

ELABORACIÓN DE ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS
DE CALOR PRESENTES EN LA PLANTA TÉRMICA DE UNA EMPRESA INDUSTRIAL
COLOMBIANA

JUAN SEBASTIAN REYES TOLEDO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2023

ELABORACIÓN DE ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS
DE CALOR PRESENTES EN LA PLANTA TÉRMICA DE UNA EMPRESA INDUSTRIAL
COLOMBIANA

JUAN SEBASTIAN REYES TOLEDO

Proyecto de trabajo de grado en la modalidad de solución a un problema de ingeniería
para optar al título de ingeniero mecánico

DIRECTOR
MSc Ing. Héctor Fabio Montaña Morales

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2023

AGRADECIMIENTOS

Este documento ha sido realizado gracias a la voluntad de Dios primeramente, a mi mamá y a mi abuelita por la constante motivación para culminarlo, a mi tío que está en el cielo por ser la inspiración de avanzar cada día, a mi novia por los consejos y ayudas prestadas para la correcta presentación del documento, a mi director de tesis por las constantes correcciones y revisiones para que estuviera presentado lo mejor posible y a mis amigos por el apoyo y la buena energía para culminar mi ciclo académico.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

I.	Introducción.....	8
II.	Objetivos.....	10
	a. Objetivo general	10
	b. Objetivos específicos	10
1.	Marco referencial	
1.1.	Marco conceptual.....	11
1.2.	Marco teórico.....	12
1.2.1.	Aislantes térmicos.....	12
1.2.1.1.	La calidad de los aislantes y su influencia en la transferencia de calor.....	12
1.2.1.2.	Importancia del aislamiento térmico en la industria.....	14
1.2.1.3.	Tipos de aislantes térmicos.....	16
1.2.1.4.	Nuevas tecnologías de materiales aislantes.....	17
1.2.2.	Termografía.....	18
1.2.2.1.	Técnicas de lecturas termográficas.....	19
1.2.2.2.	Campos de aplicación.....	19
1.2.2.3.	Elementos del sistema termográfico.....	20
1.2.2.4.	Inspección termográfica.....	20
1.2.2.5.	Normas y estándares en la termografía infrarroja.....	21
1.2.3.	Determinación Del Coeficiente De Convección.....	21
1.2.4.	Análisis De Condición De Frontera Para Temperatura Externa de Los Aislantes.....	23
1.2.5.	Gasto económico por fugas de calor.....	25
1.2.6.	Contextualización de la planta energética.....	26
2.	Identificación de las pérdidas de calor en la planta térmica.....	29
2.1.	Registro termográfico de la estructura de la planta.....	29
2.1.1.	Metodología y equipos.....	29
2.1.2.	Técnicas de análisis termográfico.....	30
2.2.	Cuantificación de las pérdidas de calor en la planta.....	31
2.2.1.	Consideraciones teóricas según las variables presentes en la planta.....	32
2.2.2.	Metodología de cuantificación de pérdidas de calor.....	32
2.2.3.	Metodología de cuantificación de gasto económico.....	37
2.3.	Plan de reducción de pérdidas de calor.....	38
2.3.1.	Consideraciones teóricas para la cuantificación de reducción de pérdidas.....	40

2.3.2.	Metodología de cuantificación de reducción de pérdidas de calor.....	40
2.3.3.	Metodología de cuantificación del gasto económico con reducción de pérdidas de calor.....	42
3.	Resultados.....	44
3.1.	Resultados analíticos.....	44
3.1.1.	Construcción de base de datos para la cuantificación total de pérdidas de calor.....	44
3.1.2.	Construcción de base de datos para la reducción de pérdidas de calor.....	45
3.2.	Resultados económicos.....	47
3.2.1.	Gasto económico en la cuantificación total.....	47
3.2.2.	Gasto económico en la reducción de pérdidas de calor.....	49
4.	Análisis económico de la implementación de aislantes y reducción de pérdidas de calor.....	52
4.1.	Costos de implementación del mantenimiento.....	52
4.2.	Rentabilidad económica de la inversión del mantenimiento.....	53
5.	Plan de mantenimiento.....	58
III.	Conclusiones.....	59
IV.	Anexos.....	60
V.	Bibliografía.....	62

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: <i>Propiedades del aire a 1 atm para los registros en Fig 5.</i>	33
Tabla 2: Coeficientes de convección <i>para los registros en Fig 5.</i>	35
Tabla 3: Coeficientes de convección <i>para los registros en Fig 5.</i>	36
Tabla 4: <i>Propiedades técnicas de materiales aislantes</i>	39
Tabla 5: <i>Distribución de pérdidas de calor en la Planta Térmica.</i>	45
Tabla 6: <i>Distribución de pérdidas de calor con implementación de aislantes en la Planta.</i>	46
Tabla 7: Gasto económico evaluado por cada nivel de la Planta Térmica.....	48
Tabla 8: Costo de inversión total del proyecto.....	52
Tabla 9: <i>Formulación de datos de inversión iniciales-Indicadores económicos.</i>	53
Tabla 10: <i>Flujo de efectivo neto de inversión – Ingresos vs Egresos.</i>	54
Tabla 11: <i>Estimación del Valor presente neto (VPN).</i>	56
Tabla 12: <i>Estimación La tasa interna de retorno (TIR).</i>	57

LISTA DE GRÁFICOS

Pág.

Gráfico 1: Termograma realizado a codo de tubería.....	18
Gráfico 2: <i>Balance de flujo de calor en las superficies del aislante térmico</i>	24
Gráfico 3: <i>Distribución de equipos del esquema termodinámico de la planta térmica</i> ..	27
Gráfico 4: Diagrama T-s del ciclo termodinámico Rankine por recalentamiento de la planta térmica.....	28
Gráfico 5: Gráfico 5: Técnica de termografía-Punteros múltiples por sección de área (Superficie de tubería, Piso 1).....	30
Gráfico 6: Registro termográfico tubería Bomba/Caldera 2-Punteros múltiples por sección de área.....	33
Gráfico 7: Registro termográfico ductos de recalentamiento Caldera 2-Punteros múltiples por sección de área.....	41
Gráfico 8: <i>Toneladas de carbón-mes consumidas con y sin aplicación de aislamiento</i>	50
Gráfico 9: <i>Relación del gasto económico mensual en la planta térmica</i>	51

I. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, el uso eficiente y racional de la energía se ha convertido en un elemento fundamental en la planificación energética a nivel global. La implementación de protocolos y estrategias para un consumo moderado de energía ha permitido a los usuarios actuar bajo un nuevo panorama industrial, reduciendo la contaminación en diversos países [1]. Sin embargo, en el ámbito de las plantas industriales, se ha observado que existe un porcentaje considerable de instalaciones con sistemas de aislamiento térmico deficientes o incluso sin aislamiento [2]. La mejora en el aislamiento térmico no solo implica una mayor eficiencia energética y una reducción significativa de las emisiones de CO₂, sino que también tiene un impacto económico considerable, con posibilidades de ahorro energético que oscilan entre el 20% y el 50% en diferentes casos [3].

En este contexto, la norma ISO 50001 ha sido implementada para establecer los requisitos de un Sistema de Gestión Energética, con el objetivo de lograr mejoras continuas y sistemáticas en el rendimiento energético de las organizaciones [4]. Esta norma ha permitido a las organizaciones establecer sistemas evaluativos de rendimiento energético reconocidos internacionalmente, fomentando la reducción de costos y emisiones contaminantes.

En el caso particular de Colombia, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) ha desempeñado un papel destacado en la promoción del uso racional y eficiente de la energía. Mediante la optimización e implementación de metodologías en el sector de producción energética del país, ha presentado alternativas de reducción en el consumo eléctrico a entidades gubernamentales, empresariales y políticas, fomentando la generación ecológica y la eficiencia energética en las industrias nacionales [5]. Entre las medidas más reconocidas se encuentra la ley 697 del 2001, que promueve el uso racional y eficiente de la energía, así como los estudios energéticos para determinar y priorizar alternativas que mejoren la eficiencia energética en las industrias [6].

Dentro del contexto de las empresas industriales colombianas de producción continua, los procesos de transformación de energía se llevan a cabo a través de plantas térmicas que garantizan el suministro eléctrico requerido para diversas secciones o instalaciones. En este estudio, se analizará en particular La Planta Térmica de una compañía industrial colombiana, la cual opera bajo dos ciclo de potencia a base de vapor. Sin embargo, debido a la falta de protocolos de mantenimiento adecuados, las instalaciones de la red de agua y vapor han experimentado dilataciones térmicas que han ocasionado fugas en el sistema de transporte y, por consiguiente, pérdidas de calor, lo que ha aumentado la demanda de combustible para compensar estas pérdidas energéticas.

En vista de esto, el presente proyecto tiene como objetivo elaborar una propuesta que permita reducir los gastos asociados a las pérdidas de calor en la Planta Térmica de la Compañía. La implementación de un sistema de aislamiento térmico adecuado y el mantenimiento de las fugas de calor garantizarán una sustracción energética adecuada en la *Planta Térmica*, reduciendo el consumo de combustible habitual e incrementando el ahorro en su presupuesto mensual de mantenimiento.

II. OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- Elaborar un análisis técnico-económico que permita reducir el consumo de carbón asociado a las pérdidas de calor, en una planta térmica de una empresa industrial colombiana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Identificar las pérdidas de calor en la red de transporte de vapor y equipos de la planta térmica a través de registros termográficos en todas sus zonas, para conocer el área total de fuga presente.
- Evaluar el gasto económico que generan las fugas de calor en la planta térmica a través del cálculo total de las pérdidas energéticas para conocer el impacto económico generado en un presupuesto mensual de mantenimiento promedio.
- Elaborar un plan de mantenimiento correctivo para disminuir el gasto en el impacto económico en la industria empresarial, mediante una solución que contribuya a la reducción de las pérdidas de calor de la planta térmica.

1. MARCO REFERENCIAL.

1.1. MARCO CONCEPTUAL:

- **Poder Calorífico:** Es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a temperatura ambiente [8]. El poder calorífico puede evaluarse por la cantidad de energía producida respecto a la masa, el volumen o mol del combustible empleado.
- **Aislante Térmico:** Los materiales aislantes se pueden definir como aquellos que presentan una elevada resistencia al paso de calor, reduciendo la transferencia de este a su cara opuesta. El aislamiento térmico contribuye a la eficiencia energética al disminuir el consumo energético. Estos materiales cuentan con aire en sus cavidades interiores o con algún gas seco encapsulado, en estado inerte y quieto que, junto con una baja conductividad térmica, se les confiere el título de materiales aislantes [9].
- **Termografía:** La termografía infrarroja es la ciencia de la detección de la energía infrarroja que emite un objeto, que la convierte en temperatura aparente y muestra el resultado como una imagen infrarroja. Se puede captar la información termográfica de equipos en funcionamiento a una distancia segura y tener una mejor oportunidad de ver anomalías de temperatura en condiciones de operación normales [10].
- **Pérdidas de calor:** Las pérdidas de calor son consideradas como un mecanismo de transferencia de energía calórica, entre 2 medios que se encuentran a diferentes temperaturas [11]. Estas se generan fuera de la línea principal de transferencia de un proceso térmico y reducen el potencial energético que se transfiere.
- **Plan de mantenimiento:** Un plan de mantenimiento es el conjunto de tareas de mantenimiento programado, agrupadas o no siguiendo algún tipo de criterio, y que incluye a una serie de equipos de la planta, que habitualmente no son todos. Hay todo un conjunto de equipos que se consideran no mantenibles desde un punto de vista preventivo, y en los cuales es mucho más económico aplicar una política puramente correctiva [12].

- **Rentabilidad Económica:** La rentabilidad económica es una medida del rendimiento de los activos de una empresa, en determinado tiempo, con independencia de la financiación de estos. Funciona como un indicador básico para juzgar la eficiencia en la gestión empresarial y su rentabilidad en términos económicos [13].
- **Eficiencia Térmica:** Es la medida del rendimiento de una máquina térmica y se define como la relación entre el trabajo neto obtenido y el calor suministrado al fluido de trabajo [14].

1.2. MARCO TEÓRICO:

1.2.1. Aislantes Térmicos:

Los aislantes térmicos son materiales con baja conductividad térmica que evitan el tránsito del flujo de calor en cualquier sistema que se use, a razón de pérdida o ganancia. Están conformados por materiales con coeficientes de transmisión bajos y por estructuras en celda con aire [15].

En la industria, el uso de materiales aislantes ha representado múltiples beneficios en cuanto a eficiencia de trabajo y economía se refiere. La gran variedad de materiales aplicados a la tecnología de aislamiento, ha permitido que empresas obtengan mejores rentabilidades de producción en los procesos térmicos que desempeñen y ahorro de costes en sus inversiones [16].

Dada su amplio catálogo de materiales y aplicaciones en el mercado, es necesario especificar qué condiciones de operación existen en los aislantes térmicos, para garantizar según sus características, aplicaciones y ventajas, la opción más rentable para una empresa.

1.2.1.1. La calidad de los aislantes y su influencia en la transferencia de calor:

La calidad de un aislante recae en la variación de su conductividad térmica y de sus propiedades de material, para garantizar el control y conservación de temperatura en un sistema. Estos parámetros definen la utilidad de un aislante en la industria, por el ahorro energético que les sea reflejado en cada uno de los procesos empleados. Al ser la energía una unidad que representa un costo monetario según su fuente de obtención,

la optimización en la producción de energía térmica estaría representada bajo el ahorro en el consumo de combustibles.

Durante la producción de calor, es necesario aprovechar al máximo las cantidades requeridas de combustible para cada proceso. Es por eso que en maquinarias como hornos, calderas, recalentadores y demás, los aislantes ayudan a preservar el calor producido y permiten ahorrar las cantidades de energía que se usan para el proceso, mediante la reducción de pérdidas de calor.

Ahora bien, es necesario comprender que la calidad de los aislantes es evaluada en el contexto de aplicación que se requiera. Así, el uso de los aislantes térmicos dependerá de los tipos de transferencia de calor que se presenten en los procesos, tales como:

- **Transferencia por conducción:** La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases [11]. La razón de conducción de calor está definida por la ecuación 1:

$$\dot{Q} = kA * \frac{T1 - T2}{\Delta x} \quad (1)$$

En donde:

$k \rightarrow$ Es la constante de conductividad térmica del material.

$A \rightarrow$ Es el área donde se emite el flujo de calor.

$T \rightarrow$ Son las temperaturas registradas a ambos lados de la pared del material.

$\Delta x \rightarrow$ Es el espesor de la lámina o sección de área.

- **Transferencia por convección:** La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la *conducción* y el *movimiento de fluidos*. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección [11]. La razón de convección de calor está definida por la ecuación 2:

$$\dot{Q} = h * A * (Ts - Ta) \quad (2)$$

En donde:

$h \rightarrow$ Es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$A \rightarrow$ Es el área superficial donde se produce la transferencia de calor.

$T_s, T_a \rightarrow$ Son las temperaturas registradas tanto en la superficie de la sección como en el ambiente.

- **Transferencia por radiación:** La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, no requiere la presencia de un medio interventor [11]. Este modo de transferencia puede verse evidenciado en la manera como la energía del sol llega hacia el planeta y es justificado por la ecuación 3:

$$\dot{Q} = \varepsilon * \sigma * A * T_s^4 \quad (3)$$

En donde:

- $\varepsilon \rightarrow$ Es la emisividad del material según su relación a un cuerpo negro.
- $\sigma \rightarrow$ Es la constante de Stefan-Boltzmann.
- $A \rightarrow$ Es el área de radiación emitida
- $T_s \rightarrow$ Es la temperatura termodinámica según la ley de Stefan-Boltzmann.

1.2.1.2. Importancia del aislamiento térmico en la industria:

Según la sección anterior, la calidad de los aislantes térmicos influye en la reducción de pérdidas de calor en el momento de su aplicación, representando ahorros energéticos y económicos significativos, conforme a las propiedades de los materiales. La selección de los materiales parte de las consideraciones de su uso en el entorno, bien sean: Para resistir esfuerzos mecánicos, con baja absorción de humedad, resistentes a la vibración, incombustibles superficialmente, entre otras [17].

No obstante, la implementación de aislantes térmicos trae consigo otras múltiples ventajas que, dentro del ámbito industrial, beneficia de manera administrativa, social y política a cualquier empresa que emplee máquinas para la producción de calor.

Desde la configuración más sencilla vista en una termoeléctrica (condensador, turbina, calentador y alternador) hasta la más compleja, ha sido empleada una gran variedad de combustibles que permiten el calentamiento del fluido a altas temperaturas: desde carbón y gas natural, hasta Fueloil y otros biocombustibles [18]. Las altas temperaturas de trabajo que emplean estos ciclos, combinado con la longevidad de producción de las centrales, ocasionan que los materiales usados para el transporte del fluido sufran de

desgaste y dilatación, y por ende generen la aparición de fugas de calor en el sistema, imperceptibles al ojo humano.

Como se mencionaba anteriormente, las fugas de calor que se presenten en las instalaciones de una planta termoeléctrica representarán la pérdida energética que sufre el sistema con base a su producción total de energía. El desbalance en la demanda energética y las fugas no detectadas en el sistema, obligan a la planta a incrementar la cantidad de combustible necesario, para no salir dentro de los rangos de producción energética requerida, produciendo por consecuencia un incremento en la producción de gases contaminantes a la atmósfera, tales como: SO₂, NO_x, partículas, CO₂ y metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn) [19].

Mediante la reducción del consumo de combustible a través de aislantes térmicos, pueden ser obtenidos menores porcentajes de gases contaminantes en la atmósfera a menores temperaturas de emisión, permitiendo que industrias cumplan con los márgenes legales que sean establecidos por el país para plantas energéticas a base de combustibles fósiles, y promueva conciencia ecológica nacional frente demás industrias.

Las reducciones en el costo de combustible y el aumento de la disponibilidad son áreas claves de mejora para la contención de costos para las centrales eléctricas. Para algunas plantas, los gastos de combustible constituyen una porción grande del presupuesto total de operación. Incluso una mejora del 1% en el rendimiento térmico influye en la rentabilidad de la planta [20].

Describiendo la importancia de los aislamientos térmicos solamente desde el punto de vista administrativo y económico no abarcará una completa visión de su utilidad para una empresa. Es necesario considerar la importancia de estos frente a la reducción de los factores de riesgos más comunes a los que técnicos, mecánicos y demás trabajadores de una planta termoeléctrica están expuestos día a día a causa de superficies a altas temperaturas.

Las temperaturas que se pueden encontrar en diferentes superficies de trabajo en una planta termoeléctrica, pueden rondar por encima de los 100 °C hasta los 300 °C, considerando las operaciones térmicas que se realicen en estas superficies. Exponer a los trabajadores a este tipo de contacto, supone un alto factor de riesgo por quemadura, desde una leve irritación o hinchazón hasta la pérdida de tejidos musculares y/o extremidades corporales, lo cual imposibilita el correcto desempeño laboral de estos y afectando de manera directa su calidad de vida.

De acuerdo con diversos estudios sobre los riesgos y peligros laborales ocurridos en plantas termoeléctricas, ha sido comprobado que, aunque aparentemente no hay riesgo en contraer cáncer, leucemia y daños al ADN por exposición a campos magnéticos y eléctricos, si existe el riesgo de contraerlas por la exposición a los subproductos

generados en la quema de carbón, biomasa, fuel oíl entre otros combustibles como COV, HPA, cenizas y metales pesados (As y Cd, Mn y Pb, y As y Se) [21]. Aunque el uso de aislantes térmicos no sea la solución más directa al riesgo de padecer estas enfermedades, influye de manera consecuente con la regulación de menores gases contaminantes que puedan generar derivados perjudiciales hacia los trabajadores de la planta.

En definitiva, la importancia del aislamiento térmico en plantas termoeléctricas es remarcada por la reducción de riesgos en áreas ambientales, políticas, sociales y empresariales en la que se ve involucrada este tipo de plantas en empresas industriales. Para ello, es muy importante conocer qué tipo de material es el adecuado y sus características, teniendo en cuenta el enfoque de aplicación, sus propiedades y el beneficio representado para la empresa.

1.2.1.3. Tipos de aislantes térmicos:

Al existir tantas variables que inciden en la selección de un aislante térmico dentro del sector industrial y residencial, fueron implementadas normativas estandarizadas para categorizar datos y propiedades de los materiales, en los campos de aplicaciones industriales y/o civiles. Documentos tales como el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), El Código Técnico de la Edificación y muchas normas ISO y UNE enfocadas en sistemas de calefacción y climatización, ejemplifican el uso de los aislantes térmicos en base a normativas estandarizadas de los diferentes tipos y geometrías que deben contar [22].

De este modo y bajo las normativas establecidas por las instituciones gubernamentales y demás institutos tecnológicos, se han catalogado distintos tipos de aislantes térmicos. Entre estos, se pueden diferenciar los siguientes:

- **Aislantes Sintéticos:** Los Sintéticos, como su nombre lo dice, son aislantes fabricados bajo materiales compuestos como los son los polímetros o elementos fabricados, con la característica de poseer eficientes propiedades como impermeabilidad y conductividad térmica. Entre esta clase se puede encontrar los rollos reflexivos, el poliuretano, el poliestireno extruido (XPS) y el poliestireno expandido (EPS) [23].
- **Aislantes Ecológicos:** Este tipo de aislantes naturales fueron popularmente utilizados a razón de la alta contaminación producida por otros tipos de aislantes. Al ser naturales, pueden ser reciclados y degradados de una manera amigable con el medio ambiente. Algunos de sus ejemplares son la celulosa, el corcho, el lino, etc. [23].

- **Lanas Minerales:** Los aislantes de lanas minerales son consideradas como el aislante más popular del mercado. Se caracterizan por ser fabricados con fibras inorgánicas de filamentos, otorgando al material una mayor flexibilidad, mejores propiedades de conductividad térmica, alto grado de impermeabilidad y propiedades de aislamiento acústico. Dentro de sus ejemplares se pueden encontrar la Lana de vidrio y la lana de roca [24].

1.2.1.4. Nuevas tecnologías de materiales aislantes:

Debido a su gran demanda, se han realizado diversos estudios que permitan adaptar nuevas tecnologías hacia el uso de aislantes más eficientes, resistentes, ecológicos y exequibles como alternativas a las nuevas exigencias industriales.

En el ámbito industrial, el Aerogel ha sido implementado como la nueva promesa de los materiales aislantes, al ser uno de los pocos que promete minimizar las 3 formas de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) en espacios industriales.

El Aerogel fue inventado por Stephens Kistler en 1931 a razón de concebir uno de los materiales más livianos y resistentes en el mundo. En su proceso, no solo creó un material capaz de ser 3 veces más liviano que el aire, sino que al mismo tiempo consiguió que el material tuviera una porosidad mayor al 90% de su constitución y por ende, una conductividad térmica muy baja [25].

Actualmente se emplean diferentes métodos de fabricación de los Aerogeles para obtener mejores resultados en cuanto a su estructura molecular y propiedades térmicas, con bases de alúmina, estaño y óxido de cromo. No obstante, el Sílice se ha convertido en el complemento más popular para la fabricación del Aerogel, ya que los resultados obtenidos ofrecen mayores prestaciones en cuanto a las propiedades de este material, al grado de proporcionar una mayor rigidez en cuanto a su estructura y facilitar la construcción de poros con diámetros entre 5 hasta 20 nanómetros para una reducción en su conductividad térmica [25].

El Aerogel promete ser una tecnología futurista para el aislamiento dentro de la industria espacial. Según la Comisión Europea en 2016, el Aerogel a base de Sílice podría ser la mejor alternativa de aislante térmico para satisfacer las demandas estrictas de la intemperie espacial y promover nuevos sistemas que contribuyan a la exploración planetaria [26].

Los investigadores del proyecto AEROSUS confirman que el uso de diferentes tipos de Aerogeles, en base a sus estudios realizados, podrían contribuir a aplicaciones espaciales, específicamente dirigidos hacia la protección térmica de los tanques de

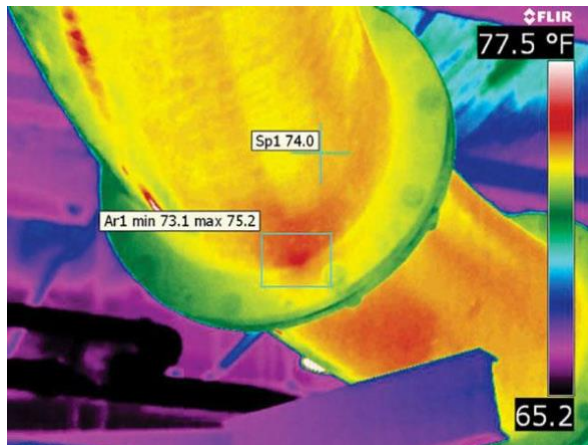
combustible y compartimientos presurizados, sustituyendo recubrimientos de MLI empleados frecuentemente de empresas que no europeas.

1.2.2. Termografía:

Según la norma ASTM E1316 sección J, la termografía es definida como el proceso de mostrar la temperatura real sobre las superficies de un objeto o ambiente, gracias a la detección de variaciones de radiación infrarroja [27]. Estos procesos permiten que los análisis de temperatura realizados sean sin contacto físico, previniendo cualquier tipo de incidente por contacto a altas temperaturas, gracias a los termogramas obtenidos por las cámaras termográficas.

Los termogramas son imágenes arrojadas por el sistema de recepción infrarroja de las cámaras termográficas que, según temperatura, humedad y demás factores del ambiente y del cuerpo medido, detectan los niveles de calor y frío, a escalas de color visibles al ojo humano [28]. Según los patrones de color en disposición de las cámaras, los rangos de temperatura bajas se muestran con tonalidades oscuras y opacas, como el azul, el negro, el gris, mientras que los rangos de temperatura altas con rojo, naranja y amarillo. En la figura 1 se muestra el rango de tonalidades que hay en el termograma de una tubería y la disipación térmica de sus temperaturas, según la radiación captada por la cámara.

Gráfico 1: Termograma realizado a codo de tubería.



Nota: Adaptado de *Ventajas de la termografía* [Fotografía], por Antonio Nieto, 2018, Mundo HVACR (<https://www.mundohvacr.com.mx/2015/01/ventajas-de-la-termografia/>)

1.2.2.1. Técnicas de lectura termográfica:

Existen 2 tipos de técnicas para realizar ensayos no destructivos mediante la termografía, denominados termografía pasiva y activa.

- **La termografía activa:** Consiste en realizar las lecturas infrarrojas de radiación con influencia de una estimulación externa de una fuente de calor, logrando distribuir la anomalía de temperatura dentro del sistema [28]. Dada su estimulación específica, la termografía activa define 2 técnicas en función de la aplicación de calor: En Termografía Infrarroja (TIR) pulsada se aplica un pulso corto de calor sobre el objeto y se graba su tiempo de enfriamiento, y en TIR lock-in se generan ondas de calor dentro del cuerpo para ser monitorizado mediante PC o amplificador Lock-in [29].
- **La termografía pasiva:** Consiste en realizar las lecturas infrarrojas sin una fuente de calor externa, permitiendo obtener en los termogramas, variaciones de temperaturas reflejadas en rangos de colores específicos. Los patrones anormales de temperatura indican un problema potencial, y posiblemente una diferencia de pocos grados centígrados podría ser sospechosa, mientras que grandes diferencias indican generalmente un comportamiento incorrecto [30].

1.2.2.2. Campos de aplicación:

Gracias a su amplia gama de aplicación, la termografía puede verse empleada en múltiples campos científicos como la ingeniería y la medicina o también en campos civiles como la arquitectura y la milicia [31]. A continuación, los ejemplares más vistos:

- **Sistemas eléctricos:** Aplicado en mantenimiento preventivo para sistemas de alta y baja tensión como transformadores de potencia y de corriente, fusibles, empalme de cables y demás instalaciones eléctricas.
- **Sistemas mecánicos:** Aplicado comúnmente en mantenimiento preventivo para inspecciones periódicas de maquinaria y detecciones de falla en sistemas de transmisión, para sistemas aislantes y refractarios, para sistemas térmicos como hornos y calderas, líneas de vapor, bombas de agua, motores eléctricos, intercambiadores de calor, torres de enfriamiento, entre otros.
- **Sistemas civiles:** Aplicado hacia la detección de problemas y falencias en estructuras y edificaciones urbanas como humedades, fugas de energía, tuberías sobrecalentadas, integridad de concreto, entre otros.

1.2.2.3. Elementos del sistema termográfico:

Para entender el funcionamiento de las lecturas termográficas y realizar los correctos análisis de medición de los termogramas, es necesario conocer los elementos que participan en el proceso de medición e inciden en la recolección de resultados.

- **Objeto (fuente de radiación):** Los objetos a analizar dentro del campo visual del sensor. Es necesario especificar que: dependiendo del material de la superficie, el objeto tendrá una emisividad específica y por ende una cantidad de radiación infrarroja específica; Los colores de los materiales no tienen ningún efecto perceptible sobre la medición de radiación infrarroja; Las propiedades físicas de la superficie de medición inciden en la lectura de temperaturas, a modo de que se recomienda considerar factores como limpieza o recubrimientos [32].
- **Entorno de medición:** En el espacio donde recorren las ondas electromagnéticas producidas por la radiación del objeto debe preverse de condiciones base que regulen el proceso de medición de los sensores, tales como: Temperatura del ambiente, meteorología, humedad del ambiente, polución y luz [32].
- **Subsistemas de procesamiento:** Las herramientas empleadas durante el proceso de lectura de temperatura son los mecanismos que brindan al operario la obtención correcta de datos y visualización de los espectros de emisión de la superficie del objeto. La característica de estos dispositivos es la lectura de las señales infrarrojas de radiación y la transformación de estas señales en datos cuantitativos y/o cualitativos, dependiendo del dispositivo [32]. Los más frecuentes en la industria son: Los termómetros de contacto, las cámaras termográficas y las pistolas térmicas infrarrojas.

1.2.2.4. Inspección termográfica:

En la industria, las inspecciones termográficas permiten conocer a las empresas las condiciones específicas de trabajo en las que se encuentran operando sus máquinas, mediante ensayos no destructivos, con el fin de analizar las temperaturas de operación presentes y clasificar cada una de estas en un marco de seguridad operacional [33].

El monitoreo constante de las temperaturas de operación de maquinarias, no solo garantiza su control e inspección a la hora de elaborar mantenimientos preventivos, sino que también garantiza la preservación de los equipos frente al deterioro de materiales causados a la alta exposición de temperaturas.

En la actualidad, existen 2 métodos de inspección con tecnología infrarroja usados en el campo de la termografía: El método cualitativo y el método cuantitativo:

- **El método cualitativo:** Permite analizar mediante los termogramas obtenidos, la existencia de anomalías según el gradiente de colores presentado en los registros gráficos obtenidos [34]. En este método, el análisis es elaborado posteriormente al registro realizado.
- **El método cuantitativo:** Permite medir en tiempo real el valor de la temperatura presente en el registro gráfico obtenido y posterior a ello, determinar la existencia de anomalías que puedan ser intervenidas en un mantenimiento programado a los equipos. En la actualidad existen diferentes registros de temperatura que permiten asociar el estado crítico de mantenimiento en un equipo, a razón de la variación de temperatura detectada [34].

1.2.2.5. Normas y estándares en la termografía infrarroja:

Se han establecido normas y guías por múltiples organizaciones alrededor del mundo, para estandarizar procedimientos y protocolos de trabajo que se deben seguir a la hora de elaborar una inspección termográfica. A continuación, se presentan algunos ejemplares:

- **ASTM E1934:** Guía estándar para examinar equipos eléctricos y mecánicos con termografía infrarroja. Esta guía proporciona directrices detalladas para realizar inspecciones termográficas [34].
- **NFPA (National Fire Protection Association) 70E:** Norma orientada específicamente hacia los requisitos de protección y seguridad necesarios de los trabajadores en las áreas de trabajo. Selección de elementos de protección personal adecuados [35].
- **OSHA 18001:** Norma para la reducción de riesgo de los termógrafos en momentos de inspección [34]. Evaluación y recomendación de trabajo frente a escenarios de peligro.

1.2.3. Determinación Del Coeficiente De Convección.

Existen relaciones empíricas usadas para analizar la convección natural sobre superficies dado a la complejidad del movimiento del fluido al comprender este mecanismo. Debido a esto, es difícil obtener relaciones analíticas sencillas mediante ecuaciones que rijan movimiento y energía o con generalidades e hipótesis simplificadoras, para esta transferencia de calor [39].

No obstante, mediante correlaciones empíricas de estudios experimentales, es posible justificar los patrones de comportamiento y relaciones de la transferencia de calor en la convección natural. Para el caso del estudio de las pérdidas de calor en la *Planta Térmica* se empleó la correlación empírica del número promedio de Nusselt (ecuación 4) para determinar el factor de convección natural que hay sobre los puntos de fuga capturados en los termogramas, al ser una de las más usadas para este tipo de estudios.

$$Nu = \frac{h L_c}{k} = C (Gr_L Pr)^n = C * Ra_L^n \quad (4)$$

En donde:

- Ra: Es el número de Rayleigh.
- Gr: Es el número de Grashof.
- Pr: Es el número de Prandtl.
- h: Es el factor de convección.
- Lc: Es la longitud característica.
- K: Es la conductividad térmica.

El número promedio de Nusselt asocia 2 términos que evalúan propiedades de los fluidos: El número de Grashof, el cual es una medida de magnitud relativa entre las fuerzas de flotabilidad y fuerza viscosa sobre un fluido [39] y el número de Prandtl, el cual describe la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica [38]. El producto de estos términos permite calcular el número de Raleigh, el cual podría definirse como la razón de las fuerzas de flotabilidad y los productos de las difusividades térmicas y de movimiento del fluido.

Las correlaciones existentes en la transferencia de calor por convección pueden ser expresadas mediante el número de Rayleigh, en relación a las constantes C y n, para determinar el número promedio de Nusselt. De este modo, para calcular el número Raleigh es necesario emplear las propiedades del fluido a la temperatura de película que se encuentre [39], de la siguiente manera:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (5)$$

En donde:

- V: es la viscosidad cinemática el fluido a la temperatura de película.
- g: es la gravedad.
- T: Son las temperaturas superficial y ambiente.
- β : Es la relación 1/Temperatura de película.

Una vez se calcula el número de Rayleigh, es posible conocer el número promedio de Nusselt, de acuerdo con las correlaciones empíricas para placas verticales. Considerando el intervalo $10^4 - 10^{13}$, se obtiene que:

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (6)$$

La ecuación 7, a diferencia del planteamiento realizado en la ecuación 4 para el número de Nusselt, abarca todo el intervalo del número de Rayleigh, cumpliendo con las condiciones previstas para C y n en esta configuración, siendo esta una formulación compleja pero más exacta que la planteada en la ecuación 5 [40].

De este modo, conociendo el número promedio de Nusselt es posible determinar el coeficiente de convección natural de cada lectura termográfica realizada, despejando el término de la ecuación 4 de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \rightarrow \frac{Nu * k}{L_c} = h \quad (7)$$

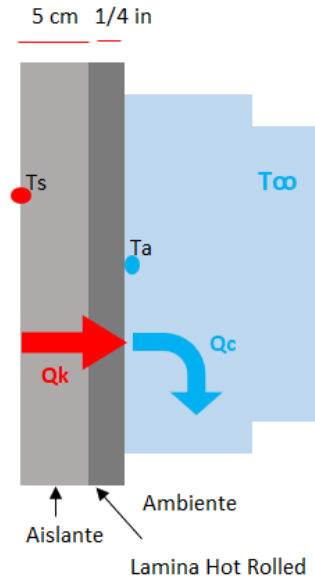
Y es así que mediante el número promedio de Nusselt, es posible determinar el coeficiente de convección de las superficies capturadas en los termogramas, y con este, la razón de transferencia de calor por convección natural planteada en la ecuación 2, para determinar las pérdidas de calor en la *Planta Térmica*.

1.2.4. Análisis De Condición De Convección De Frontera Para Temperatura Externa De Los Aislantes.

Para determinar la temperatura externa al aislante térmico y calcular las pérdidas de calor que podrían generar la implementación, es necesario emplear un análisis de condición de convección de frontera, explicado en el libro de transferencia de calor y masa de Çengel, como la conservación de un flujo de calor a través de un cuerpo a un medio circundante o viceversa [44]. En otras palabras, El calor que ingresa por la superficie de un medio debe ser el mismo que sale por su otra superficie.

En base a este planteamiento, se concibe la condición de frontera para los puntos de fuga de calor, entre la capa de aislante térmico y el medio circundante de la *Planta Térmica*, considerando el punto de fuga de calor que va a estar sellando el aislante.

Grafico 2: Balance de flujo de calor en las superficies del aislante térmico.



De este modo, el flujo de calor sobre el aislante podría ser representado mediante la condición de convección de frontera de la siguiente manera:

$$Q_k = Q_c \quad (8)$$

$$\frac{(k_{\text{aislante}} * A)}{x} * (T_s - T_a) = h * A * (T_a - T_{\infty})$$

En donde el calor que entra a través de los materiales es mediante conducción y sale al ambiente por convección, para expresar el balance de energía superficial soportado.

A partir de esta ecuación es posible organizar los términos para hallar la temperatura externa al aislante (T_a) y poder determinar las pérdidas de calor resultantes.

Resolviendo la ecuación para despejar T_a , se tiene que:

$$\frac{\left(\frac{k_{\text{aislante}} * T_s}{x} + h * T_{\infty}\right)}{\left(h + \frac{k_{\text{aislante}}}{x}\right)} = T_a$$

No obstante, considerando que el calor que se transfiere por conducción debe atravesar tanto el material del aislante como el material que protege el aislamiento, es necesario considerar dentro de la ecuación las resistencias térmicas de ambos materiales para calcular la temperatura que se encontrará al exterior de todo el aislamiento. De modo que la ecuación 10 puede ser replanteada como:

$$\frac{(T_s - T_a)}{R_{\text{Total}}} = h * A * (T_a - T_{\infty}) \quad (9)$$

Expresando la transferencia de calor por conducción de acuerdo a la suma de las resistencias térmicas de los materiales. Siendo esta expresada como:

$$\frac{(x_{aislante})}{K_{aislante} * A} + \frac{(x_{lamina})}{K_{lamina} * A} = R_{total} \quad (10)$$

Despejando T_a en la ecuación 9 para calcular la temperatura externa, se tiene que:

$$\frac{\left(\frac{T_s}{R_{Total}} + h * A * T_{\infty}\right)}{\left(h * A + \frac{1}{R_{Total}}\right)} = T_a$$

Una vez calculada la resistencia térmica total para cada temperatura registrada en los termogramas, es posible emplear el despeje de T_a de la ecuación 9 y, calcular la pérdida de calor de todos los puntos de fuga capturados, con la implementación de los aislantes térmicos.

Cabe aclarar que la R_{total} se ajusta a las secciones rectangulares donde se producen las emisiones de calor. Sin embargo, para algunas de las secciones cilíndricas, el R_{total} debe ser considerado de acuerdo a los radios internos y externos de las tuberías. De modo que sería representado como:

$$\frac{Ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)_{aislante}}{2 * \pi * K_{aislante} * L} + \frac{Ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)_{lamina}}{2 * \pi * K_{lamina} * L} = R_{total} \quad (11)$$

1.2.5. Gasto Económico Por Fugas De Calor:

Una planta termoeléctrica que funciona bajo una configuración específica de un ciclo de potencia, requiere una cantidad determinada de combustible para cumplir con la demanda energética de producción. Tal es el caso de la *Planta Térmica de La Compañía*, que emplea carbón en dos ciclos de potencia Rankine, para elevar el vapor a altas temperaturas.

Como se mencionó en secciones anteriores, la carencia o el mal estado de aislantes térmicos sobre las líneas de transporte de vapor, implica pérdidas en la conservación de la temperatura requerida en los procesos y disminuye el rendimiento de producción energética de la planta. Por tal motivo, es normal evidenciar que en este tipo de casos se incrementa el consumo del combustible empleado, con el fin de garantizar los parámetros de producción energética iniciales.

La prolongación de fugas de calor en los sistemas, representa un consumo adicional de combustible para los procesos energéticos y un gasto perjudicial en la rentabilidad de una planta. Por ende, conocer la cantidad de energía disipada en una red o máquina térmica, permite a las empresas determinar la cantidad de combustible desperdiciado según su poder calorífico y estimar el gasto económico

El cálculo para determinar el gasto económico (G. E.) que se produce en el combustible usado en la *Compañía*, se realiza mediante la ecuación 12:

$$G.E. = \frac{Q_{dot}Total}{PCI} * P_{Combust.} \quad (12)$$

En donde:

- $G.E.$: Es el gasto económico producido por el exceso de combustible.
- $Q_{dot}Total$: Es el calor total obtenido de las pérdidas de calor.
- PCI : Es el poder calorífico del combustible.
- $P_{Combust.}$: Es el precio del combustible según proveedores.

Para esta ecuación se aclara que el valor obtenido para el poder calorífico del carbón varía según las características de mezcla realizada por los proveedores del combustible.

Para determinar el precio de la tonelada de carbón se indicó que los precios base para la liquidación de regalías de carbón en Colombia debían estar acordes al ponderado de consumo interno, establecido en un valor de \$ 137.066,91, según la resolución #000137 de 30-06-2020 de la UPME [43]; Pese a esto, se manejó un valor diferente, de acuerdo con la cotización realizada con los proveedores de la *Planta Térmica* de \$206.000, como mutuo acuerdo de negocios entre ambas partes.

De este modo, será posible determinar el equivalente de combustible gastado, según las pérdidas de calor calculadas en *La Planta Térmica* y determinar el impacto del gasto energético en el presupuesto mensual de mantenimiento del área.

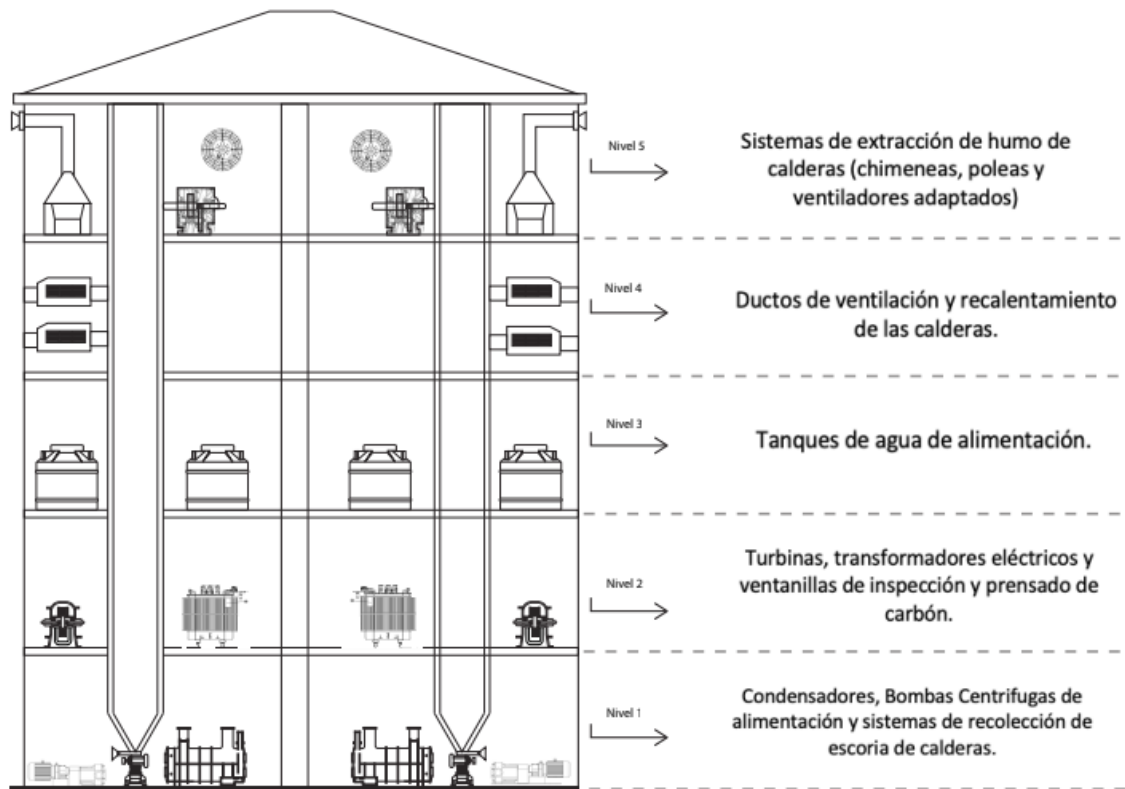
1.2.6. Contextualización De La Planta Energética:

Es necesario realizar una breve contextualización de las características de *La Planta Térmica* de la *Compañía*, para analizar la relevancia que trae consigo la instalación de aislantes térmicos, como medida de corrección a algunos de los defectos que han presentado estas instalaciones a lo largo de los años.

La Planta Térmica se caracteriza principalmente por ser una central termoeléctrica a base de carbón. Fue implementada alrededor de los años 70's con el fin de proporcionar un reservorio energético a la totalidad de la empresa y sus máquinas respectivamente, en caso de presentarse un corte en las instalaciones.

Para su producción energética, emplea 2 ciclos termodinámicos Rankine con implementación de recalentamiento para el aumento de su producción de potencia. *La Planta Térmica* está conformada por un predio de 5 pisos, en el cual las máquinas que conforman el esquema termodinámico de recalentamiento de los 2 ciclos en el sistema, mantienen una distribución de forma ascendente cumpliendo el orden presentado en el grafico 3:

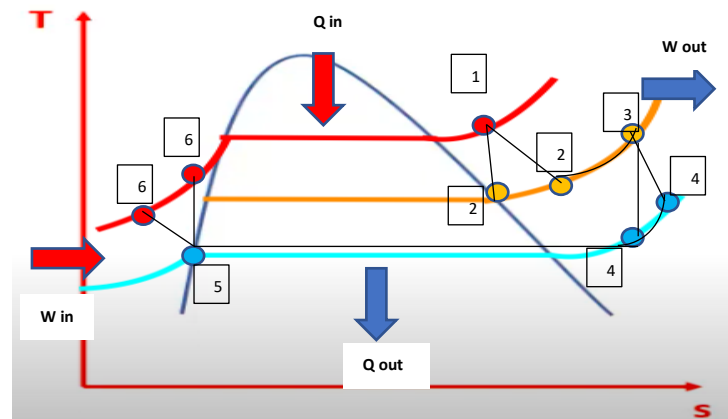
Gráfico 3: *Distribución de equipos del esquema termodinámico de la planta térmica.*



En este no se mencionan las calderas 1 y 2, debido a que están ubicadas de manera transversal a lo largo de los 5 pisos de *La Planta Térmica*, en los cuales se incluye el sistema de tuberías para el transporte de fluidos. Sin embargo, se indica para cada nivel, las temperaturas superficiales más altas, capturadas en cada conjunto de equipos.

De igual manera se presenta un diagrama T-s del ciclo termodinámico de la planta de forma global, contemplando las desviaciones energéticas por las eficiencias de producción de los equipos, para tener una idea de su tipo de producción hacia la compañía.

Gráfico 4: Diagrama T-s del ciclo termodinámico Rankine por recalentamiento de la planta térmica.



En donde el calor de entrada correspondería a las 2 calderas internas entre los 5 pisos de la planta y el calor de salida a los 2 condensadores ubicados en los niveles 1; El trabajo de entrada correspondería a las bombas centrífugas de alimentación del nivel 1 y el trabajo de salida a las 2 turbinas con cámaras de alta y baja presión, ubicadas en los niveles 2.

Pese al transcurso de los años y las condiciones de trabajo, La *Planta Térmica* ha conseguido mantenerse en condiciones de producción y rendimiento aceptables, gracias a los múltiples mantenimientos preventivos y correctivos implementados. Sin embargo, durante los meses de julio y agosto del 2020-2, se notificaron múltiples emisividades de calor en zonas donde no deberían presentarse incrementos de temperatura, según técnicos de *La Planta Térmica*.

Por lo tanto, el área de ingeniería de La *Planta Térmica* propuso el desarrollo de un plan de mantenimiento que validara y redujera la cantidad de energía perdida, en las fugas de calor detectadas, mediante estrategias de corrección efectivas y rentables dentro del presupuesto mensual en La Compañía; dicho plan se presenta en las siguientes secciones del documento.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LA PLANTA TÉRMICA.

2.1. REGISTRO TERMOGRÁFICO DE LA PLANTA TÉRMICA.

Como primer paso dentro del plan de reducción de pérdidas se requirió cuantificarlas por medio de un estudio termográfico que detectara la ubicación de los puntos de fuga y la temperatura a la que se encontraban.

2.1.1. Metodología Y Equipos:

Para obtener los registros termográficos de La Planta Térmica, fue necesario plantear una ruta de trabajo que recopilara los termogramas de manera organizada y estructurada para su respectivo análisis.

Con base a la distribución de equipos presentada en la tabla 1, se realizó un recorrido por los 5 niveles junto a un técnico de la *Planta Térmica*, identificando las superficies con posibles fugas de calor. Debido a que la gran mayoría de superficies en los niveles no contaba con ningún tipo de aislante o con uno muy deteriorado, se optó por hacer un registro general de la planta, que abarcaran la totalidad de superficies en cada nivel.

La cámara termográfica empleada fue el modelo de bolsillo: Fluke PTi120, con la cual se realizó un total de 230 tomas, de las cuales 28 fueron descartadas, siguiendo las recomendaciones del fabricante para realizar estudios de termografía, al presentar termogramas borrosos, radiación directa del sol sobre las superficies y distancias de captura inadecuadas [32].

La captura de los registros termográficos se realizó junto a un técnico de instrumentación termográfica de la Planta Térmica, de acuerdo a las instrucciones presentadas en la norma ASTM E1934 para la examinación de equipos eléctricos y mecánicos en termografía infrarroja. Según las especificaciones técnicas de la cámara termográfica Fluke y las recomendaciones en la normativa, se hizo la captura de los registros a una distancia aproximada de 3 metros de la superficie para prevenir riesgos por quemaduras, con una separación entre termogramas de 2.8 metros aproximadamente, de acuerdo con el ángulo horizontal de captura que tiene la cámara en su campo de visión (50°).

Para la lectura de los registros, se configuró con antelación los rangos de temperatura de la cámara para enfocar el espectro de emisión detectado. Se omitieron puntos de temperatura menores a la temperatura ambiente en cada piso y/o menores a la temperatura mínima arrojada por la cámara termográfica, para evitar la saturación del espectro infrarrojo en la imagen y detectar con más claridad los orígenes de puntos de fuga.

Debido al rango de medida que tiene la cámara Fluke PTi120, los puntos que excedían los 150 °C no podían ser capturados y eran denotados bajo el display de la cámara con una temperatura de 155.9 °C. Para solucionarlo, fue necesario realizar una segunda medición de estos puntos, empleando una pistola térmica RIDGID IR-200 con capacidad de lectura de hasta 1200 °C, la cual permitió obtener mayor exactitud en los datos registrados de estos puntos.

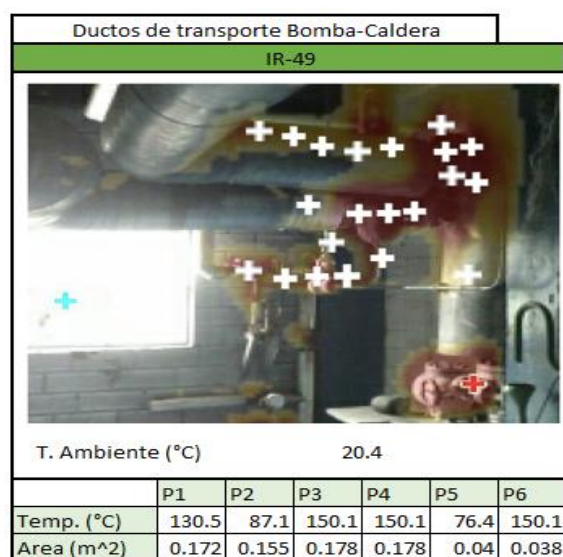
2.1.2. Técnica De Análisis Termográfico:

Para entender la manera en cómo se realizó el análisis de cada uno de los termogramas capturados, se presenta a continuación el método de lectura utilizado con la cámara Fluke PTi120, como guía de los múltiples registros capturados en el proceso.

Cabe aclarar que, para todos los análisis de los termogramas, las temperaturas registradas son las mismas temperaturas superficiales de cada equipo o instalación en la Planta Térmica, esto dado a que la planta solo contaba con un 10% de aislamiento en su totalidad, el cual se encontraba en mal estado por su antigüedad. Por tal motivo todas las lecturas térmicas son referentes como temperaturas superficiales dentro de las ecuaciones de transferencia de calor.

La figura 3, muestra un termograma típico obtenido por la cámara Fluke PTi120, en donde se identifican varios puntos de lectura sobre la superficie, resaltando de ellos: El puntero rojo, el cual indica el punto de temperatura más alto (T. Max), el puntero azul indica el punto de temperatura más bajo (T. Min) y los punteros blancos, empleados para marcar varios registros de temperatura sobre un mismo espectro infrarrojo.

Gráfico 5: Técnica de termografía-Punteros múltiples por sección de área (Superficie de tubería, Piso 1).



El uso de múltiples punteros sobre los espectros infrarrojos propagados, permite registrar un mayor conjunto de temperaturas sobre una misma sección de área, para obtener una temperatura promedio alrededor del mismo patrón de radiación capturado por la cámara.

En este termograma, se contabilizaron 22 registros termográficos, agrupados en 6 emisiones de calor presentes en los ductos de transporte de fluido Bomba-Caldera. Dado al tamaño del espectro infrarrojo en cada sección, se ajustaron las cantidades de punteros pertinentes para cubrir el área de fuga y obtener una temperatura promedio adecuada.

Al ser esta la técnica con mayor precisión, en cuanto a los valores promedio de temperatura según el área de radiación, se implementó dentro del análisis termográfico para la obtención de las pérdidas de calor de cada termograma capturado en la planta térmica.

La totalidad de los registros termográficos se encuentran en el anexo A, indicando para cada termograma su registro y ubicación en planta.

2.2. CUANTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LA PLANTA TÉRMICA.

El cálculo de las pérdidas de calor para los 202 registros termográficos fue realizado mediante las ecuaciones de transferencia de calor por convección y radiación en una base de datos realizada en el programa Microsoft Excel, para *La Compañía*. Como se explicó en el capítulo anterior, el evalúo del gasto económico que genera *La Planta Térmica* fue desarrollado en toneladas de carbón, según las pérdidas de calor registradas.

Cabe aclarar que para los tramos de turbinas-condensadores, no serán consideradas las pérdidas de calor dentro del análisis termográfico, dado a que son tramos que siempre deben permanecer a altas temperaturas por su función de remover el calor del ciclo termodinámico de la Planta y no deben ser disipados, para mantener los porcentajes de la eficiencia térmica de la planta estables.

Para el desarrollo de esta base se especificó para cada registro: ubicación en la planta, temperatura, área de radiación según el punto de lectura, emisividad del material y el coeficiente de transferencia correspondiente, para obtener la cantidad específica de calor transferido. Sin embargo, fue necesario ajustar previamente los datos a consideraciones teóricas en las ecuaciones 2 y 3 de transferencia y en la ecuación 11 del gasto económico, para asegurar la mayor coherencia en el valor de los resultados.

2.2.1. Consideraciones Teóricas Según Las Variables Presentes En La Planta.

A continuación, se presentan las consideraciones tomadas en cuenta para las ecuaciones de transferencia y gasto económico:

- Los mecanismos simultáneos de transferencia de calor considerados para el análisis fueron convección y radiación. La transferencia de calor por conducción no será considerada dentro del análisis de pérdidas de calor, dado a que se están considerando solo los mecanismos de transferencia de calor que existen entre las superficies de los sistemas y el aire circundante dentro de la *Planta Térmica* [36].
- La transferencia de calor entre las superficies calientes con el aire de la planta se desarrolla por convección natural, al no haber sistemas de ventilación o aire acondicionado que alteren el flujo de aire en los niveles de la planta. Por tal motivo se debe formular una ecuación del movimiento del fluido para determinar el factor de convección de este mecanismo y no asumirlo según tablas.
- El valor de emisividad utilizado para las superficies de la planta fue equivalente al material de hoja de aluminio, según el listado de emisividades de algunos materiales a 300 K, con un valor de 0,07 [37]. Esto fue considerado dado al recubrimiento de pintura ECP-100 (Aluminio líquido) que poseen las superficies de los sistemas y máquinas de La Planta Térmica, con propiedades de acabado brillantes semejantes a las del material seleccionado.
- Las lecturas de temperaturas obtenidas anteriormente, junto a la temperatura ambiente de cada nivel se expresaron en Kelvin.
- Se asumen condiciones estacionarias de operación, al no tener variación en la lectura de las temperaturas.
- El valor del poder calorífico del carbón se ajustó según el documento de recopilación especializada de carbón, realizado por la UPME, para la zona de recolección de carbón utilizada por los proveedores de *La Planta Térmica*: Cundinamarca. De este modo y según el rango de poder calorífico de 26.35-31.30 MJ/Kg para la zona [38], se asume un valor de 29.94 MJ/Kg según indicación de proveedores.

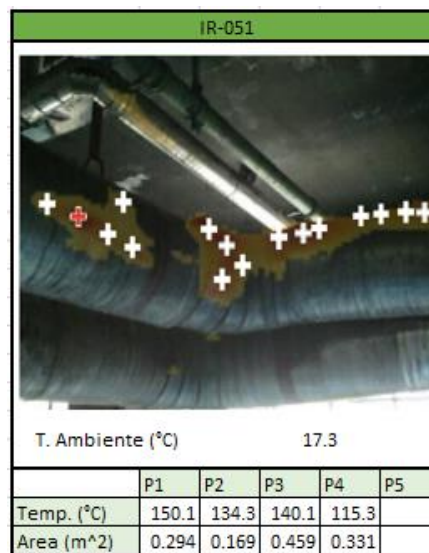
2.2.2. Metodología De Cuantificación De Pérdidas De Calor.

Para realizar los cálculos de las pérdidas por convección y radiación de calor, se utilizaron las ecuaciones 2 y 3 para cada lectura termográfica de los niveles de *La Planta Térmica*, teniendo en cuenta las consideraciones teóricas mencionadas y el cálculo del coeficiente

de convección. A continuación, se realizará una demostración de cómo se calculó las pérdidas de calor en los registros termográficos.

- Ejemplo 1 Caldera 2-Tuberías bomba/caldera (piso 1):

Gráfico 6: Registro termográfico tubería Bomba/Caldera 2-Punteros múltiples por sección de área.



En este registro se hace la lectura de 4 puntos de fuga mediante la técnica #3 de termografía-Punteros múltiples por sección de área. Una vez tomadas las temperaturas promedio de cada punto y la temperatura ambiente, se consignaron las áreas correspondientes al tamaño de la fuga y se procedió a realizar los cálculos de pérdidas de calor.

Antes de calcular las pérdidas por convección y radiación, fue necesario calcular el coeficiente de convección para los 4 puntos. Siguiendo la explicación del subcapítulo anterior, es necesario conocer las propiedades del aire, a la temperatura de capa superior que se encuentran los puntos. Mediante la tabla A-15 de *propiedades del aire a la presión de 1 atm* de Çengel [41] se tienen los siguientes datos:

Tabla 1: *Propiedades del aire a 1 atm para los registros en Fig 5.*

T. Superficial	T. Ambiente
150.1	17.3
Temperatura de capa	
83.7	
$\beta (1/T.capa \text{ sup})$	
0.002803476	
Conductividad térmica	
0.02953	
Viscosidad Cinemática	
0.00002097	
Numero de Prandtl	
0.7154	

T. Superficial	T. Ambiente
134.3	17.3
Temperatura de capa	
75.8	
$\beta (1/T.capa \text{ sup})$	
0.002866972	
Conductividad térmica	
0.02953	
Viscosidad Cinemática	
0.00002097	
Numero de Prandtl	
0.7154	

T. Superficial	T. Ambiente
140.1	17.3
Temperatura de capa	
78.7	
$\beta (1/T.capa \text{ sup})$	
0.002843332	
Conductividad térmica	
0.02953	
Viscosidad Cinemática	
0.00002097	
Numero de Prandtl	
0.7154	

T. Superficial	T. Ambiente
115.3	17.3
Temperatura de capa	
66.3	
$\beta (1/T.capa \text{ sup})$	
0.002947244	
Conductividad térmica	
0.02881	
Viscosidad Cinemática	
0.00001995	
Numero de Prandtl	
0.7177	

Los datos consignados hacen referencia a las propiedades correspondientes de las temperaturas de aire. Debido a extensa cantidad de registros, se aproximaron los valores de temperatura de capa, con los más cercanos a los tabulados. En este caso, con los datos de 80°C y 70°.

Conociendo las propiedades, es posible emplear la ecuación 5 para calcular el número de Rayleigh, remplazando las variables por los términos conocidos y calculando desde el área de cada punto, la longitud característica. De modo que se obtendría para el primer registro de temperatura la siguiente ecuación:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr$$

$$Ra_L = \frac{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.002803476 \text{ K}^{-1})(150.1-17.3)k (0.5422 \text{ m})^3}{\left(0.00002097 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)^2} * (0.7154)$$

$$Ra_L = 9.470972764 * 10^8$$

Una vez calculado el número de Rayleigh se puede determinar el número de Nusselt de la convección natural a partir de la ecuación 7 como:

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 (9.4709 * 10^8)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.7154} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu = 715.5429$$

Conociendo el número de Nusselt, la conductividad térmica y la longitud característica de la superficie, es posible calcular el coeficiente de convección, reemplazando en la ecuación 8 de la siguiente manera:

$$\frac{Nu*k}{L_c} = h \rightarrow \frac{(715.5429)*(0.02953 \frac{W}{m \cdot K})}{(0.5422 \text{ m})} = 6.58 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

De mismo modo, aplicando la metodología para calcular el factor de convección en las otras temperaturas, se obtiene que:

Tabla 2: Coeficientes de convección *para los registros en Fig 5*

T. Superficial	T. Ambiente
150.1	17.3
Temperatura de capa	
83.7	
Coeficiente de Convección	
6.5868	

T. Superficial	T. Ambiente
134.3	17.3
Temperatura de capa	
75.8	
Coeficiente de Convección	
6.523184691	

T. Superficial	T. Ambiente
140.1	17.3
Temperatura de capa	
78.7	
Coeficiente de Convección	
6.355167921	

T. Superficial	T. Ambiente
115.3	17.3
Temperatura de capa	
66.3	
Coeficiente de Convección	
6.109460082	

Al ser calculado los factores de convección para cada punto de temperatura, es posible determinar la transferencia de calor por convección y sumarla junto a la transferencia de calor por radiación para conocer las pérdidas de calor en el termograma. En el anexo B se encuentran las bases de datos para la resolución total de pérdidas de calor.

Empleando las ecuaciones 2 y 3 en los datos obtenidos del primer registro, se tiene que:

$$Q_{conv} = h * A * (T_s - T_a)$$

$$Q_{conv} = (6.58 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} * 0.294 m^2$$

$$* ((150.1 ^\circ C + 273.15) - (273.15 + 17.3 ^\circ C))$$

$$Q_{conv} = 256.9042 W$$

$$Q_{Rad} = \varepsilon * \sigma * A * T_s^4$$

$$Q_{Rad} = (0.07) * (5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}) * (0.294 m^2)$$

$$* ((150.1 ^\circ C + 273.15)^4 - (17.3 ^\circ C + 273.15)^4)$$

$$Q_{Rad} = 29.62 W$$

De mismo, aplicando la metodología para obtener el calor total transferido por convección y radiación para el termograma, se tiene que:

Tabla 3: Pérdidas de calor para los registros en Fig 5

T. Superficial	T. Ambiente
150.1	17.3
Temperatura de capa	
83.7	
Coeficiente de Convección	
6.5868	
Q Convección	
256.9042	
Q Radiación	
29.624	

T. Superficial	T. Ambiente
134.3	17.3
Temperatura de capa	
75.8	
Coeficiente de Convección	
6.523184691	
Q Convección	
129.225	
Q Radiación	
13.979	

T. Superficial	T. Ambiente
140.1	17.3
Temperatura de capa	
78.7	
Coeficiente de Convección	
6.355167921	
Q Convección	
357.91902	
Q Radiación	
40.84	

T. Superficial	T. Ambiente
115.3	17.3
Temperatura de capa	
66.3	
Coeficiente de Convección	
6.109460082	
Q Convección	
197.9913	
Q Radiación	
20.935	

La transferencia de calor en la totalidad del termograma correspondería a 1047.41 W, 942.039 W de convección y 105.378 W de radiación respectivamente.

De esta manera, se demuestra la metodología para cuantificar las pérdidas de calor registradas en los termogramas de la *Planta Térmica*, la cual sirvió de referencia para construir la base de datos que calculara el total de pérdidas para los 202 registros obtenidos.

Se especifica que una vez calculados los coeficientes de convección para cada termograma, se asume un valor promedio de $6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ para la totalidad de los 202 registros, notando un cumplimiento según el valor recomendado en el estándar 55-2020 de ASHRAE sobre las condiciones térmicas ambientales para la ocupación humana en edificios y demás instalaciones, según las estadísticas de velocidad y temperatura del aire regulares en las instalaciones [42].

2.2.3. Metodología De Cuantificación De Gasto Económico.

Como se mencionó en el capítulo 1, para conocer el impacto económico que representan las pérdidas de calor en el presupuesto de *La Planta Térmica*, es necesario determinar el gasto económico producido, de acuerdo con la cantidad de carbón equivalente al calor perdido y su precio en el mercado.

Continuando con el ejemplo anterior, es posible realizar una demostración conociendo la magnitud de las pérdidas de calor en el termograma, de la siguiente manera:

$$T.C. = \frac{Q_{dotFig5}}{PCI} \quad (13)$$

Para el cálculo de las toneladas de carbón, fue necesario considerar las pérdidas de calor obtenidas en el transcurso de un día, reemplazando las variables por los valores previamente obtenidos:

$$T.C. = \frac{\left(1.04741 \frac{KJ}{s}\right)}{29.94 \frac{MJ}{Kg}}$$

Empleando los factores de conversión adecuados, se obtiene que:

$$T.C. = \frac{\left(0.00104741 \frac{MJ}{s} * 86400 \frac{s}{día}\right)}{\left(29.94 \frac{MJ}{Kg}\right) * 1000 \frac{Kg}{Ton}}$$

$$T.C. = 0.003022 \frac{Ton. Carbón}{día}$$

Una vez calculado el consumo de toneladas de carbón que representan las pérdidas de calor, fue posible determinar el gasto económico y el impacto que estas representan en el presupuesto mensual de mantenimiento. Empleando la ecuación 12 y reemplazando en los datos obtenidos, se tiene que:

$$G.E. = \frac{Q_{dotFig5}}{PCI} * P_{Combust.} \quad (12)$$

$$G.E. = \left(0.003022 \frac{Ton. Carbón}{día} * 31 \frac{día}{mes}\right) * \left(\$ 206,000 \frac{Pesos}{Ton. Carbón}\right)$$

$$G.E. = \$ 19,298.49 \frac{Pesos}{mes}$$

Con base a la metodología de cuantificación de pérdidas de calor y de gasto económico, es posible aplicar la formulación de las ecuaciones en la base de datos para conocer la magnitud del total de pérdidas de calor en los 5 niveles de la planta térmica y el gasto económico que representan para la compañía.

2.3. Plan De Reducción De Pérdidas De Calor.

Una vez calculado el gasto económico que pueden generar las pérdidas de calor de *La Planta Térmica*, se evaluaron las posibles alternativas que podrían ser implementadas para el mantenimiento; entre ellas: La implementación de aislantes térmicos sobre las superficies de calor, para reducir las pérdidas energéticas generadas.

El reemplazar la maquinaria antigua por nuevos modelos o sustituir el sistema de tuberías por uno de mejor calidad, fueron alternativas que se descartaron al ser poco asequibles dentro del presupuesto de mantenimiento del área.

La decisión se tomó de manera conjunta entre coordinadores del área encargada, donde se sugirieron 3 tipos de materiales aislantes como alternativas en el plan de

mantenimiento. Se priorizó como características requeridas: la conductividad térmica, el punto de fusión y su precio por metro cuadrado en el mercado. La tabla 5 presenta los materiales considerados y sus propiedades técnicas.

Tabla 4: *Propiedades técnicas de materiales aislantes.*

<i>Propiedades</i>	<i>Material Aislante</i>		
	Manta refractaria alistra S (Fibra de vidrio)	Espuma rígida de Poliuretano	Aerogel
Conduc. Térmica (W/mK)	0.043	0.028	0.003
Punto de fusión (°C)	1760	120	1200
Densidad (g/cm3)	0.08	0.015	0.4-0.004
Vida útil (años)	10	50	10
Precio (COP/m2)	\$ 26.360	\$ 45.000	\$ 600.000

Los aislantes considerados en la implementación del aislamiento térmico fueron: La manta refractaria Alistra S, por su versatilidad de instalación y por su amplia utilidad en las otras áreas de la compañía; La espuma rígida de poliuretano, como un material aislante de gran adaptación y adherencia a todo tipo de superficie y material, con una prolongada vida útil [46]; Y el Aerogel, como un material de muy baja densidad y baja conductividad térmica, empleado recientemente en estudios de aislamiento en naves espaciales y aeronáutica espacial en la NASA [47].

Pese a la poca conductividad térmica que tiene el Aerogel o a la larga vida útil que posee la espuma de poliuretano y su versatilidad en uso sobre superficies, el material seleccionado por los coordinadores de área para su implementación en los aislamientos térmicos fue la manta refractaria Alistra s, por su elevado punto de fusión y su precio por metro cuadrado frente a los demás materiales, añadiendo la confiabilidad de este dentro de la compañía.

Como parte de los requerimientos de los coordinadores del área en la instalación del aislante térmico, se debe de incluir un recubrimiento protector para preservar la calidad de la manta refractaria en la planta. Para ello, se postula la implementación de láminas de acero Hot Rolled-A36 para cubrir las áreas de emisión de calor a las que va a estar instalada la manta refractaria, dado a su gran resistencia y alta elasticidad, así como su fácil soldabilidad a cualquier material [d]. De mismo modo, será agregada una capa de pintura reflectiva ECP-100 sobre las superficies de las láminas de acero Hot Rolled, con el objetivo de reducir las emisiones de calor restantes del conjunto de aislamiento térmico instalado.

En base al plan de reducción de pérdidas de calor planteado, se emplean las ecuaciones de transferencia de calor con base a las propiedades técnicas de los materiales aislantes, para cuantificar las pérdidas de calor generadas por los mismos puntos de fuga, una vez implementado los recubrimientos.

2.3.1. Consideraciones teóricas Para La Cuantificación De Reducción De Pérdidas.

Al igual que en la metodología de cuantificación anterior, fueron planteadas consideraciones teóricas que permitieron resolver las ecuaciones de transferencia de calor y gasto económico, en base a los 202 registros termográficos capturados y considerando las propiedades de transferencia de calor que poseen los materiales seleccionados para reducir las fugas térmicas presentes en la planta. De este modo, se plantean las siguientes consideraciones:

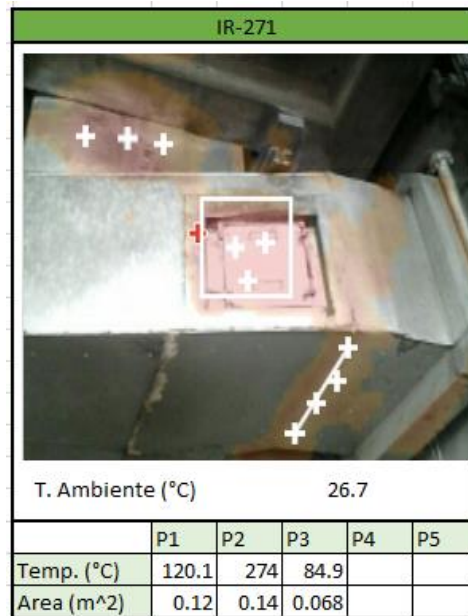
- Los mecanismos simultáneos de transferencia de calor considerados para el análisis fueron Convección y Radiación. Sin embargo, al emplear la emisividad de la pintura refractaria ECP-100, se redujo el porcentaje de radiación dentro del total de calor transferido en la superficie, a valores cercanos a 0, por lo que solamente será considerada la convección como único mecanismo de transferencia.
- No se asume la temperatura externa de la superficie del aislamiento térmico, para cuantificar las nuevas pérdidas de calor. Debe ser calculada mediante un análisis de condición de convección de frontera.
- Se aclara que dentro de los cálculos se emplearon los valores de conductividad térmica suministrados por los proveedores de los materiales, tanto para la manta refractaria como la lámina Hot Rolled, sus valores fueron de $0.043 \frac{W}{m^{\circ}K}$ y $237 \frac{W}{m^{\circ}K}$ respectivamente.
- Las lecturas de temperaturas obtenidas anteriormente, junto con la temperatura ambiente fueron expresadas en grados Kelvin.
- Se asumieron condiciones estacionarias de operación, al no tener variación en la lectura de las temperaturas.

2.3.2. Metodología De Cuantificación De Reducción De Pérdidas De Calor.

De igual manera que en la metodología para la la cuantificación de perdidas, se realizará una demostración de cómo fueron realizados los cálculos para determinar la reduccion de las pérdidas de calor, con la implementación de aislantes térmicos.

- Ejemplo 2 Caldera 2-Ductos de recalentamiento de caldera (nivel 4):

Gráfico 7: Registro termográfico ductos de recalentamiento Caldera 2-Punteros múltiples por sección de área.



En este termograma se muestra la lectura de 3 puntos de fuga, analizados mediante la técnica de punteros múltiples. Conociendo las temperaturas a las que se encuentran, sus áreas de pérdida y su temperatura ambiente, se calculó primeramente los valores de la resistencia del aislante y de la lámina, para el cálculo de la temperatura externa, considerando una conducción de calor en coordenadas rectangulares. Para el primer registro, se desarrollaron los siguientes cálculos:

$$\frac{(x_{\text{aislante}})}{K_{\text{aislante}} * A} + \frac{(x_{\text{lamina}})}{K_{\text{lamina}} * A} = R_{\text{total}} \quad (10)$$

$$\frac{(0.05 \text{ m})}{\left(0.043 \frac{W}{m^{\circ}K}\right) * (0.12 \text{ m}^2)} + \frac{(0.00635 \text{ m})}{\left(237 \frac{W}{m^{\circ}K}\right) * (0.12 \text{ m}^2)} = R_{\text{total}}$$

$$R_{\text{total}} = 9.690 \frac{^{\circ}K}{W}$$

Una vez calculado la resistencia térmica total del punto, se procede a remplazar el valor en la ecuación 11 para poder calcular la temperatura externa a la que se puede encontrar:

$$\frac{\left(\frac{(273.15 + 120.1)^{\circ}K}{9.690 \frac{^{\circ}K}{W}} + \left(6 \frac{W}{m^2^{\circ}K} \right) * (0.12 m^2) * (273.15 + 26.7)^{\circ}K \right)}{\left(\left(6 \frac{W}{m^2^{\circ}K} \right) * (0.12 m^2) + \frac{1}{9.690 \frac{^{\circ}K}{W}} \right)} = T_a$$

$$T_a = 311.55^{\circ}K = 38.40^{\circ}C$$

Esta sería la temperatura que el punto capturado puede alcanzar, una vez implementado el aislamiento térmico. Con esta, es posible medir las pérdidas de calor por convección de ese punto mediante la ecuación 2 de convección, de la siguiente manera:

$$Q_{total} = h * A * (T_s - T_a)$$

$$Q_{total} = \left(6 \frac{W}{m^2^{\circ}K} \right) * (0.12 m^2) * (38.4 - 26.7)^{\circ}K$$

$$Q_{total} = 6.99033 W$$

Con base a esta misma metodología, es posible resolver las pérdidas de calor que hay en las otras 2 lecturas del termograma, obteniendo como temperaturas externas: 57.70 °C y 33.99 °C, según el orden de los registros y con pérdidas de calor de 24.36 W y 2.16 W respectivamente.

2.3.3. Metodología De Cuantificación Del Gasto Económico con Reducción De Pérdidas De Calor.

Los cálculos empleados para la cuantificación del gasto económico con la implementación de aislantes termicos, para reducir las pérdidas de calor, son los mismos empleados durante la cuantificación de pérdidas de calor y gasto económico de la planta, mediante la ecuación 12 y 13. Continuando con los resultados de la reducción de pérdidas de calor con una totalidad de 33.51 W, se plantea la cuantificación de toneladas de carbón y gasto económico de la siguiente manera:

$$T.C. = \frac{\left(0.03351 \frac{KJ}{s}\right)}{29.94 \frac{MJ}{Kg}}$$

Empleando los factores de conversión adecuados, se obtiene que:

$$T.C. = \frac{\left(0.00003351 \frac{MJ}{s} * 86400 \frac{s}{día}\right)}{\left(29.94 \frac{MJ}{Kg}\right) * 1000 \frac{Kg}{Ton}}$$

$$T.C. = 0.0000967022 \frac{Ton. Carbón}{día}$$

Una vez calculado el consumo de toneladas de carbón que representan las pérdidas de calor, fue posible determinar el gasto económico y el impacto que estas representan en el presupuesto mensual de mantenimiento. Empleando la ecuación 11 y reemplazando en los datos obtenidos, se tiene que:

$$G.E. = \frac{Q_{dotFig5}}{PCI} * P_{Combust.} \quad (12)$$

$$G.E. = \left(0.0000967022 \frac{Ton. Carbón}{día} * 31 \frac{día}{mes}\right) * \left(\$ 206,000 \frac{Pesos}{Ton. Carbón}\right)$$

$$G.E. = \$ 617.54 \frac{Pesos}{mes}$$

A partir de este punto y entendiendo la metodología aplicada para la cuantificación y reducción de pérdidas de calor en la planta térmica, es posible valorar los gastos económicos que representan el total de fugas de calor en la planta con y sin aislante térmico, y determinar un plan de mantenimiento eficiente y rentable dentro del presupuesto de mantenimiento del área.

3. RESULTADOS

3.1. RESULTADOS ANALÍTICOS

3.1.1. Construcción De Base De Datos Para La Cuantificación Total De Pérdidas De Calor.

Entendiendo la forma en cómo se calcularon las pérdidas de calor para cada registro de temperatura que capturaron los termogramas, fue posible crear una base de datos en la que se tabularan los datos de temperatura y área que se obtenían con los termogramas y formular las ecuaciones de transferencia y coeficiente de convektividad para obtener las pérdidas de calor de cada registro.

Las bases de datos cuentan con los valores de temperatura superficial, temperatura ambiente y área del espectro infrarrojo para cada registro, así como las constantes de emisividad del material y el coeficiente de Stefan Boltzmann para tabular las pérdidas de calor por radiación y el coeficiente de convección para tabular las pérdidas de calor por convección.

En el anexo C se encuentran las bases de datos para la resolución total de pérdidas de calor.

Los resultados obtenidos en las bases de datos permitieron determinar que las pérdidas energéticas producidas por la convección y radiación de calor equivalen a un total aproximado de 172.273 KW, distribuidos entre las calderas 1 y 2 como 88.051 KW y 84.221 KW respectivamente, con un área de emisividad de 169 m² para 202 puntos de lectura en la planta térmica.

La cuantificación de pérdidas de calor y área de emisividad para cada nivel de la *Planta Térmica* está distribuida en la tabla 5 de la siguiente manera:

Tabla 5: Distribución de pérdidas de calor en la Planta Térmica.

Total de pérdidas de calor en Planta (KW)				
172.273				
Niveles	Pérdidas en equipos e instalaciones de la caldera 1 (KW)	Area total de emisividad en caldera 1 (m ²)	Pérdidas en equipos e instalaciones de la caldera 2 (KW)	Area total de emisividad en caldera 2 (m ²)
	88.052	97.898	84.221	70.899
1	1.696697983	2.6075	2.078783765	3.2813
2	4.206756361	5.2547	2.314013819	3.90992
3	3.602094506	4.4742	3.638820636	5.1016
4	0.90718112	1.2338	1.456578711	2.62
5	77.63885133	84.3278	74.73313092	55.9863

De acuerdo con los resultados tabulados, se identificó que las pérdidas de calor en los niveles 5 de cada conjunto de equipos, representan el 88% del total de pérdidas en toda la planta. Esto es explicado en los registros termográficos, al capturar termogramas de los sistemas de extracción de humo de las calderas (tales como las chimeneas, extractores y ventiladores adaptados) a temperaturas por encima de los 200 C y sin ningún tipo de aislante o recubrimiento sobre sus superficies calientes.

De igual manera se identificó que el área de emisión de calor en los niveles 5, representaron el 83% del total de emisión calor de la planta, denotando amplios puntos de fuga en este nivel, producto del deterioro de las maquinas por su antigüedad en la planta.

Por tal motivo se concluye que el implementar un plan de mantenimiento correctivo únicamente en el nivel 5, lograría reducir las pérdidas de calor en un 88% de su totalidad. No obstante, se recomienda la implementación de este en todos los niveles de la planta para que pueda garantizar no solo la reducción de pérdidas de calor sino también la seguridad laboral de los técnicos y operarios de la planta, expuestos a estas superficies durante sus turnos de trabajo.

3.1.2. Construcción de Base De Datos Para La Reducción De Pérdidas De Calor.

Una vez contemplados los materiales que se usarían para el mantenimiento correctivo, es posible calcular un resultado aproximado de la reducción de pérdidas de calor presentes en *La Planta Térmica* y comparar la cantidad de energía que se ahorraría con el implemento del aislamiento térmico.

Para la construcción de la base de datos con las pérdidas de calor, implementando el aislamiento térmico, se dejó el mismo formato pasado, considerando los mismos registros de temperatura obtenidos, el coeficiente de convección natural calculado, las mismas áreas, pero removiendo la contabilización de pérdidas por radiación, dado a los análisis teóricos previamente planteados en la reducción de pérdidas. También, fueron incluidos los cálculos para determinar el valor de resistencia del aislante y la lámina, para el cálculo de la temperatura externa del aislante, considerando las coordenadas rectangulares o cilíndricas de la superficie.

En la sección de anexos C se encuentran especificados todos los datos, con su respectiva formulación y siguiendo la secuencia de los termogramas capturados y adjuntados en el anexo A.

Los resultados obtenidos en las bases de datos permitieron determinar que las pérdidas energéticas producidas por la convección de calor, equivalen a un total de 17.765 KW, distribuidos entre las calderas 1 y 2 como 9.46 KW y 8.29 KW respectivamente, indicando una reducción de calor de 154.50 KW en toda la planta, según los resultados obtenidos en la cuantificación de pérdidas inicial (88.052 KW y 84.22 KW, respectivamente).

La cuantificación de pérdidas de calor y el porcentaje de recuperación para cada nivel de la planta está distribuido en la tabla 6 de la siguiente forma:

Tabla 6: Distribución de pérdidas de calor con implementación de aislantes en la Planta.

Total de pérdidas de calor en Planta (KW)				
17.765				
Niveles	Pérdidas en equipos e instalaciones de la caldera 1 (KW)	Porcentaje de recuperación según las pérdidas sin aislante	Pérdidas en equipos e instalaciones de la caldera 2 (KW)	Porcentaje de recuperación según las pérdidas sin aislante
	9.467	89.2	8.299	90.1
1	0.190442272	88.8	0.194774306	90.6
2	0.463128053	89.0	0.212091452	90.8
3	0.395870742	89.0	0.342334898	90.6
4	0.097665188	89.2	0.139282006	90.4
5	8.319766322	89.3	7.100136658	90.5

De acuerdo con los resultados calculados se analizó que la implementación de aislantes térmicos permitiría obtener una reducción de calor del 89.7%, según las pérdidas iniciales, en todos los niveles de la planta térmica. 5% más de reducción, que el implementar aislantes térmicos únicamente en el nivel 5.

De mismo modo, la implementación del aislamiento térmico en base a la manta refractaria Alistra S, la lámina Hot Rolled A-36 y la pintura ECP-100, garantizaría una reducción promedio de 69.78% de la temperatura superficial registrada.

Una vez calculado el valor total de las pérdidas de calor con la implementación de aislantes térmicos en *La Planta Térmica*, será posible estimar la reducción del impacto económico que representan dichas pérdidas, dentro del presupuesto mensual de mantenimiento del área.

3.2. RESULTADOS ECONÓMICOS

3.2.1. Gasto Económico En La Cuantificación Total De Pérdidas De Calor.

Como se mencionó en el capítulo 1, para conocer el impacto económico que representan las pérdidas de calor en el presupuesto de *La Planta Térmica*, es necesario determinar el gasto económico producido, de acuerdo con la cantidad de carbón equivalente al calor perdido y su precio en el mercado.

Conociendo el valor del total de pérdidas de calor en *La Planta Térmica*, fue posible determinar las pérdidas de calor en toneladas de carbón de la siguiente manera:

$$T.C. = \frac{Q_{dotTotal}}{PCI} \quad (13)$$

Para el cálculo de las toneladas de carbón, fue necesario considerar las pérdidas de calor obtenidas en el transcurso de un día, reemplazando las variables por los valores previamente obtenidos:

$$T.C. = \frac{\left(172.273 \frac{KJ}{s}\right)}{29.94 \frac{MJ}{Kg}}$$

Empleando los factores de conversión adecuados, se obtiene que:

$$T.C. = \frac{\left(0.172273 \frac{MJ}{s} * 86400 \frac{s}{día}\right)}{\left(29.94 \frac{MJ}{Kg}\right) * 1000 \frac{Kg}{Ton}}$$

4.

$$T.C. = 0.4979 \frac{Ton. Carbón}{día}$$

Las pérdidas de calor de las instalaciones de *La Planta Térmica*, representan un consumo de carbón equivalente a $0.4979 \frac{\text{Ton}}{\text{día}}$, según las lecturas termográficas realizadas y las consideraciones teóricas planteadas.

Una vez calculado el consumo de toneladas de carbón que representan las pérdidas de calor, fue posible determinar el gasto económico y el impacto que estas representan en el presupuesto mensual de mantenimiento.

$$G.E. = \frac{Q_{dot}^{Total}}{PCI} * P_{Combust.} \quad (12)$$

$$G.E. = \left(0.4979 \frac{\text{Ton. Carbón}}{\text{día}} * 31 \frac{\text{día}}{\text{mes}} \right) * \left(\$ 206,000 \frac{\text{Pesos}}{\text{Ton. Carbón}} \right)$$

$$G.E. = \$ 3'180,507.94 \frac{\text{Pesos}}{\text{mes}}$$

Las pérdidas de calor representan para la planta térmica un gasto económico mensual de \$3'180,507.94 de pesos, según las toneladas de carbón calculadas en los registros termográficos. En la tabla 8 se presenta el gasto económico para cada nivel en la planta térmica.

Tabla 7: Gasto económico evaluado por cada nivel de la Planta Térmica.

Gasto Económico en Planta Térmica		
Niveles	Gasto Económico según Ton. Carb C1	Gasto Económico según Ton. Carb C2
1	\$ 31.268	\$ 38.309
2	\$ 77.524	\$ 42.644
3	\$ 66.381	\$ 67.058
4	\$ 16.718	\$ 26.843
5	\$ 1.430.770	\$ 1.377.222

De acuerdo a los datos presentados se puede analizar que las altas pérdidas de calor registradas en los niveles 5 de los dos conjuntos de equipos de la *Planta Térmica*, las cuales representan el 88% del total de las pérdidas de calor, equivalen a un gasto económico de \$2'807.992 pesos mensuales para la planta. Así mismo, las pérdidas de calor en los otros 4 niveles solo representan un gasto de \$372.515 pesos mensuales.

Diariamente son suministradas 2 toneladas de carbón a cada caldera para suplir la demanda energética, lo que conlleva a un consumo mensual de 56 toneladas de carbón por caldera, representado en \$23'072,000 de pesos, mensualmente. Por tal motivo, el gasto económico por pérdidas representa aproximadamente un incremento del 14% en consumo de toneladas de carbón mensuales en la planta térmica.

3.2.2. Gasto Económico En La Reducción De Pérdidas De Calor.

Conociendo el valor de reducción energética que generan las pérdidas de calor, una vez implementado el aislamiento térmico, es posible determinar el gasto económico que estas representan y el ahorro de consumo según las toneladas de carbón reducidas.

De la misma manera como se realizó en el subcapítulo anterior, es posible determinar las toneladas de carbón perdidos y el gasto económico, considerando las nuevas pérdidas de calor obtenidas en el transcurso del día. Reemplazando las variables por los valores previamente obtenidos y empleando los factores de conversión adecuados, se obtiene que:

$$T.C. = \frac{\left(0.017765 \frac{MJ}{s} * 86400 \frac{s}{día}\right)}{\left(29.89 \frac{MJ}{Kg}\right) * 1000 \frac{Kg}{Ton}}$$

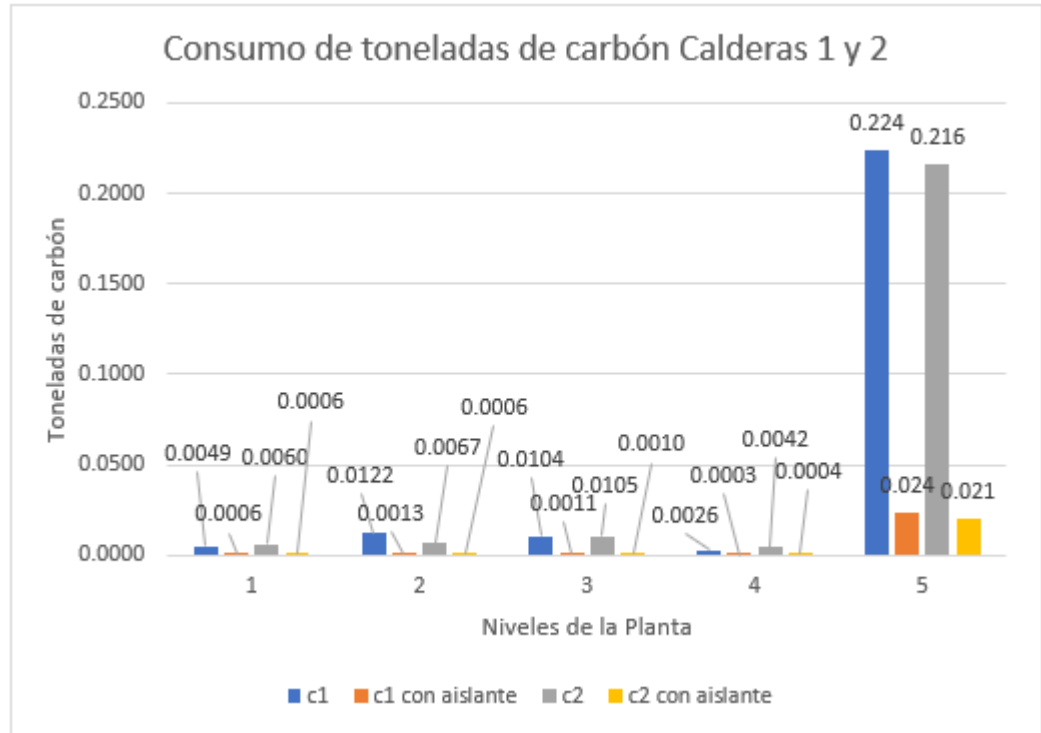
$$T.C. = 0.051351 \frac{Ton. Carbón}{día}$$

$$T.C. = \left(0.051351 \frac{Ton. Carbón}{día} * 31 \frac{día}{mes}\right) = 1.591 \frac{Ton. Carbón}{mes}$$

Las pérdidas de calor de las instalaciones de *La Planta Térmica* con la implementación del aislamiento térmico en los sistemas, representan un consumo de carbón equivalente a $1.591 \frac{Ton. Carbón}{mes}$ lo que significaría un ahorro mensual de 14 toneladas de carbón con respecto al sistema actual de *La Planta Térmica*.

La cantidad de consumo de carbón mensual para cada nivel de las calderas de *La Planta Térmica* es representada en la figura 7 según el consumo de carbón del sistema con y sin aislamiento térmico.

Gráfico 8: Toneladas de carbón-mes consumidas con y sin aplicación de aislamiento.



De igual manera, se evidencia que, con la implementación de los aislantes térmicos, el nivel 5 sigue representando el 88% del total de toneladas perdidas, para los sistemas con aislamiento y sin aislamiento. De modo que, el implementar aislantes térmicos solamente en el nivel 5 traería un ahorro en el consumo de carbón, de más del 80% del consumo actual.

Una vez calculadas las toneladas de carbón mensuales que generan las instalaciones de la planta con la implementación del aislamiento, es posible determinar el valor del gasto económico que representan, mediante la ecuación 4 de la siguiente manera:

$$G.E. = \left(1.591 \frac{\text{Ton. Carbón}}{\text{mes}} \right) * \left(\$ 206,000 \frac{\text{Pesos}}{\text{Ton. Carbón}} \right)$$

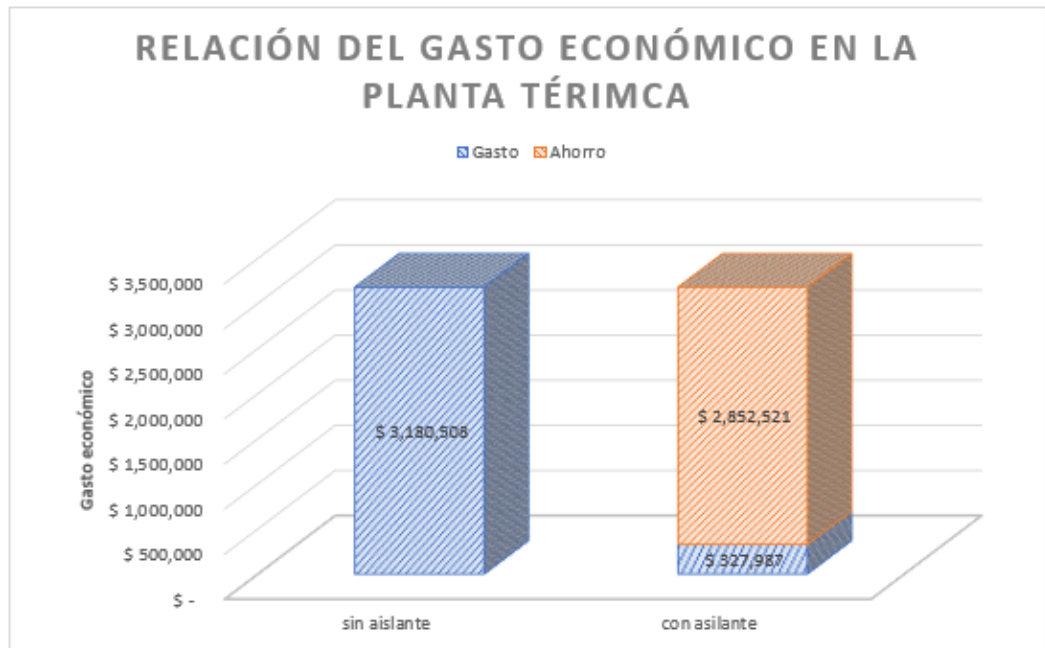
$$G.E. = \$ 327,987.08 \frac{\text{Pesos}}{\text{mes}}$$

Las pérdidas de calor con la implementación de aislamiento representan para la planta térmica un gasto económico mensual de \$ 327,987.08 pesos según la reducción de toneladas de carbón estimadas mediante la implementación de aislantes térmicos. Esto permitiría identificar que, según el consumo mensual de 56 toneladas de la planta, el gasto económico que representarían las pérdidas sería solamente el 2% del consumo

mensual en vez de un 14%, reduciendo a un 89% el consumo del gasto económico por las fugas de calor en la planta térmica.

La relación del gasto económico de los sistemas de la planta térmica con y sin aislamiento, están representados en la figura 8 de la siguiente manera:

Gráfico 9: *Relación del gasto económico mensual en la planta térmica.*



En la figura 9 se presenta el gasto económico en toda la planta térmica antes y después de la implementación de aislantes térmicos. En este, se puede concluir que la implementación del aislamiento implicaría un ahorro significativo de 2'852,521 pesos mensuales, equivalentes al 89% del gasto actual en pérdidas.

Una vez contemplados los gastos económicos que representan las pérdidas de calor y la recuperación económica que podría generar la implementación de aislantes térmicos, según los materiales seleccionados en el capítulo 2.3, es posible determinar los costos de implementación de los aislantes térmicos para la compañía y la rentabilidad que representan mediante la reducción de pérdidas, para determinar su viabilidad dentro de la planta térmica.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE AISLANTES Y REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE CALOR.

4.1. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO:

Para determinar los costos de implementación del plan de mantenimiento, fue necesario conocer primeramente la cantidad de material requerido para el aislamiento térmico de las superficies. Para ello, se usaron los datos consignados en el anexo B sobre el área superficial de los espectros infrarrojos en las instalaciones, siendo esta un total de 169 m² en toda la Planta Térmica.

Una vez determinada el área de recubrimiento, fue posible estimar la cantidad de manta térmica y lamina Hot Rolled necesaria. Considerando la reducción de material por los procesos de manufactura requeridos para su instalación, se empleó junto a los coordinadores de área, un factor de seguridad de 1.3, como garantía de recubrimiento de los 169 m² de fuga. De igual manera fue ajustado el mismo factor de seguridad para las cantidades de pintura ECP-100, considerando un área de recubrimiento de 218 m².

El costo de inversión cotizado para la implementación del mantenimiento correctivo en La Planta Térmica con los materiales y aislantes térmicos, se estimarían con proveedores de confianza de La Compañía y se adquirirían por la lista de precios de la tabla 9.

Tabla 8: Costo de inversión total del proyecto.

COSTO DE INVERSIÓN DE PROYECTO			
Item	Unidad	Precio Unitario	Precio
Lamina Hot Rolled A36 1/4-1.2 x 6 m (218 m ²).	36	\$ 1,193,667	\$ 42,972,000
Manta Refractaria Ceramica Alistra S (218 m ²).	5	\$ 1,149,281.60	\$ 5,746,408
Pintura ECP-100 (gal)	10	\$ 152,300	\$ 1,523,000
Suministro de personal soldador, equipos y auxiliar soldador	-	-	\$ 14,900,250
		Total	\$ 65,141,658

De acuerdo con la cotización presentada, el costo total de inversión de proyecto será de 65'141.658 pesos, con base a las cantidades de material requerido para el recubrimiento y reducción de fugas de calor.

El costo de la lámina Hot Rolled representa dentro del monto total de inversión el 66% de la compra, dado a las cantidades requeridas para abarcar los 218 m² y las dimensiones de lámina que los proveedores podían ofrecer, según los requisitos de selección de los coordinadores.

Los galones de pintura ECP-100 fueron escogidos por 10 unidades, para garantizar el recubrimiento aproximado de 20-25 m² por galón, según la recomendación del proveedor para su adecuado uso.

Todos los materiales para la implementación de este mantenimiento vendrán con el costo de manufactura por soldadura y corte de contratistas asociados a la compañía, con una duración de 30 días para su instalación, garantizando el recubrimiento de las fugas de calor y por ende una reducción de las pérdidas de calor.

4.2. RENTABILIDAD ECONÓMICA DE LA INVERSIÓN DEL MANTENIMIENTO:

Una vez calculado el gasto total que generan las pérdidas de calor en la planta térmica y el ahorro económico que generaría un plan de mantenimiento correctivo, fue posible determinar la rentabilidad económica y viabilidad del proyecto dentro de la compañía, para justificar su instalación dentro de la planta. Para ello, se emplearon indicadores tales como el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno, la Tasa Mínima Aceptable de Retorno y la Relación Beneficio-Costo.

Para implementar los indicadores dentro de los resultados del proyecto, fue necesario desarrollar una formulación de datos inicial, de acuerdo con el esquema económico requerido, en donde se garantiza una vida útil del proyecto de mínimo 10 años, bajo una inversión inicial de \$65.241.658 pesos y una tasa de interés del 18.45%. La tabla 10 presenta el listado de la formulación de datos empleados.

Tabla 9: *Formulación de datos de inversión iniciales-Indicadores económicos.*

Formulación de datos		
n=	10	Vida útil del proyecto
t=	0.1845	Tasa de interés
Io	\$ 65,241,658	Inversión inicial

La tasa de interés manejada en la formulación de datos de la tabla 10, hace referencia a la tasa mínima aceptable de retorno (TMAR), la cual considera el porcentaje de inflación de Colombia en sus últimos años y el porcentaje de riesgo de inversión adjudicado por la compañía. Esta tasa de interés permitirá calcular, de acuerdo con los diagramas de

flujo de ingresos y egresos, las estimaciones del valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), para conocer la viabilidad del proyecto dentro de la Compañía.

Para determinar el porcentaje de inflación fue necesario examinar los porcentajes anuales del país, en donde según los reportes oficiales del DANE, el porcentaje de inflación de Colombia para el 2020-2 fue de 1.61% y de aproximadamente 3% para los últimos 5 años, respectivamente [45].

El porcentaje de riesgo es el riesgo que asume la compañía ante la adquisición de la propuesta. Para este caso que es un proyecto de inversión empresarial, el riesgo torna valores entre el 10% y 15%. De este modo, se asumió un porcentaje de 15% como análisis al peor escenario para la compañía, a razón de obtener una recuperación de dinero más alta.

Con base a estos resultados, se determina la tasa interés del proyecto mediante el cálculo de la TMAR expresado en la ecuación 14 como:

$$\%TMAR = \% Inf.nal. + \% Riesgo + \left(\frac{\% Inf.nal.* \% Riesgo}{100} \right) \quad (14)$$

$$\%TMAR = 3\% + 15\% + \left(\frac{3\%*15\%}{100} \right)$$

$$\%TMAR = 18.45\%$$

Una vez calculado el %TMAR y la formulación inicial de datos, es posible determinar la viabilidad costo-beneficio del proyecto mediante el VPN y la TIR según el flujo de ingresos y egresos manejado en el proyecto.

Conociendo que el ahorro económico que representan las pérdidas de calor en toda la planta equivale a 2'852,521 pesos mensuales y asumiendo que, a través de los años, el precio de carbón se mantiene con un incremento relativamente estable del 5%, se considera el flujo efectivo neto del proyecto presentado en la tabla 11 como:

Tabla 10: *Flujo de efectivo neto de inversión – Ingresos vs Egresos.*

Flujo de Ingresos		Flujo de egresos	Flujo de efectivo Neto
Año	Valor	Valor	Valor
1	\$ 34,230,252	0	\$ 34,230,252
2	\$ 35,941,765	0	\$ 35,941,765
3	\$ 37,738,853	0	\$ 37,738,853
4	\$ 39,625,795	0	\$ 39,625,795
5	\$ 41,607,085	0	\$ 41,607,085
6	\$ 43,687,440	0	\$ 43,687,440
7	\$ 45,871,811	0	\$ 45,871,811
8	\$ 48,165,402	0	\$ 48,165,402
9	\$ 50,573,672	0	\$ 50,573,672
10	\$ 53,102,356	0	\$ 53,102,356
		TOTAL	\$ 430,544,431

Como se observa en la tabla 10, para un periodo de 10 años semejante a la vida útil de los materiales, el ahorro económico anual representado dentro del flujo de ingresos como 34'230,252 pesos, tiene un incremento del 5% según la variación mínima en el precio del carbón durante los 10 años. La lista de valores para el flujo de egresos se mantiene en 0, dado a que la empresa costea dichos gastos en mantenimiento y reparación, bajo presupuestos diferentes al de la inversión.

Por tal motivo, el flujo efectivo neto para los 10 años de duración del proyecto está evaluado como un ahorro de 430'544,431 pesos para la compañía, demostrando que si fuera efectuada la inversión de 65'141.658 pesos para la reducción de fugas de calor hoy, la compañía ahorraría un aproximado de 431 millones de pesos durante los próximos 10 años.

Una vez determinado el flujo efectivo neto del proyecto y el porcentaje de interés, es posible estimar el valor presente neto de la inversión y la tasa interna de retorno del proyecto.

Con una tasa de interés de 18.45%, una inversión inicial de \$65.241.658 pesos y un flujo efectivo de inversión semejante al presentado en la tabla 9, se plantea la estimación del VPN en la tabla 12. Los cálculos obtenidos fueron elaborados con las ecuaciones económicas del programa Excel de la siguiente manera:

Tabla 11: *Estimación del Valor presente neto (VPN).*

Estimación del Valor Presente Neto VPN	
Tasa de interés	0.1845
Valor de la inversión inicial	\$ 65,241,658
Flujo año 1	\$ 34,230,252
Flujo año 2	\$ 35,941,765
Flujo año 3	\$ 37,738,853
Flujo año 4	\$ 39,625,795
Flujo año 5	\$ 41,607,085
Flujo año 6	\$ 43,687,440
Flujo año 7	\$ 45,871,811
Flujo año 8	\$ 48,165,402
Flujo año 9	\$ 50,573,672
Flujo año 10	\$ 53,102,356
VNA	\$ 113,010,059

De acuerdo con la tasa de interés calculada, al valor de inversión inicial cotizado con los proveedores de la planta y al flujo de efectivo neto de la tabla 10, se tiene un valor presente neto de inversión de 113'010,059 pesos, que representa la cantidad de dinero que equivale el ahorro económico anual del mantenimiento, hoy, según el flujo de ahorro para 10 años y el valor de inversión inicial.

Como se puede evidenciar en la tabla 10, el flujo anual que tiene el ahorro económico del proyecto aumenta potencialmente al no tener ningún flujo de egresos presentes durante el periodo de 10 años, lo cual garantiza un resultado positivo en la inversión del mantenimiento, con una ganancia aproximada del 173% según los costes y ahorro de inversión.

No obstante, este indicador no es suficiente para garantizar la mayor rentabilidad de la inversión del mantenimiento. Por tal motivo, fue necesario calcular la tasa interna de retorno (TIR) como un segundo indicador que garantice la viabilidad de la inversión, bajo el mismo periodo de tiempo y flujo de efectivo.

El objetivo de la TIR es determinar si el porcentaje de inversión de un proyecto es lo suficientemente rentable de acuerdo a un periodo de tiempo determinado, siendo este el porcentaje de beneficio que tendrá por montos que no hayan sido retirados del proyecto. La tabla 13 presenta la distribución de datos para el cálculo de la TIR, considerando el flujo de efectivo a 10 años y el monto de inversión final. Los cálculos obtenidos fueron elaborados con las ecuaciones económicas del programa Excel.

Tabla 12: Estimación La tasa interna de retorno (TIR).

Calculo del TIR	
Valor de la inversión inicial	-\$ 65,241,658
Flujo año 1	\$ 34,230,252
Flujo año 2	\$ 35,941,765
Flujo año 3	\$ 37,738,853
Flujo año 4	\$ 39,625,795
Flujo año 5	\$ 41,607,085
Flujo año 6	\$ 43,687,440
Flujo año 7	\$ 45,871,811
Flujo año 8	\$ 48,165,402
Flujo año 9	\$ 50,573,672
Flujo año 10	\$ 53,102,356
TIR	56%

De acuerdo a los resultados obtenidos de la tabla 13, se puede evidenciar un porcentaje de TIR de 56% lo cual representa un indicador de rentabilidad al ser %TIR>%TMAR. De esta manera, se refleja que la estimación de 10 años para la inversión de 65'141.658 generaría una ganancia del 56% según el monto inicial.

Empleando los indicadores de VPN y TIR es posible determinar la viabilidad de la inversión dentro del presupuesto de la empresa. Sin embargo, es posible emplear el indicador de Beneficio/Costo, para garantizar aún más la rentabilidad de la inversión, según las características de entrada de efectivo en el flujo de efectivo neto.

El indicador Beneficio/Costo relaciona el total de la suma de ingresos y egresos del flujo de efectivo, bajo una tasa de interés (TMAR). Si la relación de beneficio-costo es superior a 1, significa que el proyecto es rentable, de lo contrario debe ser descartado al poseer mayores gastos dentro del flujo. Para este caso, al asumir que el flujo neto de efectivo no posee ningún egreso dado durante el flujo de inversión estimado, se considera solamente el monto de inversión inicial como parte del egreso requerido dentro del indicador. De este modo se tendría que:

$$B/C = \frac{\text{Sum.Ingresos}}{\text{Inversión inicial}} = \frac{178'251,717.17}{65'241,658} = 2.73 \quad (15)$$

Al ser favorables los cálculos del VPN, TIR y B/C, incluyendo la comparación monetaria de las pérdidas en toneladas de carbón mensuales y anuales seguidamente; La implementación del mantenimiento correctivo garantizará porcentajes de rentabilidad muy altos para el periodo presupuestado de 10 años, en donde se evidenciaría un retorno a la inversión a los 22 meses después de ser efectuada y garantizaría a partir del

mes 23, montos de ganancia por el ahorro generado, hasta cumplir los 120 meses, lo que equivale una ganancia de 279'547,058 pesos, según el monto de ahorro.

Por tal motivo se recomienda la implementación de aislantes térmicos como un mantenimiento correctivo para las fugas de calor presentes en la *Planta Térmica*, debido a que con la proyección de vida útil que tienen los aislantes y la reducción de pérdidas de calor que atribuyen a la planta, garantizarían un ahorro de 113'010,059 pesos al día de hoy, con una rentabilidad del 56%, mayor a la tasa de interés, y una ganancia extendida a los 10 años de duración del proyecto de 279'547,058 pesos.

5. PLAN DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO.

Para abordar las reparaciones y soluciones necesarias que requerirían las fugas de calor presentes en la planta termica, a través de un plan de mantenimiento, fue necesario proporcionar una guía general de proceso de acuerdo a los análisis técnico-económicos realizados, para especificar las acciones de corrección y control necesarias sobre las superficies de fuga de calor tratadas en el análisis. De este modo, se enlistarán a modo de instructivo, los procesos realizados el documento que darían paso a la disminución y control de fugas de calor en la planta térmica, mediante un plan de mantenimiento correctivo.

- **Identificación y registro de fallas:** En los meses de julio y agosto del 2020-2, se notificaron múltiples emisividades de calor en zonas donde no deberían presentarse incrementos de temperatura, añadiendo un incremento en el costo de combustible empleado en la planta térmica. Este hecho, redujo el desempeño y capacidades de máquinas y otras instalaciones de la planta, dado al mal estado de sus aislantes y recubrimientos térmicos; Añadiendo también el riesgo accidentes por quemaduras de calor a los que los trabajadores estaban expuestos.
- **Evaluación y diagnóstico:** Se realizó una evaluación detallada sobre las fugas de calor en la planta, mediante la cámara termográfica FLUKE PTi120 y la pistola térmica RIDGID IR-200, permitiendo calcular mediante termogramas de espectros infrarrojos, 202 puntos de fuga de calor con un área de emisión de calor de 169 m^2 , en toda la planta.
- **Priorización de tareas de mantenimiento:** Las fugas de calor detectadas permitieron calcular que la planta térmica pierde en promedio 172.273 KW , lo que equivale a 15 toneladas de carbón mensuales desperdiciadas por fugas de calor en toda la planta, siendo en el nivel 5 la zona de más alta aglomeración de fugas de calor, representando un 88% del total de toneladas de carbón desperdiciadas.
- **Desarrollo de soluciones:** Una vez identificada la causa raíz, se selecciona la implementación de aislantes térmicos como medida de reducción de las pérdidas de calor. Dicha implementación consiste en un recubrimiento de manta refractaria Alistra S, Lamina Hot Rolled A36 y Pintura ECP-100. Dicha configuración permitiría reducir las pérdidas de calor de la planta térmica a un 89% de su capacidad y con una duración de 10 años. Para garantizar el recubrimiento total de las superficies de calor, se emplea una tolerancia de

material de 1.3, previniendo la reducción de material durante su proceso de instalación.

- Programación y asignación de tareas: La adquisición del material se realizaría con proveedores de confianza de la planta y según la cantidad de material requerido, tendría un valor de 65'141.658 pesos. De aquí, el tiempo de implementación estaría estimado a 2 meses, siendo considerado 1 mes para la recolección del material y 1 mes de duración de la instalación de los aislantes, a manos de una contratación de personal externo para la instalación del proyecto (valor de instalación incluido en los costos del material).
- Seguimiento y verificación: Una vez completadas las tareas de mantenimiento, es necesario que se verifiquen las superficies con la implementación de aislamientos. De modo que las áreas recubiertas por aislantes, deberán ser re evaluadas mediante termografía infrarroja, una vez finalice la implementación del aislamiento para garantizar la reducción de la emisividad de calor en la planta.
- Registro y análisis de datos: Es necesario mantener un registro actualizado de todas las temperaturas de las superficies aisladas, incluyendo observaciones de funcionamiento, los detalles de falla y anomalías. Mediante la siguiente tabla se plantea un seguimiento en las rutinas de inspección de los aislantes, la cual debe hacerse en un periodo semestral, considerando para la semana de aplicación de la orden de mantenimiento, un monitoreo diario de 30 puntos de superficie respectivamente. Esto, con el objetivo de inspeccionar la calidad del aislamiento en el plazo máximo de vida útil de 10 años.

III. CONCLUSIONES.

- De acuerdo con los registros termográficos obtenidos en el capítulo 2, se evidenció que, para calcular el total de pérdidas de calor obtenidas en la *Planta Térmica*, fue necesario registrar un total de 202 lecturas de temperatura con un área de fuga de 168 m^2 , igual a una pérdida energética de 172.27 KW en toda la planta. Además, mediante el análisis de pérdidas de calor por niveles de la planta, se logró evaluar que las pérdidas registradas en el nivel 5 representaron al 88% del total de las mismas. Por tal motivo, se concluye que el solo implementar aislamiento térmico en el nivel 5, lograría reducir más del 80% de las fugas de calor en la planta y de igual manera seguiría presentando rentabilidad para la *Compañía*.
- Según el evalúo del gasto económico que representan las pérdidas de calor en la planta térmica, desarrollado en el capítulo 3, se logró determinar que estas equivalen a un gasto mensual de \$3'180,507.94 pesos en el presupuesto del área, de acuerdo a las 15 toneladas de carbón perdidas mensualmente. Por tal motivo se concluye que, de acuerdo al consumo mensual regular de 56 toneladas de carbón para las calderas, las fugas de calor representaron un incremento mensual del 14 % del consumo regular de carbón en la planta.
- Para poder reducir las pérdidas de calor y disminuir el gasto dentro del presupuesto mensual del área, se concluyó que la mejor alternativa sería la implementación de aislantes térmicos en los puntos de fuga de calor presentes. Siendo este plan la alternativa más rentable para la *Compañía* dado a que, con los cálculos implementados, conseguiría reducir las pérdidas de calor a un 90%. Además, considerando su vida útil de 10 años, esta implementación lograría obtener un retorno de la inversión a los 22 meses, generando un ahorro económico a la planta de 279'547,058 pesos, después del tiempo al retorno de inversión.

IV. ANEXOS.

Anexo A. Registros termográficos.

(El anexo A de registros termográficos se encuentra en el archivo anexo en Excel, denominado: 2195414-Registros termográficos, en las ventanas de Pump-Pipe Agua alimentar C1 y C2, Tanque Agua alimentar C1 y C2 y Registro T. Caldera 1 y 2).

Anexo B. Base de datos-Cuantificación del coeficiente de convección natural

(El anexo B de la base de datos para la cuantificación del coeficiente de convección natural se encuentra en el archivo anexo en Excel, denominado: 2195414 h convectivo, en las ventanas de h para caldera 1, h para caldera 2 y Demostración).

Anexo C. Base de datos-Cuantificación de pérdidas.

(El anexo C de la base de datos para la cuantificación de pérdidas se encuentra en el archivo anexo en Excel, denominado: 2195414-Base de Datos, en las ventanas de PC C1, PC C2, PC C1 aislante, PC C2 Aislante, Perdidas y recuperación de carb, Cuantificación PC niveles, Cuantificación PC aisl niv y costo de inversión).

V. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Viegas G; Walsh C; Barros M. (2016). *Qualitative and quantitative evaluation of alternative thermal insulation. The case of family-based farming*. Santiago, CH.:SciElo. Recuperado de: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/995>.
- [2] ISOVER Saint-Gobain. (2018). *Eficiencia Energética en la Industria Cómo ahorrar energía a través del Aislamiento Industrial*. Madrid, ESP.:ISOVER Saint-Gobain. Recuperado de: <https://www.isover.es/documentacion/eficiencia-energetica-en-la-industria-como-ahorrar-energia-traves-del-aislamiento>.
- [3] Twenergy. (2019). *El aislamiento térmico, una de las claves del ahorro energético*. EUR.:Twenergy. Recuperado de: <https://twenergy.com/eficiencia-energetica/consejos-sobre-ahorro-de-energia/el-aislamiento-termico-una-de-las-claves-del-ahorro-energetico-1416/>.
- [4] ISOTools. (2011). *Sistemas de Gestión Ambiental y Energía-ISO 50001*. ISOTOOLS Excellence. Recuperado de <https://www.isotools.us/normas/medio-ambiente/iso-50001/>
- [5] UPME. (2001). *Marco normatividad ley 697 de 2001*. UPME. Recuperado de: <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/Ley%20697.PDF>
- [6] CORPOEMA. (2014). *Determinación y priorización de alternativas de eficiencia energética para los subsectores manufactureros códigos ciu 19 a 31 en Colombia a partir de la caracterización del consumo energético para sus diferentes procesos, usos y equipos de uso final*. Bogotá, COL. UPME. Recuperado de: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/DeterminacionEficiencia/Informe_Final_Volumen_2.pdf
- [7] MINISTRO DE TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL. (1979). *Resolución 2400 de 1979* (pp. 76-77) Bogotá, COL.: MINISTERIO DE TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL. Recuperado de: <http://www.ilo.org/dyn/travail/docs/1509/industrial%20safety%20statute.pdf>.
- [8] Çengel, Y; Boles M., (2012). *Termodinámica. 7ª Edición*. Madrid, ESP. McGraw-Hill.
- [9] Palomo C. (2017). *AISLANTES TÉRMICOS. CRITERIOS DE SELECCIÓN POR REQUISITOS ENERGÉTICOS*. Madrid, ESP. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: http://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Marta.pdf

[10] Fluke Corporation. (2020). *¿Qué es la termografía infrarroja?* Washington, USA. FLUKE ORG. Recuperado de: <https://www.fluke.com/es-co/informacion/mejores-practicas/aspectos-basicos-de-las-mediciones/termografia/que-es-la-termografia-infrarroja>

[11] Çengel, Y; Ghajar, A. (2011). Mecanismos de transferencia de calor. *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones* (pp. 17-19, 25-26, 27,29). Madrid, ESP. McGraw-Hill.

[12] Renovetec. (2020). *¿Qué es un plan de mantenimiento?* Madrid, ESP. El Plan de Mantenimiento.com. Recuperado de: <http://www.elplandemantenimiento.com/index.php/que-es-un-plan-de-mantenimiento>

[13] *¿Qué es la rentabilidad económica?* (2021). CEUPE Magazine. Recuperado de: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-rentabilidad-economica.html>

[14] UNET. (2005). *Fenómenos de Transporte*. Táchira, VEN. Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET). Recuperado de: http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-75.htm

[15] Recubrimientos y Aislantes Térmicos S.A. de C.V. (2011). *Los aislantes térmicos (aislamientos térmicos) en la industria*. [Archivo PDF]. https://crm.ratsa.com/storage/2018/February/week3/803_RATSA-los-aislantes-termicos-ene-2011.pdf

[16] Fundación Endesa. (2021). *Central térmica convencional*. Endesa Fundación. Recuperado de: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-electricas-convencionales/a201908-central-termica-convencional>

[17] Arias Quispe, R. J. (2003). *Análisis del sistema de distribución de vapor en un ingenio azucarero* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica Del Litoral]. Repositorio – Dspace.

[18] ISOVER. (2021). *Aislamiento Térmico Para Industria*. ISOVER SAINT-GOBAIN. (ESP). Recuperado de: <https://www.isover-aislamiento-tecnico.es/industria/aplicaciones/aislamiento-termico-industria>

[19] JUNTA DE ANDALUCÍA. (2007). Capítulo II: EMISIONES DE LAS PLANTAS INDUSTRIALES. *Inventario de Emisiones a la atmósfera en Andalucía* (pp. 4-5). ESP. Recuperado de: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Calidad_Ambienta

[/calidad aire/Inventario emisiones atmosfera 2003/inventario emisiones 2005/capitulo 2.pdf](#)

[20] EMERSON-Process Management. (2016). *Utilizando la automatización para mejorar el rendimiento térmico de plantas*. Shakopee-Minnesota, USA. EMERSON. Recuperado de: <https://www.emerson.com/documents/automation/informe-t%E9cnico-utilizando-la-automatizaci%F3n-para-mejorar-el-rendimiento-t%E9rmico-de-plantas-rosemount-es-es-178354.pdf>

[21] Guzmán-Gonzales, Y. (2020). *Riesgos y peligros laborales en termoeléctricas: una revisión de la literatura de 2007 a 2017*. COL. Salud UIS. Recuperado de: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasaluduis/article/view/10231>

[22] IDAE. (2007). *Comentarios al reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE-2007)*. Madrid, ESP. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE). Recuperado de: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540 Comentarios RITE GT7 07 2 200d691.pdf

[23] S&P. (2018). *Materiales aislantes térmicos: Tipos y aplicaciones*. Barcelona, ESP. S&P Sistemas de ventilación, S.L.U. Recuperado de: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/materiales-aislantes-termicos/>

[24] Asociación de Fabricantes Españoles de LanasyMinerales Aislantes (AFELMA).(2019). *¿Qué es la lana mineral?*. Madrid, ESP. AFELMA.org. Recuperado de: <https://afelma.org/que-es-lana-mineral/>

[25] Galiana M. (2017). *Tecnología de la arquitectura: aislamiento térmico de última generación, AEROGEL*. ESP. Arquitecturayempresa. Recuperado de: <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/tecnologia-de-la-arquitectura-aislamiento-termico-de-ultima-generacion-aerogel>

[26] AERSUS. (2014). *La tecnología del futuro para el aislamiento térmico en el espacio*. UK. Comisión Europea. Recuperado de: <https://cordis.europa.eu/article/id/150540-the-future-of-thermal-insulation-in-space/es>

[27] ASTM INTERNATIONAL. (2021). *Standard Terminology for Nondestructive Examinations* (2021 Edition). Pennsylvania, EU. ASTM INTERNATIONAL. Recuperado de: <https://www.astm.org/Standards/E1316.htm>

[28] Grupo SINELEC. (2021). *¿Qué es una cámara termográfica y cómo funciona?*. Barcelona, ESP. SINELEC. Recuperado de: <https://gruposinelec.com/que-es-una-camara-termografica-y-como-funciona/>

[29] Insatec Electrónica. *Termografía activa*. ESP. Avio. Recuperado de: https://www.camarastermograficas.es/termografia_activa.html

[30] INDUNOVA. *Información sobre termografía*. ESP. INDUNOVA-INDUSTRIAL MAINTENANCE SOLUTIONS. Recuperado de: <https://indunova.es/informacion-termografia/>

[31] SI Termografía infrarroja. *Termografía infrarroja en el mantenimiento industrial*. SI Termografía industrial. Recuperado de: <https://www.termografia.com/paginas/aplicaciones/mantenimiento.htm>

[32] Testo SE (2017). *Termografía, guía de bolsillo*. Testo SE & Co. KGaA. Recuperado de: <https://static-int.testo.com/media/fa/0e/49bd6f50d6cb/Pocket-Guide-Thermography-ES.pdf>

[33] Comercializar S.A.E.S.P. (2004). *La inspección termográfica en el mantenimiento predictivo de una planta*. Canales sectoriales interempresas. Recuperado de: <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/8677-La-inspeccion-termografica-en-el-mantenimiento-predictivo-de-una-planta.html>

[34] Neita, L. Peña, E. (2011). *Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo* (pp. 79-84). Floridablanca, COL. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA. Recuperado de: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1561/digital_20999.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[35] Electric Equipment Maintenance. (2021). *NFPA 70E y Termografía Infrarroja*. RELIABILITYWEB.COM. Recuperado de: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/nfpa-70e-y-termografia-infrarroja/>

[36] Çengel Yunus, A y Ghajar Afshin, J. (2010). Introducción y conceptos básicos. *Transferencia de calor y Masa fundamentos y aplicaciones* (Pág 30). Mc Graw Hill

- [37] Çengel Yunus, A y Ghajar Afshin, J. (2010). Introducción y conceptos básicos. *Transferencia de calor y Masa fundamentos y aplicaciones* (Pág 28). Mc Graw Hill
- [38] Carrizosa Pulido, N. (2012). *La cadena del Carbon*. Upme.gov.co. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf
- [39] Çengel Yunus, A y Ghajar Afshin, J. (2010). Convección Natural. *Transferencia de calor y Masa fundamentos y aplicaciones* (Pág 527-529). Mc Graw Hill
- [40] Çengel Yunus, A y Ghajar Afshin, J. (2010). Convección Natural. *Transferencia de calor y Masa fundamentos y aplicaciones*. Tabla 9-1. (Pág 528). Mc Graw Hill.
- [41] Çengel Yunus, A y Ghajar Afshin, J. (2010). Apéndice 1, Tabla A-15. *Transferencia de calor y Masa fundamentos y aplicaciones* (Pág 884) Mc Graw Hill
- [42] ANSI/ASHRAE. (2022). Standard 55-2020. Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy. Ashrae and the American National Standards Institute.
- [43] Barrera Rodríguez, C., & Forero Castañeda, J. (2020). *RESOLUCIÓN No. 000137 de 2020*. UPME. Recuperado de: https://www1.upme.gov.co/Normatividad/137_2020.pdf
- [44] Çengel Yunus, A y Ghajar Afshin, J. (2010). Ecuación de la Conducción de calor. *Transferencia de calor y Masa fundamentos y aplicaciones* (Pág 82-83) Mc Graw Hill
- [45] DANE; (2021). *Comunicado de prensa-Indice de precios al consumidor*. DANE Información Para Todos. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ipc/cp_ipc_dic20.pdf
- [46] Gonzales, M. Rivada, M. (2016). *Caracterización de la espuma rígida de poliuretano expandido como impermeabilizable de cubiertas*. EMPAI (Empresa de proyectos de arquitectura e ingeniería).
- [47] Pline, A. Dumbar, B. Nasa. (2007). *Aerogel*. NASA. Recuperado de: <https://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/aerogel.html>
- [d] ACEROMAFE. (2021). *Acero A36: 3 Propiedades Que Lo Posicionan Como Material Premium Para Instalaciones Industriales*. Recuperado de: <https://www.aceromafe.com/acero-a36-propiedades/#:~:text=Como%20parte%20de%20sus%20principales,soldabilidad%20sin%20imperfecciones%20ni%20defectos>.