100 mW
CMIIT	2019DJ4384
Compatibilidad electromagnética (EMC)	
Internacional	EN61326-1, CISPR 11: Grupo 1, clase A <i>Grupo 1: El equipo genera de forma intencionada o utiliza energía de frecuencia de radio de carga acoplada conductora que es necesaria para el funcionamiento interno del propio equipo.</i> <i>Clase A: El equipo es adecuado para su uso en todos los ámbitos, a excepción de los ámbitos domésticos y aquellos que estén directamente conectados a una red de suministro eléctrico de baja tensión que proporciona alimentación a edificios utilizados para fines domésticos. Puede que haya dificultades potenciales a la hora de garantizar la compatibilidad electromagnética en otros medios debido a las interferencias conducidas y radiadas.</i> <i>Precaución: Este equipo no está diseñado para su uso en entornos residenciales y es posible que no ofrezca la protección adecuada contra radiofrecuencia en estos entornos.</i>
Corea (KCC)	Equipo de Clase A (Equipo de difusión y comunicación Industrial) <i>Clase A: El equipo cumple con los requisitos industriales de onda electromagnética (Clase A) y así lo advierte el vendedor o usuario. Este equipo está diseñado para su uso en entornos comerciales, no residenciales.</i>
EE. UU. (FCC)	47 CFR 15 Subparte C Secciones 15.207, 15.209, 15.249
Vibración	De 10 Hz a 150 Hz, 0,15 mm, IEC 60068-2-6
Golpes	30 g, 11 ms, IEC 60068-2-27
Calda	1 m
Tamaño (A x L x P)	89 mm x 127 mm x 25 mm
Peso	0,233 kg
Grado de protección IP	IEC 60529: IP54
Idiomas admitidos	alemán, checo, chino simplificado, chino tradicional, coreano, español, finés, francés, inglés, italiano, húngaro, japonés, neerlandés, polaco, portugués, ruso, sueco y turco



Especificaciones detalladas

Rango de funcionamiento	0,5 m a 1,2 m
Rango de temperaturas	De -20 °C a 150 °C (sin calibración a temperaturas inferiores a -10 °C)
Precisión	±2 °C o 2 % (lo que sea mayor)
Funciones de imagen térmica	
Frecuencia de captura de imágenes	9 Hz
Resolución del detector	120 x 90
Píxeles totales	10 800
Sensibilidad térmica (NETD)	≤0,06 °C a una temperatura objetivo de 30 °C (60 mK)
Banda espectral	8,0 μm a 14 μm (onda larga)
Cabeceo	17 μm
Campo de visión (H X V)	50 ° x 38 °
Resolución espacial (IFOV)	7,6 mRad
Número F	F1.13
Distancia focal mínima	0,5 m
Tecnología IR-Fusion™	Modo AutoBlend™ ajustable
Funciones visuales (en luz visible)	
Rango de funcionamiento	0,5 m a 3,0 m
Resolución	Salida de 320 x 240
Píxeles totales	307 200
Campo de visión (H X V)	68 ° x 52 °
Enfoque	Lente fija
Iluminación	SI (activada, desactivada, iluminación)
Paleta	Escala de grises, Hierro, Alto contraste, Metal caliente, Azul-rojo
Captura de imágenes y almacenamiento de datos	
Capacidad de memoria interna	~500 imágenes
Formatos de archivo	No radiométricos (.jpg) o completamente radiométricos (.is2). No se requiere software de análisis para los archivos .jpg. Es necesario utilizar el software de escritorio Fluke Connect para los archivos .is2.
Revisión de la memoria	Visión en miniatura y en pantalla completa
Anotación de texto	SI (solo formato de archivo .is2; no formato .jpg)
Conectividad inalámbrica	Conexión a LAN mediante PC y Wi-Fi (según disponibilidad)

Anexo E: Ficha técnica del velocímetro



Descripción

Anemómetro Digital Rango del viento: 0~45 m/s UT363

Uni-T Anemometro Digital Compacto Bluetooth Ut363bt Ut363

El modelo UNI-T UT363 es un mini anemómetro con rendimiento estable, seguro y fiable. El presente producto incorpora una función nueva de comunicación Bluetooth que facilita su uso, y es ampliamente utilizado en la medición de la velocidad del viento en industrias tales como la minería, petroquímica, navegación, ventilación, deportes, etc.

Particularidades:

- * Velocidad del viento: 0 ~ 45m/s
- * Temperatura: -10 ~ 50 °C (Resolución 0.1 °C) 14 ~ 122 °F (Resolución 0.2°F)
- * Escala de Beaufort: Nivel 0 ~ 12
- * Tiempo de muestreo: 2 segundos
- * Función HOLD (Retención de datos)
- * Iluminación de display
- * Indicador de baja batería
- * Apagado automático (Luego de 5 minutos de inactividad)
- * Interfaz USB
- * Selección de Valor Máximo y Valor Promedio

Anexo F: Ficha técnica del silicato de calcio



Ref. Junho 24 Ver 1.0

Silicato de Cálcio ROCK-SIL®

O ROCK-SIL® é um material isolante de alta performance, composto por silicato de cálcio. Este produto é amplamente utilizado em diversas indústrias devido às suas excelentes propriedades térmicas e mecânicas.

VANTAGENS

- eficiência térmica;
- aumento do conforto térmico;
- redução do gasto de energia renovável e não renovável;
- fácil adaptação a projetos;
- desempenho uniforme em toda área isolada;
- contribui na segurança contra fogo.

PROPRIEDADES TÍPICAS

ABNT NBR 10662

Petrobras N-1618

ASTM C 533, tipo 1

Altas propriedades mecânicas: Devido sua rigidez, o silicato de cálcio ROCK-SIL® é utilizado em tubulações e equipamentos que sofrem tráfego superficial de operadores e outros tipos de esforços mecânicos tais como: escadas encostadas sobre os mesmos, impactos leves de veículos etc. Apresenta grande resistência ao transporte, manuseio e instalação.

Excelente desempenho térmico: O baixo fator k do silicato de cálcio ROCK-SIL® reduz os custos de operação devido à substancial economia de energia, além de proporcionar melhor controle das temperaturas de processo.

Totalmente isento de amianto: O silicato de cálcio ROCK-SIL® está em conformidade com as exigências de segurança internacionais.

Inércia química: O silicato de cálcio ROCK-SIL® não ataca o aço inoxidável nem acelera sua corrosão.

Resistência ao fogo: O silicato de cálcio ROCK-SIL® é incombustível, provendo elevada segurança ao aplicador e à indústria.

Instalação simples: O silicato de cálcio ROCK-SIL® pode ser cortado facilmente, aumentando sua velocidade de instalação.



EMBALAGEM

Caixas de papelão

Produtos e dimensões

ROCK-SIL®	Comprimento (pol)	Largura (pol)	Espessura (pol)	Embalagem
Placas	18 e 36	6 e 12	1, 1½, 2, 2½, 3	Caixa de papelão

ROCK-SIL®	Diâmetro nominal (pol)	Espessura (pol)	Comprimento (pol)	Embalagem
Tubos bigornados (colunas)	1½ a 7	1, 1½, 2, 2½, 3	36	Caixa de papelão
Tubos segmentados (segmentos)	7 a 36	1, 1½, 2, 2½, 3		

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (KCAL/M.H.°C)

Temperatura de Operação (°C)									
50	100	150	200	300	400	500	600	650	
0,048	0,051	0,054	0,057	0,062	0,068	0,073	0,078	0,080	

VALIDADE

Indeterminada.

Armazenar em local coberto, seco, ventilado e nas embalagens intactas.

GUARAREMA

Av. Dr. Adhemar de Barros, 714
Itapema - Guararema - SP
Telefone: (11) 4693-1220 / (11) 4693-1411

BOITUVA

Estr. Munic. Luiza Q. Sartorelli, 50
Santo Antônio - Boituva - SP
Telefone: (15) 3263-1466

www.rockfibras.com.br



Ø Nominal (pol)	Temperatura de Operação (°C)							
	100	150	200	300	400	500	600	650
½	1	1½	2	2½	2½	2½	2½	2½
¾	1	1½	2	2½	2½	2½	2½	2½
1"	1	1½	2½	2½	2½	2½	2½	2½
1½"	1	1½	2½	2½	2½	2½	3	3½
2"	1	1½	2½	2½	2½	2½	3	3½
2½"	1	1½	2½	2½	2½	3	3	3½
3"	1	1½	2½	2½	2½	3	3½	3½
3½"	1	1½	2½	2½	2½	3	3½	4
4"	1	1½	2½	2½	2½	3	3½	4
4½"	1	1½	2½	2½	3	4	3½	4½
5"	1	1½	2½	2½	3	4	4	4½
6"	1	1½	2½	2½	3	4	4	4½
8"	1	1½	2½	3	4	4½	4½	5
10"	1½	2	2½	3	4	4½	4½	5
12"	1½	2	2½	3	4	5	5	5
14"	1½	2	2½	3½	4	5	5	5

Ø Nominal (pol)	Temperatura de Operação (°C)							
	100	150	200	300	400	500	600	650
16"	1½	2	2½	3½	4	5	5	5
26"	1½	2½	2½	4	5	5	5	5
30"	1½	2½	2½	4	5	5	5	5
32"	1½	2½	2½	4	5	5	5	6
34"	1½	2½	2½	4	5	5	5	6
36"	1½	2½	2½	4	5	5	5	6
Superfícies Planas	2	2½	3	4½	5	5½	6½	8

INFORMAÇÕES PARA TRANSPORTE E ARMAZENAGEM

Para manutenção de desempenho e garantia da qualidade de nossos produtos recomendamos que os materiais sejam transportados em caminhões tipo baú, de forma a evitar que intempéries ou lonas e cordas comprometam a integridade do produto.

As embalagens devem ser armazenadas conforme etiqueta de identificação do produto.

Recomenda-se que o produto seja mantido em sua embalagem original e acondicionado de forma a evitar contato direto com o solo, sobre paletes, prateleiras ou em estruturas sem irregularidades possíveis de danificá-lo.

O local de armazenamento deve ser coberto, seco, estar isento de umidade e protegido contra intempéries.

A Lã de Rocha não é considerada produto químico perigoso, portanto não se aplicam códigos e classificações para seu transporte terrestre, fluvial, marítimo ou aéreo.

MANUSEIO E SEGURANÇA (C)

- Não deve ser ingerido;
- Em caso de ingestão accidental, não induzir o vômito. Procurar auxílio médico imediato;
- Recomenda-se observar as normas de segurança estabelecidas pelos órgãos competentes e usar EPIs adequados, como luvas e óculos de segurança;
- Para maiores informações consultar FDS (Ficha de Dados de Segurança) do produto.

FRASES DE SEGURANÇA

Não se aplica - Produto não perigoso, não classificado em GHS.

Maiores informações sobre o produto podem ser obtidas em:

www.rockfibras.com.br

OBSERVAÇÕES

O produto não pode ficar exposto ao contato constante com água ou intempéries;

Verificar classe de reação ao fogo correspondente ao uso pretendido;

As espessuras e densidades devem ser definidas de acordo com cada projeto;

A correta instalação assegura eficiência e vida útil ao produto;

Após instalação produto deverá receber proteção mecânica de material adequado ao equipamento isolado.

Recomendamos que seja feito plano de montagem para fixação da manta isolante à medida em que é estendida, pois véu de superfície não confere suporte compatível com sistema de fixação por pinos.

DESEMPENHO ROCKFIBRAS

Garantimos a qualidade dos nossos produtos contra defeitos de fabricação, porém não assumimos a responsabilidade pelo desempenho da obra, uma vez que não temos controle direto sobre as condições de aplicação. Eventuais ressarcimentos estarão limitados ao valor do produto. Informamos que a empresa pode promover alterações nos produtos sempre que necessário, sem prévio aviso. Os produtos devem ser aplicados por profissionais habilitados.

Para informações, treinamentos, literatura ou suporte técnico, entre em contato.

GUARAREMA

Av. Dr. Adhemar de Barros, 714
Itapema - Guararema - SP
Telefone: (11) 4693-1220 / (11) 4693-1411

BOITUVA

Estr. Munic. Luiza Q. Sartorelli, 50
Santo Antônio - Boituva - SP
Telefone: (15) 3263-1466






www.rockfibras.com.br



Anexo G: Ficha técnica de la lana mineral



Ref. Maio 24 Ver 0.1

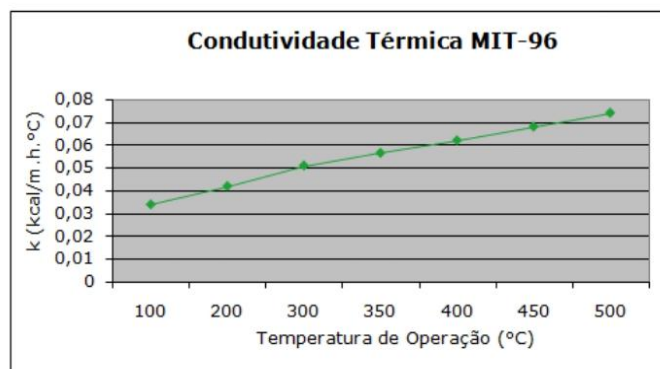
MIT-96

DESCRIÇÃO

Mantas flexíveis em lã de rocha THERMAX®, revestidas em uma das faces com tela de arame galvanizado. Com densidade nominal de 96 kg/m³, apresentam melhor desempenho em temperaturas operacionais máximas entre 350 e 500°C.

ESPECIFICAÇÕES

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (ASTM C 177)



ESPESSURAS RECOMENDADAS

Temperatura Operação (°C)	Espessura (mm)
100	50
150	50
200	75
250	75
300	100
350	125
400	150
450	175
500	200

Cálculos especiais podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico ou consulte a "Tabela de perdas de calor e temperaturas superficiais externas em sistemas isolados com lã de rocha Thermax®".

LINK TABELA CALOR

NORMAS:

ABNT NBR 13047

Petrobras N-1618

ASTM C 592

GUARAREMA

Av. Dr. Adhemar de Barros, 714
Itapema - Guararema - SP
Telefone: (11) 4693-1220 / (11) 4693-1411

BOITUVA

Estr. Munic. Luiza Q. Sartorelli, 50
Santo Antônio - Boituva - SP
Telefone: (15) 3263-1466

www.rockfibras.com.br



Anexo H: Ficha técnica plancha aluminio liso

FICHA TÉCNICA PLANCHA DE ALUMINIO ALEACIÓN 3003 H14

DESCRIPCIÓN

Esta aleación de aluminio AA 3003 H14 se caracteriza por una mayor concentración de manganeso lo que le da mayor resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión y buena conformación en frío.

PRESENTACIONES

- **Aluminio liso:** Se distingue por presentar un acabado brillante en todas sus presentaciones.
- **Aluminio estriado:** Se diferencia por tener una textura antideslizante en acabado diamante el cual impide el deslizamiento de objetos.

USOS

- **Aluminio liso:** Ideal para aplicaciones en construcción, revestimientos metálicos, aislamiento térmico, coberturas, refrigeración, entre otros.
- **Aluminio estriado:** Empleado en superficies industriales, rampas hidráulicas, medios de transporte y escaleras.

PROPIEDADES MECÁNICAS

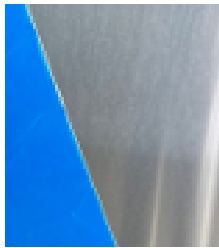
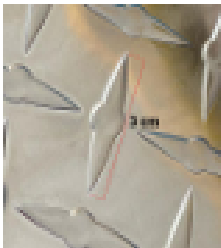
Norma técnica	Fluencia	Resistencia	Elongación
	Mpa	Mpa	%
ASTM B - 209	140	160	8

COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
0.60% máx.	0.60% máx.	0.05 – 0.20%	1.0 – 1.5%	0.10%	restante

DIMENSIONES STANDARD Y PESOS

Acabado	Espesor	Ancho	Largo	Peso
Liso	0.6 mm	1220 mm	2440 mm	5.20 kg
Liso	0.8 mm	1220 mm	2440 mm	6.66 kg
Liso	1.00 mm	1220 mm	2440 mm	8.32 kg
Liso	1.00 mm	1000 mm	3000 mm	8.38 kg
Liso	1.00 mm	1220 mm	3000 mm	10.23 kg
Liso	1.50 mm	1220 mm	2440 mm	12.72 kg
Estriado	1.50 mm	1500 mm	3000 mm	18.20 kg



Anexo I: Fotos de instalación de aislamiento térmico



Figura 25: Proceso de instalación de aislamiento térmico



Figura 26: Lugar donde se ejecutó el estudio

Anexo J: Iteraciones de la temperatura de superficie

Tabla 24: Cálculo temperatura superficie para tubería 18"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T ∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	45	0.0003082	0.000228	1.5077	18.7401	25	0.4786	38.16
562	38.16	0.0003082	0.000228	1.5077	18.9474	25	0.4786	38.01
562	38.01	0.0003082	0.000228	1.5077	18.9524	25	0.4786	38.01

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: Calculo temperatura superficie para tubería 14"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T ∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	57.6	0.0002298	0.000228	0.9252	20.2311	25	0.2798	58.98
562	59	0.00023	0.000228	0.92517123	20.187208	25	0.2798	59.06
562	59.06	0.00023	0.000228	0.92517123	20.185338	25	0.2798	59.06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Calculo temperatura superficie para tubería 12"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T ∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	57.36	0.0002055	0.000234	0.9967	20.4703	25	0.26395	58.04
562	58	0.0002055	0.000234	0.9967	20.4498	25	0.26395	58.08
562	58.08	0.0002055	0.000234	0.9967	20.4473	25	0.26395	58.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Calculo temperatura superficie para tubería 10"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T ∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	55	0.0001672	0.000249	1.1383	21.0149	25	0.23855	56.17
562	56.17	0.0001672	0.000249	1.1383	20.9755	25	0.23855	56.23
562	56.23	0.000167	0.000249	1.13834	20.97345	25	0.23855	56.23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Calculo temperatura superficie para tubería 8"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	48.5	0.0000178	0.000275	1.3428	21.9733	25	0.21155	53.5
562	53.5	0.0000178	0.000275	1.3428	21.5659	25	0.21155	54.03
562	54	0.0000178	0.000275	1.3428	21.5487	25	0.21155	54.05
562	54.05	0.0000178	0.000275	1.34278	21.54702	25	0.21155	54.05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Calculo temperatura superficie para tubería 6"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	75	0.0000128	0.000312	1.1565	22.2433	25	0.13495	76.17
562	76.17	0.0000128	0.000312	1.1565	22.2040	25	0.13495	76.26
562	76.26	0.0000128	0.000312	1.1565	22.2010	25	0.13495	76.27
562	76.27	0.0000128	0.000312	1.1565	22.2007	25	0.13495	76.27

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Calculo temperatura superficie para tubería 4"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	69.2	0.0003928	0.0003923	1.5572424	23.4236847	25	0.10795	70.06
562	70	0.0003928	0.000392	1.5572	23.3945	25	0.10795	70.11
562	70.11	0.0003928	0.0003923	1.5572424	23.390555	25	0.10795	70.11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Calculo temperatura superficie para tubería 3"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K))	T∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	65	0.0002815	0.0004672	1.866128563	23.9873508	25	0.09525	66.58
562	66.58	0.0002815	0.0004672	1.866128563	23.926772	25	0.09525	66.68
562	66.68	0.0002815	0.0004672	1.866128563	23.9230853	25	0.09525	66.69
562	66.69	0.0002815	0.0004672	1.866128563	23.9224699	25	0.09525	66.69

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Calculo temperatura superficie para tubería 2"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K)	T∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	55.76	0.0001729	0.0004899	2.418290206	25.3660862	25	0.08095	60.67
562	60.67	0.0001729	0.0004899	2.418290206	24.8983914	25	0.08095	61.35
562	61.35	0.0001729	0.0004899	2.418290206	24.8701029	25	0.08095	61.37
562	61.37	0.0001729	0.0004899	2.418290206	24.869273	25	0.08095	61.37

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Calculo temperatura superficie para tubería 1 1/2"

Tfluido (°C)	Tsup. Asumida (°C)	Rfluido (m°C/W)	Rpared (m°C/W)	Raislamiento (m°C/W)	h total (W/(m2 K)	T∞ (°C)	Daislamiento (m)	Tsup. Encontrada (°C)
562	53	0.0001264	0.0005882	2.773059031	25.6189507	25	0.07495	58.24
562	58.2	0.0001264	0.0005882	2.773059031	25.3804946	25	0.07495	58.50
562	58.5	0.0001264	0.0005882	2.773059031	25.3675178	25	0.07495	58.50

Fuente: Elaboración propia

Anexo K: Evaluación del sistema con lana mineral de roca

Las pérdidas de calor obtenida todas las tuberías en estudio con espesor de aislamiento térmico con lana mineral de roca se presentan en la siguiente Tabla N°34.

Tabla 34: Pérdidas de calor en las tuberías de estudio

Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)	T interior (°C)	R total (m°C/W)	q (W/m)	Q con aislamiento (W)
18	30	562	1.2714	422.373	12671.200
14	35	562	1.1401	471.008	16485.282
12	25	562	1.2273	437.528	10938.202
10	30	562	1.3999	383.591	11507.741
8	35	550	1.6485	318.464	11146.235
6	25	550	1.2107	433.627	10840.678
4	40	272.7	1.6225	152.662	6106.490
3	35	272.7	1.9374	127.849	4474.728
2	50	272.7	2.5002	99.072	4953.586
1 1/2	45	272.7	2.8602	86.603	3897.154

Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas de calor obtenidas considerando aislamiento térmico con lana mineral se obtuvo en total 93,021.296 W, lo cual se ha reducido un 11.60% en comparación con el escenario que se evaluó la combinación de dos tipos de aislamiento térmico (silicato del calcio y lana mineral) según lo propuesto.

Tabla 35: Eficiencia energética en diferentes diámetros de tuberías con lana mineral

Diámetro (Pulg.)	Q sin aislamiento (W)	Q con aislamiento (W)	η (%)
18	607461.532	12671.200	97.91
14	569178.181	16485.282	97.10
12	374516.3237	10938.202	97.08
10	386625.0352	11507.741	97.02
8	359679.0527	11146.235	96.90
6	203294.185	10840.678	94.67
4	92372.55147	6106.490	93.39
3	65476.15744	4474.728	93.17
2	67584.68849	4953.586	92.67
1 1/2	50495.4159	3897.154	92.28

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 35 se observa que al reducir las pérdidas de calor considerando aislamiento térmico con lana mineral de roca mayor es la eficiencia dado que se necesita menos energía para poder mantener la temperatura deseada.

Tabla 36: Ahorro energético y económico

Diámetro (Pulg.)	Q sin aislamiento (MJ/año)	Q con aislamiento (MJ/año)	Ahorro energético (MJ/año)	Ahorro económico (USD/año)
18	17494892.12	364930.56	17129961.56	297526.00
14	16392331.61	474776.13	15917555.47	276468.02
12	10786070.12	315020.21	10471049.92	181869.03
10	11134801.01	331422.93	10803378.08	187641.16
8	10358756.72	321011.58	10037745.14	174343.07
6	5854872.53	312211.51	5542661.01	96269.09
4	2660329.48	175866.91	2484462.57	43152.01
3	1885713.33	128872.16	1756841.18	30514.13
2	1946439.03	142663.29	1803775.74	31329.33
1 1/2	1454267.98	112238.05	1342029.93	23309.38
TOTAL	79968473.93	2679013.33	77289460.60	1342421.22

Fuente: Elaboración propia.

El ahorro energético anual es de 77,289,460.60 MJ/año, equivalente a un ahorro económico estimado de 1,416 millones de USD, lo que evidencia la alta eficiencia del uso de lana mineral como material aislante en sistemas de transporte de vapor.

Tabla 37: Inversión requerida con lana mineral roca

Diámetro (Pulg.)	Tipo Aislante	Área (m2)	Precio (USD/m2)	Inversión USD
18	Lana Mineral	71.741	165	11837.33
14	Lana Mineral	61.531	125	7691.40
12	Lana Mineral	41.461	115	4768.03
10	Lana Mineral	44.966	105	4721.39
8	Lana Mineral	46.522	90	4187.00
6	Lana Mineral	21.198	70	1483.85
4	Lana Mineral	27.131	60	1627.85
3	Lana Mineral	20.947	55	1152.06
2	Lana Mineral	25.431	45	1144.40
1 1/2	Lana Mineral	21.192	40	847.66
TOTAL INVERSIÓN				39461.00

Fuente: Elaboración propia

La inversión total estimada para la implementación considerando lana mineral en las tuberías de vapor es de USD 39,461.00. Asimismo, se observa que la tubería de mayor diámetro (18" y 14") concentra mayor área superficial y por tanto mayor será el costo de la inversión.

Por último, se calculó el tiempo de recuperación de la inversión estimada con lana mineral.

Tabla 38: Período de retorno de la inversión con lana mineral

Diámetro (Pulg.)	Tipo Aislante	Ahorro económico (USD/año)	Inversión (USD)	Periodo Retorno (Días)
18	Lana Mineral	297526.00	11837.33	15
14	Lana Mineral	276468.02	7691.40	10
12	Lana Mineral	181869.03	4768.03	10
10	Lana Mineral	187641.16	4721.39	9
8	Lana Mineral	174343.07	4187.00	9
6	Lana Mineral	96269.09	1483.85	6
4	Lana Mineral	43152.01	1627.85	14
3	Lana Mineral	30514.13	1152.06	14
2	Lana Mineral	31329.33	1144.40	13
1 1/2	Lana Mineral	23309.38	847.66	13
Total				112

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 38 muestra que la inversión total estimada se recuperará en un periodo aproximado de 112 días. Confirmando con ello que la implementación del sistema de aislamiento térmico con lana mineral es económicamente viable y rentable para la planta.

Anexo L: Evaluación del sistema con silicato de calcio

Las pérdidas de calor obtenida todas las tuberías en estudio con espesor de aislamiento térmico con lana mineral de roca se presentan en la siguiente Tabla N°39.

Tabla 39: Pérdidas de calor en las tuberías de estudio

Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)	T interior (°C)	R total (m°C/W)	q (W/m)	Q con aislamiento (W)
18	30	562	1.0634	505.006	15150.188
14	35	562	0.9551	562.260	19679.111
12	25	562	1.0280	522.369	13059.218
10	30	562	1.1723	458.090	13742.698
8	35	550	1.3800	380.439	13315.382
6	25	550	1.0180	515.729	12893.237
4	40	272.7	1.3630	181.732	7269.282
3	35	272.7	1.6264	152.298	5330.436
2	50	272.7	2.0972	118.112	5905.605
1 1/2	45	272.7	2.3980	103.295	4648.273

Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas de calor obtenidas considerando el uso exclusivo de aislamiento térmico con silicato de calcio para todo el sistema en estudio alcanzo un valor total de 11,0993.43 W, lo cual se ha aumentado un 5.5% en comparación con el escenario que se evaluó la combinación de dos tipos de aislamiento térmico (silicato del calcio y lana mineral) según lo propuesto. Este resultado evidencia que la selección diferenciada del material aislante según las condiciones operativas de cada línea permite una mayor eficiencia térmica global del sistema.

Tabla 40: Eficiencia energética en diferentes diámetros de tuberías

Diámetro (Pulg.)	Q sin aislamiento (W)	Q con aislamiento (W)	η (%)
18	607461.532	15150.188	97.51
14	569178.181	19679.111	96.54
12	374516.3237	13059.218	96.51
10	386625.0352	13742.698	96.45
8	359679.0527	13315.382	96.30
6	203294.185	12893.237	93.66
4	92372.55147	7269.282	92.13
3	65476.15744	5330.436	91.86
2	67584.68849	5905.605	91.26
1 1/2	50495.4159	4648.273	90.79

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 40 se observa que al reducir las pérdidas de calor considerando solo el uso de aislamiento térmico con silicato de calcio, la eficiencia global del sistema se reduce 0.68% en comparación con el escenario propuesto. Este comportamiento se atribuye a que el silicato de calcio, si bien presenta buenas propiedades mecánicas y resistencia a altas temperaturas, no resulta eficiente cuando se aísla a tuberías de vapor de menor diámetro.

Tabla 41: Ahorro energético y económico

Diámetro (Pulg.)	Q sin aislamiento (MJ/año)	Q con aislamiento (MJ/año)	Ahorro energético (MJ/año)	Ahorro económico (USD/año)
18	17494892.12	436325.42	17058566.70	296285.96
14	16392331.61	566758.41	15825573.20	274870.40
12	10786070.12	376105.48	10409964.64	180808.06
10	11134801.01	395789.69	10739011.32	186523.19
8	10358756.72	383483.01	9975273.71	173258.02
6	5854872.53	371325.22	5483547.31	95242.36
4	2660329.48	209355.33	2450974.15	42570.35
3	1885713.33	153516.55	1732196.79	30086.09
2	1946439.03	170081.41	1776357.62	30853.11
1 1/2	1454267.98	133870.27	1320397.71	22933.66
TOTAL	79968473.93	3196610.78	76771863.15	1333431.20

Fuente: Elaboración propia

El ahorro energético anual es de 76,771,863.15 MJ/año, equivalente a un ahorro económico estimado de 1,333 millones de USD, lo que evidencia la alta eficiencia del uso de silicato de calcio como material aislante en sistemas de transporte de vapor.

Tabla 42: Inversión requerida con silicato calcio

Diámetro (Pulg.)	Tipo Aislante	Área (m2)	Precio (USD/m2)	Inversión USD
18	Silicato Calcio	71.741	180	12913.45
14	Silicato Calcio	61.531	135	8306.72
12	Silicato Calcio	41.461	120	4975.34
10	Silicato Calcio	44.966	115	5171.05
8	Silicato Calcio	46.522	100	4652.23
6	Silicato Calcio	21.198	85	1801.82
4	Silicato Calcio	27.131	75	2034.81
3	Silicato Calcio	20.947	65	1361.53
2	Silicato Calcio	25.431	55	1398.72
1 1/2	Silicato Calcio	21.192	50	1059.58
Total Inversión				43675.24

Fuente: Elaboración propia

La inversión total estimada para la implementación del sistema de aislamiento térmico considerando silicato de calcio en las tuberías de vapor es de USD 43,675.24. Asimismo, se observa que las tuberías de mayor diámetro (18" y 14") concentra mayor área superficial, lo que incrementa de manera significativa el costo de la inversión. En comparación con el sistema que emplea materiales aislantes combinados, esta opción representa una mayor inversión inicial, lo cual impacta directamente en la rentabilidad de la planta.

Por último, se calculó el tiempo de recuperación de la inversión estimada con silicato de calcio.

Tabla 43: Período de retorno de la inversión con silicato calcio

Diámetro (Pulg.)	Tipo Aislante	Ahorro económico (USD/año)	Inversión (USD)	Periodo Retorno (Días)
18	Silicato Calcio	296285.96	12913.45	16
14	Silicato Calcio	274870.40	8306.72	11
12	Silicato Calcio	180808.06	4975.34	10
10	Silicato Calcio	186523.19	5171.05	10
8	Silicato Calcio	173258.02	4652.23	10
6	Silicato Calcio	95242.36	1801.82	7
4	Silicato Calcio	42570.35	2034.81	17
3	Silicato Calcio	30086.09	1361.53	17
2	Silicato Calcio	30853.11	1398.72	17
1 1/2	Silicato Calcio	22933.66	1059.58	17
Total				131

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 43 muestra que la inversión total estimada para la implementación del sistema de aislamiento térmico con silicato de calcio se recuperará en un periodo aproximado de 131 días. Sin embargo, este periodo de retorno resulta mayor en comparación con el sistema que emplea materiales aislantes combinados, debido a la mayor inversión inicial requerida bajo las condiciones evaluadas.