



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA**  
**“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”**  
**VICE-RECTORADO BARQUISIMETO**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL  
ESPESOR ÓPTIMO-ECONÓMICO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO EN  
SISTEMAS DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS.**

**AUTORES: Br. Michell Polanco**

**Br. Óscar Morales**

**TUTOR: Ing. Luis Hernández**

**COTUTOR: Ing. MSc. Julián Birollo**

**Barquisimeto, junio 2025**



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA**  
**“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”**  
**VICE-RECTORADO BARQUISIMETO**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL  
ESPESOR ÓPTIMO-ECONÓMICO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO EN  
SISTEMAS DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS.**

**AUTORES: Michell Polanco**

**Óscar Morales**

**TUTOR: Ing. Luis Hernández**

**COTUTOR: Ing. MSc. Julián Birollo**

**Barquisimeto, junio 2025**

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>13</b>
<b>EL PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>Planteamiento del Problema .....</b>	<b>13</b>
<b>Objetivos de la Investigación .....</b>	<b>16</b>
<b>Objetivo General.....</b>	<b>16</b>
<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>16</b>
<b>Alcances y Limitaciones .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>19</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>19</b>
<b>Antecedentes de la Investigación.....</b>	<b>19</b>
<b>Bases Teóricas .....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>30</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>30</b>
<b>Metodología de la investigación .....</b>	<b>30</b>
<b>Naturaleza de la Investigación .....</b>	<b>30</b>
<b>Tipo de Investigación .....</b>	<b>31</b>
<b>Diseño de la Investigación.....</b>	<b>32</b>
<b>Población y Muestra.....</b>	<b>32</b>
<b>Fases de la Investigación.....</b>	<b>33</b>
<b>Fase I: Diagnóstico .....</b>	<b>33</b>
<b>Fuentes Primarias .....</b>	<b>34</b>
<b>Entrevista No Estructurada.....</b>	<b>34</b>
<b>Fuentes Secundarias.....</b>	<b>35</b>
<b>Fase II: Diseño .....</b>	<b>36</b>
<b>Fase III: Factibilidad.....</b>	<b>38</b>

Factibilidad Técnica .....	38
Factibilidad Operativa .....	38
Factibilidad Económica .....	39
Fase IV: Implementación.....	40
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>42</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>42</b>
Fase I: Diagnóstico .....	42
Fuentes Primarias .....	42
Fuentes Secundarias.....	46
Fase II: Diseño .....	50
Fase III: Factibilidad.....	64
Factibilidad Operativa .....	64
Factibilidad Económica .....	66
Factibilidad Técnica.....	67
Fase IV: Implementación.....	69
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
Conclusiones .....	85
Recomendaciones .....	85
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA**  
**“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”**  
**VICE-RECTORADO BARQUISIMETO**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL  
ESPESOR ÓPTIMO-ECONÓMICO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO EN  
SISTEMAS DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS.**

**AUTORES: Michell Polanco**

**Óscar Morales**

**TUTOR: Ing. Luis Hernández**

**COTUTOR: Ing. MSc. Julián Birollo**

**RESUMEN**

La presente investigación fue desarrollada para implementar un modelo matemático y una herramienta computacional que permita calcular de manera precisa y eficiente el espesor de aislamiento que minimiza el costo total a lo largo de la vida útil del sistema de transporte o almacenamiento de fluidos térmicos. Para ello, se formuló un modelo termoeconómico que integra los principios de transferencia de calor por conducción y convección para tres geometrías principales: paredes planas, cilindros y esferas.. La implementación del modelo se materializó en una aplicación web interactiva. El backend, desarrollado en Python utilizando el framework Flask, empleando librerías como SymPy para la resolución simbólica y SciPy (con el método de Brentq) para la solución numérica de las ecuaciones de optimización. El frontend, construido con HTML, CSS y JavaScript, proporciona una interfaz de usuario intuitiva que facilita la entrada de parámetros termodinámicos y económicos, la visualización clara de los resultados y la generación de gráficos interactivos que ilustran el balance entre costos de inversión y pérdidas energéticas.

**Palabras clave:** Aislamiento térmico, Espesor óptimo, Optimización económica, Transferencia de calor, Aplicación web, Eficiencia energética.



U  
N  
E  
X  
P  
O

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA

“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”

VICE-RECTORADO BARQUISIMETO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



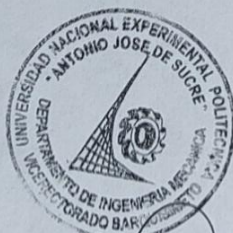
### ACTA DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, miembros del jurado evaluador designados por la coordinación de trabajo especial del departamento de ingeniería mecánica del vice rectorado de Barquisimeto, de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” para examinar el trabajo especial titulado **“IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL ESPESOR ÓPTIMO-ECONÓMICO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS”**, desarrollado por los bachilleres Michell Alejandra Polanco Villabona, cédula de identidad N° 28.517.247 y Óscar Ricardo Morales Pernalet, cédula de identidad N° 29.604.926, expedientes 20182-0250 y 20182-0208 respectivamente; como requisito para aprobar la asignatura Trabajo Especial II (IM-4123), hacen constar que los mencionados bachilleres obtuvieron la calificación de Nueve puntos en la escala vigente del 1 (uno) al 9 (nueve).

Barquisimeto a los 25 días del mes de Junio del 2025.

Jurado: Dr. José Meléndez

C.I: 9.540.334



Co-Tutor: Ing. MSc. Luis Birollo

C.I: 3.863.311

Tutor: Ing. Luis Hernández

C.I: 20.867.605

## **Agradecimientos**

Primero agradecer a mis padres, Yajaira y Oscar Lenin, por brindarme el apoyo económico, nunca colocar trabas si de mis estudios se trataran y mostrarme como se ve el trabajo duro para llevar una familia a flote, sin ustedes no sería nada de lo que soy ahora.

A mis abuelos Claudio y Carmen por mostrarme cómo se siente el amor, que tus bienes materiales no son importantes para educar y enseñar, ustedes son mis dos pilares, todo por lo que me esfuerzo lo hago pensando en ustedes y jamás dejaré de agradecerles.

Al resto de mi familia que han estado apoyándome de cierta manera en esta carrera, en especial a mis tías Ingrid, Yensi, María Alejandra, Marianella y Marianny, también a mis abuelos Mireya y Oscar. Muchas gracias por aportar de manera positiva en mi camino.

A mi tío Clay, que me enseñó lo que significa ganarse las cosas, por enseñarme y darme la confianza de aprender no solo en el mundo automotriz sino en todo lo que hemos podido vivir juntos, aunque me equivocara siempre sentí la buena intención al comunicarte conmigo para corregir y seguir. Lo mucho que me has enseñado me ha servido y sé que en un futuro también lo hará. Todo eso te lo debo a ti.

A mi pareja Alexaida por estar apoyándome de todas las maneras posibles, espero poder seguir avanzando contigo a mi lado.

A mi compañera en este trabajo Michell, que más que eso te convertiste en mi mejor amiga con días enteros intentando estudiar o simplemente hablando de cualquier tema que terminaba en risas. Por otro lado, a mi amigo Ben por ayudar en este trabajo sin esperar nada cambio, por siempre querer enseñarme todo lo que sabes. Deseo y estoy seguro que llegarás muy lejos.

A los miembros del Club de Tenis de Mesa, en especial a Carlos Guevara, Carlos Valiño, Danielker, William y Fedoroswsky. También a Angélica, Isolda, Aaron y Zhamir que gracias a la especialidad los pude conocer y a Natali que conocí en los primeros semestres. A todos ustedes gracias por hacer mejores los días dentro de la universidad.

*Oscar Morales*

### **Dedicatoria.**

Claudio y Carmen, que sé que siempre me han querido verme en este punto y gracias a Dios los tengo aún conmigo para que puedan observarme lograr hacer esto que es para ustedes.

A mi hermano Oscar José, aunque sé que a veces no entiendes lo que hago por ti todo es para que seas mejor que yo.

*Oscar Morales*



## **Agradecimientos**

A cada uno de los que me acompañaron, dentro y fuera, pero a lo largo de toda esta etapa.

A mis mamás, que la combinación de su amor es parte de lo que me hace ser lo que soy. A María, por dármele todo sin pedir nada, por siempre poder, por enseñarme y educarme, por darme tu amor de madre sin ninguna obligación ni condición. A mi mamá Nancy, por ser la primera a quien llamé mamá, porque tu amor de abuela va más allá, por siempre estar, por siempre ser. A mi mamá Charley, por enseñarme que los sacrificios también son una muestra de amor, a pesar de todo tu amor siempre me ha llegado, siempre está y estará en mí. Gracias, con mucho amor, por cada acción, cada palabra, cada momento.

A mi familia, cada uno de los que conforma a los Villabona Majano. Gracias por cada reunión, muestra de unión o de ese particular amor, comenzando por Cristóbal y sus extrañas maneras de mostrar su amor, pero siempre con apoyo, siempre escuchando, siempre intentando estar cerca de ti y darte un poco de lo que le faltó y nos faltó, gracias. A Crystel, por ser mi hermana en toda la extensión de la palabra, desde las peleas hasta el amor. A mis tíos Yhoa y Jholdric, que estuvieron desde el primer momento y supieron quererme y enseñármelo cada uno en su lenguaje. A mi tía Carmen, gracias por ser un complemento con María, por todo lo que haces. A mis tíos los majanos, y mis primo Lola y Roger, cada uno por su presencia y compartir. A mis hermanos por ser un impulso diario para lograrlo, negra, negro, gemelas, gabo, beru, nami, noah y elian, son cada uno un motor sin saberlo.

Al Club de Tennis de Mesa, que te une con quienes no sabes que te sumarán y harán todos más grato. Gracias por cada conversación, dentro y fuera de Club, por ser cada uno parte de lo grande que te queda al terminar la universidad, que te hace quererla un poco más. Desde Fedoroswsky, hasta las mascotas del Club, William, Danielker, Andrés, Guevara, Valiño, Terry, Renzo; Angélica e Isolda, mis compañeras en cosas que no hace falta detallar. Al Club y a cada uno, gracias.

A los amigos que te deja la universidad, gracias por cada compañía y enseñanza, Francelys, Juan, Gabriel, Daniela y Raquel.

A Óscar, por ser mi compañero de especialidad, de trabajo y de charlas, por ser mi mejor amigo y por confiar.

A ti, gracias por enseñarme que los miedos se pueden hacer pequeños creando bonitos recuerdos. Gracias por lo mucho que hemos aprendido juntos, por tu compañía, dedicación

y amor. Gracias por tu ayuda en este trabajo, espero que juntos podamos aprender, crear y ser siempre más.

*Michell Polanco*

## **DEDICATORIA**

Para ti, que ya no estás aquí para verlo, que ya no me acompañas, pero parte de mí es gracias a ti. Por ti, apodado “Papá”, gracias por ganarte el nombre, por enseñármelo, te queda pequeño con todo el amor que me dejaste, tu amor de abuelo sin reproches. Dedicado a ti por lo que me dejaste, por todo lo que no pude entregarte, dedicado a cada domingo, cada palabra y cada acción, cada momento lleno de amor. Gracias por ser, gracias por estar, gracias por marcarme, gracias por ser un recordatorio de todo lo grande, te amaré siempre, gracias por siempre estar y gracias siempre por ser, Bafi.

*Michell Polanco*

## **Introducción**

Los procesos de transporte y almacenamiento de fluidos constituyen pilares fundamentales en diversas industrias, ya que garantizan que tanto las materias primas como los productos finales mantengan sus propiedades físicas y químicas durante su desplazamiento y almacenamiento. Esto es especialmente crucial en sectores donde el control de la temperatura influye directamente en la calidad, seguridad y eficiencia de los procesos productivos que, al ser sensibles a las variaciones de temperatura, requieren condiciones de conservación específicas.

En este contexto, la transferencia de calor constituye un aspecto crucial, ya que interviene en el mantenimiento de las condiciones térmicas a lo largo de todas las operaciones. Es aquí, donde resaltan los sistemas de aislamiento los cuales son diseñados para minimizar la pérdida de energía, ya que estos permiten preservar la temperatura deseada, garantizando que los fluidos mantengan sus propiedades durante su desplazamiento y almacenamiento. Este trabajo se enfoca en optimizar el espesor del aislamiento térmico, buscando una solución que equilibre el rendimiento técnico y la eficiencia económica, extendiendo su aplicabilidad a diversas industrias. Para alcanzar este objetivo, se ha desarrollado un modelo matemático que permite cuantificar las pérdidas de calor y optimizar el aislamiento en función de parámetros técnicos y financieros. La implementación de este modelo se realizará a través de una App, lo que facilitará la simulación de distintos escenarios, validación de cálculos y la evaluación de la viabilidad de la solución propuesta.

La estructura de esta investigación se organiza de la siguiente manera, el Capítulo I plantea el problema central, justifica su relevancia y establece los objetivos específicos, así como los alcances y limitaciones del estudio. El Capítulo II expone el marco teórico y los antecedentes relevantes a la transferencia de calor y los sistemas de aislamiento. El Capítulo III describe el marco metodológico, detallando el enfoque, las fases del estudio y las herramientas computacionales utilizadas. Posteriormente, el Capítulo IV presenta el análisis de los resultados obtenidos, abarcando el diagnóstico inicial, el diseño detallado del modelo matemático y la implementación de la herramienta. Finalmente, el Capítulo V recopila las conclusiones clave y las recomendaciones derivadas del estudio.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **Planteamiento del Problema**

Desde tiempos inmemoriales, la historia de la humanidad ha estado marcada por el uso de herramientas, lo que le ha permitido controlar y modelar los fenómenos de su entorno. Esta capacidad ha dado lugar a una sociedad profundamente dependiente de la tecnología que ha desarrollado. Sin embargo, esta evolución tecnológica ha creado un ciclo en el que cada avance requiere mayor energía, mientras que ese aumento en el consumo energético impulsa nuevos desarrollos. Como resultado, la humanidad se ha vuelto cada vez más dependiente de sus propias invenciones.

En la actualidad, la demanda energética global sigue creciendo a medida que el desarrollo tecnológico y la expansión de las actividades industriales se tornan esenciales para la sociedad moderna. Este incremento no solo responde a las necesidades de producción en sectores como la manufactura, la minería y la agroindustria, sino también al consumo de las ciudades, donde el transporte, las edificaciones y los sistemas de climatización requieren enormes cantidades de energía. No obstante, esta elevada demanda enfrenta serias limitaciones, ya que gran parte de la energía sigue dependiendo de combustibles fósiles, cuya escasez y alto impacto ambiental plantean desafíos críticos para el futuro.

Ante este panorama, surge la necesidad de emplear los recursos energéticos de manera más eficiente, no solo para garantizar la sostenibilidad del sistema, sino también para mantener la rentabilidad de las operaciones y conseguir ganancias. Parte esencial de este esfuerzo incluye controlar las pérdidas energéticas ocasionadas por la pérdida de calor, y por ende la energía que se ha usado en el proceso, por la transferencia de calor en los sistemas de análisis hacia el medio ambiente.

Bien es sabido que la transferencia de calor está presente en numerosos procesos industriales esenciales, como las calderas de generación de vapor, los intercambiadores de calor, los sistemas de refrigeración y climatización, entre otros. Dichos procesos, fundamentales para la operación de diversas industrias, suelen depender de la quema de combustibles como

petróleo, gas natural, carbón o biocombustibles sólidos. Sin embargo, este enfoque implica un costo económico significativo, tanto por la adquisición de los combustibles como por su impacto ambiental, reducir estos gastos y mitigar los efectos negativos asociados requiere optimizar el consumo de estos. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-009-ENER-2014 (2014), La implementación de sistemas de aislamiento térmico permite reducir significativamente las pérdidas energéticas en los procesos industriales, contribuyendo al ahorro económico y al cumplimiento de normativas ambientales.

Es así como, controlar el consumo de combustible es un desafío crítico que puede abordarse de dos maneras principales. La primera consiste en reducir el flujo de combustible utilizado, lo que inevitablemente impacta la producción y limita la capacidad operativa de los sistemas. La segunda, un control más eficiente de las pérdidas energéticas derivadas de la transferencia de calor en estos sistemas, ya que las pérdidas térmicas no controladas representan un desperdicio directo de energía y recursos económicos. Este último ocurre al hacer uso de aislamiento térmico, cuyas propiedades han demostrado ser clave para optimizar la eficiencia de los procesos industriales. Por ello, numerosos investigadores y especialistas han dedicado esfuerzos al desarrollo de métodos precisos para calcular el espesor ideal del aislamiento térmico, buscando no solo reducir las pérdidas energéticas, sino también optimizar los costos asociados a la instalación, el mantenimiento y la operación a largo plazo.

En el trabajo de Zaki y Al-Turki (2018), se investigaron métodos para optimizar el espesor del aislamiento térmico en sistemas de tuberías. Su enfoque incluyó el uso del modelo de Hook y Jeeves para determinar el espesor óptimo del aislamiento, teniendo en cuenta materiales compuestos con características y precios variables, aplicados específicamente a una red de tuberías en una refinería de petróleo. Este análisis permitió lograr reducciones significativas en costos al integrar restricciones y requerimientos de seguridad en la selección del aislamiento térmico.

A pesar de los avances en esta área, muchos sistemas industriales aún no cuentan con herramientas prácticas y precisas que permitan optimizar estos cálculos, lo que limita su capacidad para implementar soluciones eficientes y sostenibles. Por tanto, surge la necesidad de desarrollar modelos que no solo consideren los aspectos térmicos y físicos del aislamiento, sino también los factores económicos y el impacto ambiental asociados.

Es así como, surgen las siguientes interrogantes:

- ¿Qué variables y relaciones físicas son necesarias para desarrollar un modelo que permita calcular el espesor óptimo del aislamiento térmico?
- ¿Cuáles son los parámetros de entrada y salida que deben ser considerados para garantizar un dimensionamiento preciso y eficiente de los espesores de aislamiento térmico?
- ¿Qué características debe tener una herramienta computacional para que facilite el cálculo del espesor óptimo de aislamiento térmico, considerando su aplicabilidad en distintos escenarios industriales?
- ¿Qué pasos son necesarios para implementar una herramienta computacional funcional que integre el modelo desarrollado y permita realizar cálculos prácticos y eficientes?

## **Objetivos de la Investigación**

### **Objetivo General**

Implementar un modelo matemático para calcular el espesor óptimo-económico del aislamiento térmico en sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos.

### **Objetivos Específicos**

- Establecer los parámetros de ingreso y salida necesarios para la elaboración del dimensionamiento de espesores para el aislante térmico.
- Desarrollar un modelo matemático para calcular el espesor óptimo del aislamiento térmico considerando pérdidas energéticas y costos de instalación.
- Diseñar una herramienta computacional que permita realizar los cálculos de manera práctica y eficiente.
- Implementar una herramienta computacional que permita realizar los cálculos de manera práctica y eficiente.

## **Justificación**

Esta investigación tiene como propósito implementar un modelo que permita calcular el espesor óptimo-económico de los aislantes térmicos en sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos térmicos a través de una App con el fin de proporcionar un método de cálculo rápido y sencillo de los mismos, garantizando veracidad de los datos obtenidos bajo una ejecución práctica y amigable para el usuario, abordando los desafíos expuestos en el planteamiento del problema.

A través del desarrollo de herramientas computacionales, como una interfaz de usuario en plataformas versátiles, es posible proporcionar a los profesionales del área un método efectivo para evaluar diferentes escenarios, materiales y costos. Este enfoque no solo busca maximizar la eficiencia energética, sino también reducir el impacto económico y ambiental, promoviendo el desarrollo sostenible en la industria energética.

Cabe resaltar que, al poseer un modelo matemático e implementado además en una interfaz accesible, que permite realizar el estudio rápido y confiable con obtención de datos que disminuyen los costos asociados a las instalaciones y producciones de energía dentro de



cualquier asociación, se genera una mejor estabilidad dentro de la industria y la sociedad ya que se encuentra relacionado con la optimización y costos de la producción e insumos para estas.

Finalmente, en el ámbito académico, este trabajo contribuye al conocimiento sobre optimización de sistemas energéticos mediante el uso de aislamiento térmico. Además, ofrece una base sólida para investigaciones futuras relacionadas con la transferencia de calor, la eficiencia energética y la sostenibilidad industrial. Al integrar elementos teóricos y prácticos, el trabajo no solo tiene un valor didáctico ya que permite el estudio de casos reales y ser corroborados bajo el uso de la hoja de cálculo implementada, sino que también refuerza el compromiso de la institución con el estudio de problemas de alta relevancia en contextos locales e internacionales. Bajo este mismo orden de ideas, este trabajo de grado se encuentra enmarcado dentro de la línea de investigación de optimización de procesos termodinámicos y sistema de gestión de fluidos, adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.

### **Alcances y Limitaciones**

Si bien el modelo desarrollado es robusto dentro de su alcance, es importante reconocer las siguientes limitaciones que definen el marco del presente trabajo y que representan potenciales líneas para futuras investigaciones.

El modelo actual está diseñado exclusivamente para el aislamiento de sistemas que operan a temperaturas superiores al ambiente. No incluye las particularidades termodinámicas y los criterios de diseño específicos para el aislamiento en sistemas de refrigeración, donde el objetivo es evitar la ganancia de calor y la condensación.

Se limita las soluciones del modelo a las configuraciones de pared plana, cilindro y esfera, que representan las geometrías predominantes en sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos. Además, cabe resaltar que para accesorios o conexiones como lo pueden ser válvulas, a menudo existen estándares de aislamiento predefinidos que no dependen de una optimización continua del espesor, por lo que su estudio no se alinea directamente con el objetivo de evaluar el costo en función de la variación del espesor.

En su configuración actual, en las soluciones empleadas se asume la aplicación de una única capa de material aislante homogéneo para la determinación del espesor óptimo.

Aunque el modelo utiliza correlaciones de convección basadas en guías técnicas de referencia, existen metodologías y correlaciones mucho más amplias y profundas en la literatura académica para escenarios complejos de flujo de fluidos y geometrías no estándar. En este trabajo se utiliza aproximaciones y correlaciones de ingeniería que son adecuadas para la mayoría de las aplicaciones industriales estándar, pero no abarca cada posible escenario de convección con el máximo nivel de detalle físico.

Para simplificar el modelo y enfocarlo en los mecanismos predominantes en las aplicaciones industriales más comunes, la transferencia de calor por radiación se ha despreciado. Además, también se asume condiciones de transferencia de calor en estado estacionario, no aborda análisis transitorios o dinámicos, donde las temperaturas o flujos cambian con el tiempo.

Para los cálculos, se toma que las propiedades térmicas de los materiales permanecen constantes dentro del rango de temperaturas de operación, es decir, no considera la variación de estas propiedades con la temperatura ni el posible deterioro o envejecimiento del aislante a lo largo del tiempo.

Por otra parte, este trabajo se enfoca en la optimización del espesor de aislamiento térmico bajo la premisa de que los costos económicos clave son parámetros de entrada definidos por el usuario, derivados directamente de cotizaciones de proveedores o datos históricos. El modelo diseñado no profundiza en la estructura interna de dichos costos, además, no realiza un análisis de la eficiencia de la generación de energía ni del tipo específico de combustible utilizado más allá de su costo unitario. Es por esto que se destaca que el análisis económico se centra en el balance entre el costo del aislamiento y el valor de la energía perdida al precio de compra, dejando los estudios detallados de indicadores financieros avanzados fuera del alcance de esta investigación.

Estas limitaciones han sido consideradas conscientemente en el diseño del estudio para mantener el proyecto dentro de un alcance manejable y lograr sus objetivos principales de manera efectiva. Sin embargo, también abren puntos para futuras investigaciones y extensiones del modelo, permitiendo profundizar el análisis termoeconómico en escenarios de mayor complejidad.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### Antecedentes

En este capítulo se establecen las bases conceptuales y metodológicas que sustentan la investigación, ofreciendo una perspectiva integral sobre los estudios previos relacionados con el tema de estudio. Los antecedentes constituyen un elemento esencial, ya que permiten identificar el desarrollo histórico y actual de la problemática abordada. Según Tamayo y Tamayo (2004), “los antecedentes son aquellos hechos previos relacionados con el problema que contribuyen a esclarecerlo, juzgarlo e interpretarlo” (p. 146). Esto asegura que la investigación se realice con un enfoque novedoso y no repita esfuerzos previamente documentados.

Los trabajos considerados incluyen estudios nacionales e internacionales, revisiones documentales, y análisis previos que enriquecen el marco teórico de esta investigación, aportando comparaciones y enfoques metodológicos para un desarrollo riguroso y fundamentado.

#### Antecedentes de la Investigación

Bajo este mismo orden de ideas, se expresan antecedentes relevantes y de referencias para este trabajo:

**Zapata J. (2021)**, en su trabajo titulado *"Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para el dimensionamiento óptimo de espesores para aislamiento térmico en tuberías de vapor"*, perteneciente a la Universidad Señor de Sipán ubicada en Perú, presenta una investigación enfocada en optimizar el diseño de aislamiento térmico mediante el desarrollo de herramientas computacionales.

Es así como la investigación tuvo como objetivo diseñar e implementar una herramienta computacional que facilite la selección de espesores óptimos de aislamiento térmico en tuberías de vapor, integrando aspectos técnicos y económicos. La metodología empleada se basó en soluciones analíticas y numéricas, considerando parámetros como las propiedades de los materiales aislantes, las condiciones de radiación y la conductividad térmica.

Entre las conclusiones más relevantes, el autor destaca que la interfaz gráfica desarrollada simplifica el proceso de selección de materiales y espesores óptimos, permitiendo a los usuarios tomar decisiones rápidas y precisas lo cual resalta la importancia del uso de softwares en la toma de decisiones técnicas, especialmente en áreas donde los cálculos manuales o complejos pueden ser una barrera para la implementación de soluciones eficientes. Además, el estudio menciona la importancia de reducir las pérdidas energéticas y minimicen los costos asociados al consumo de combustibles.

Este trabajo establece una metodología clara para el diseño de investigaciones orientadas al desarrollo de software aplicadas al cálculo de espesores óptimos de aislamiento térmico, siendo un aporte directo para criterios de diseño, referencias bibliográficas y alternativas para el desarrollo de la interfaz de este trabajo.

Asimismo, **Torralba M. (2014)**, realizó un trabajo referido a la “**Optimización Del Espesor De Aislamiento En Tuberías De Sales Fundidas Para Una Central De Captadores Cilindro-Parabólicos**”, aborda el estudio y análisis de las pérdidas térmicas en una red de tuberías para una planta termosolar.

El trabajo se centra en la planta Archimede, localizada en Sicilia, Italia, que opera con un sistema de captadores cilindro-parabólicos y utiliza sales fundidas como fluido caloportador. Las sales permiten alcanzar temperaturas de hasta 550 °C, aunque presentan retos significativos, como su alto punto de solidificación y la necesidad de aislamiento adecuado para prevenir pérdidas térmicas y congelación.

La metodología incluyó el análisis paramétrico de los mecanismos de transferencia de calor, considerando convección, conducción y radiación. El software EES (Engineering Equation Solver) se utilizó para resolver sistemas de ecuaciones y modelar escenarios con diferentes espesores de aislamiento. Adicionalmente, se realizó un análisis económico que permitió encontrar el balance entre los costos de instalación del aislamiento y las pérdidas térmicas.

Entre las conclusiones más relevantes, se determinó que el espesor óptimo para las condiciones operativas de la planta es de 50 cm. Este espesor reduce significativamente las pérdidas de calor y asegura una operación eficiente, especialmente considerando las altas temperaturas del fluido de trabajo. Además, el proyecto destacó la importancia de integrar aislamiento adecuado en diseños térmicos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las plantas solares.

Este estudio proporciona un enfoque integral para la optimización de espesores de aislamiento térmico en sistemas industriales, utilizando sales fundidas como fluido demostrando cómo el uso de herramientas analíticas y económicas puede maximizar la eficiencia energética y minimizar costos operativos. Siendo de aporte para esta investigación por la metodología, métodos y bases utilizadas.

**Coelho J. (2010)**, presentó un “*Análisis para la Selección de Elementos Flexibles de Transmisión de Potencia Mediante Algoritmos Matemáticos y los Mostrados por Software de Simulación*” de la Universidad Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Venezuela. Por medio de este, analiza los resultados de selección obtenidos a través de algoritmos matemáticos de elementos flexibles de transmisión de potencia y los obtenidos por medio de software de simulación computarizada.

Esta investigación se desarrolló en tres procedimientos. Primero, el estudio diagnóstico; seguido de este, determinar las características mecánicas para elementos flexibles de transmisión de potencia mediante algoritmos de selección y mediante el uso de software de Análisis por Elementos Finitos; por último, elaborar un instructivo del recurso de selección mediante el software de simulación Autodesk Inventor 2009.

Este trabajo tiene como aporte la alternativa de optar por softwares a herramientas que permitan automatizar los cálculos, selección de materiales, y la comparación de la obtención de estos por medios matemáticos. También, brinda un ejemplo de la realización de un instructivo al dar uso de herramientas computacionales.

Por otra parte, **Guaman K. (1984)**, desarrolló una investigación dirigida a la “*Optimización De Espesores Para Sistemas De Aislamiento Termico En Centrales De Vapor*” en este estudio, se presenta el análisis para la optimización de sistemas de aislamiento para superficies planas y cilíndricas, tomando en cuenta su aplicación en tuberías, tanques, depósitos y equipos destinados a conservar la energía del vapor generado por una caldera en una central térmica de vapor.

Este trabajo propone como criterio de optimización que aun con la existencia de distintas formas para la elección del espesor de cualquier aislante térmico, la elección correcta debería basarse en el diseño que conlleva el ahorro de dinero a lo largo de un periodo de tiempo establecido.

Para determinar dicho espesor, se dio uso de la gráfica que refleja el costo de inversión y el diámetro del espesor, obteniendo los indicados para los cuales el costo total de las pérdidas térmicas y el costo total de aislamiento son mínimos. De esta forma, se logra obtener un método sencillo y práctico para la elección, el cual contempla la utilización de tablas y gráficos tanto para los aislamientos de superficies planas como cilíndricas.

El aporte de esta investigación es de gran relevancia ya que proporcionó un análisis térmico y económico de los sistemas aislamiento, el cual incluye la determinación de pérdidas térmicas a través del espesor del aislante, el costo de dichas pérdidas, así como el del mismo aislante.

### **Bases Teóricas**

Es de gran utilidad que el investigador, al iniciar el estudio de su temática, realice una extensión de sus conocimientos por medio de una sistemática y amplia consulta bibliográfica. Las bases teóricas constituyen el eje fundamental sobre el cual se construye una investigación, proporcionando un marco conceptual que respalda y guía el desarrollo del estudio. Según Sabino (2000), “El cometido que cumple el marco teórico es, pues, situar a nuestro problema dentro de un conjunto de conocimientos en lo posible sólidos y confiables que permitan orientar nuestra búsqueda y nos ofrezcan una conceptualización adecuada de los términos que utilizamos.” (p. 60). Este apartado es indispensable para delimitar las teorías, enfoques y postulados que se relacionan directamente con este trabajo.

### **Transporte de Fluidos**

Según Ley Derecho, (s.f.). Aunque en términos generales los fluidos pueden transportarse en recipientes convencional de diversas formas, en el ámbito de la ingeniería se entiende por transporte de fluidos al movimiento continuo y forzado de líquidos o gases a través de conducciones fijas que configuran un circuito. Estos circuitos están compuestos por elementos funcionales esenciales, como bombas, válvulas, intercambiadores de calor, filtros, entre otros elementos que se encuentran interconectados por las conducciones. La configuración y los componentes del circuito varían considerablemente en función de su aplicación particular.

Existen dos tipos principales de configuraciones de estos circuitos, los cerrados y abiertos. En el caso de los circuitos abiertos, se caracterizan por la renovación constante del fluido que alimenta sus elementos y también, se emplean mayormente para el traslado del fluido mismo desde su punto de origen como un depósito o fuente, hasta su destino de uso o consumo, ejemplos comunes incluyen los sistemas de distribución de agua en ciudades o los oleoductos.

Por otra parte, los circuitos cerrados resaltan ya que su único objetivo no es el transporte del fluido, sino que es un vehículo para movilizar otra propiedad física o magnitud, como la energía. Como ejemplo típico de circuito de fluidos cerrado transportador de energía térmica considérese una instalación de calefacción central de tipo doméstico clásico, en la cual el agua almacena la energía térmica que toma en la caldera y la transporta a través de la instalación, cediéndola al ambiente a través de los radiadores.

Después de haber cedido calor, el agua vuelve más fría a la caldera por la conducción de retorno que cierra el circuito para iniciar un nuevo ciclo.

### **Transporte de Energía a través de Fluidos**

StudySmarter. (s.f.). Dice que, el transporte de energía constituye un proceso fundamental para la distribución de la energía producida en distintas plantas hacia los puntos de consumo. Esta transferencia se lleva a cabo a través de diversos medios, que incluyen, por ejemplo, las líneas de transmisión eléctrica, los gasoductos o los sistemas de transporte de combustibles. Este proceso es vital para asegurar un suministro energético continuo y confiable en diversas ubicaciones, buscando siempre optimizar la eficiencia y la sostenibilidad. Los fluidos son medios particularmente adecuados para el transporte de energía térmica y mecánica porque pueden almacenar estas formas de energía de manera sencilla. La energía térmica se acumula simplemente calentando el fluido, mientras que la energía mecánica (elástica) se almacena manteniendo una presión elevada. La capacidad de almacenamiento de energía elástica es superior en los gases en comparación con los líquidos debido a su mayor compresibilidad. Un ejemplo clásico de circuito cerrado para el transporte de energía térmica es un sistema de calefacción central, donde el fluido (agua) recoge calor en la caldera y lo distribuye a través

de radiadores que lo transfieren al ambiente, circulando de vuelta a la caldera para repetir el ciclo.

## **Tanques de Almacenamiento**

Según Grupo Acura. (2022). Los tanques de almacenamiento son recipientes diseñados específicamente para la gestión y conservación de una amplia gama de sustancias, incluyendo líquidos, gases comprimidos y productos sólidos, por períodos variables. En la industria moderna, estos tanques desempeñan un papel crucial al asegurar la disponibilidad de materias primas y productos finales en las condiciones requeridas para procesos productivos. Su uso es esencial en diversos sectores, como el químico, petroquímico, alimentario, farmacéutico y de tratamiento de aguas, entre otros.

Además, Alvinox. (s.f.). Dentro de estos sistemas de almacenamiento, frecuentemente se realizan operaciones que requieren un control preciso de la temperatura, como el calentamiento o enfriamiento del producto almacenado. Para satisfacer esta necesidad de regulación térmica en tanques industriales, una solución común es la incorporación de "chaquetas" o cubiertas externas al recipiente, lo que da lugar a los denominados **tanques enchaquetados**. Este tipo de diseño resalta la importancia de mantener las condiciones térmicas de los fluidos durante su almacenamiento, un aspecto fundamental para preservar sus propiedades y garantizar la eficiencia de los procesos industriales.

## **Sistemas Aislantes**

Los aislantes térmicos se componen de materiales de baja conductividad térmica combinados para lograr un sistema de conductividad térmica aún más baja. Es importante resaltar que la transferencia de calor a través de cualquiera de los sistemas aislantes incluye varios modos: conducción por los materiales sólidos, conducción o convección por medio de espacios vacíos; y, si la temperatura es lo suficientemente alta, intercambio de radiación entre las superficies de la matriz sólida.



## **Categorías de Aislantes Térmicos**

Kreith, F. (2012) Los diferentes tipos de materiales aislantes en esencia se pueden clasificar en las tres categorías amplias siguientes:

- **Fibrosos.** Los materiales fibrosos consisten en partículas de filamentos de baja densidad de pequeño diámetro que se pueden verter en un espacio libre como "relleno suelto" o formados en tableros, bloques o mantas. Los materiales fibrosos tienen una porosidad muy alta (-90%). La lana mineral es un material fibroso común para aplicaciones a temperaturas menores a 700 °C y con frecuencia se utiliza fibra de vidrio para temperaturas menores a 200 °C. Para protección térmica a temperaturas entre 700 y 1 700 °C se pueden emplear fibras refractarias como la alúmina ( $Al_2O_3$ ) o la sílice ( $SiO_2$ ).
- **Celular.** Los aislantes celulares son materiales de celdas cerradas o abiertas que suelen tener la forma de tableros extendidos flexibles o rígidos. Sin embargo, también se les puede dar forma o rociar en el lugar para lograr las formas geométricas deseadas. El aislamiento celular tiene la ventaja de tener una baja densidad, capacidad térmica baja y resistencia a la compresión relativamente buena. Algunos ejemplos son el poliuretano y la espuma de poliestireno expandido.
- **Granular.** Es aislamiento granular consiste en hojuelas o partículas pequeñas de materiales inorgánicos aglomerados en formas prefabricadas o utilizadas como polvos, dentro de los materiales más utilizados tenemos a la vermiculita y diatomea.

## **Espesor**

El espesor de un material aislante es un factor determinante en la resistencia térmica que este proporciona. La resistencia térmica “R” de un material aislante depende directamente de su espesor “e” y de sus características técnicas, particularmente su coeficiente de conductividad térmica “ $\lambda$ ”. Esta relación fundamental se expresa mediante la fórmula  $R=e/\lambda$ , la cual es la analogía de la Ley de Ohm. Dado que la resistencia térmica es directamente proporcional al espesor, un incremento en el espesor del material aislante resulta en un aumento de su resistencia térmica, lo que a su vez se traduce en un mejor aislamiento contra la pérdida o ganancia de calor. Por ello, el espesor es crucial para la eficacia de un aislante térmico, a

mayor espesor, mayor resistencia térmica y consecuentemente mejor rendimiento aislante (Isover, s.f.).

## **Interfaz**

La interfaz de usuario es el espacio donde se producen las interacciones entre seres humanos y máquinas. El objetivo de esta interacción es permitir el funcionamiento y control más efectivo de la máquina desde la interacción con el humano.

Las interfaces básicas de usuario son aquellas que incluyen elementos como ventanas, menús, contenido gráfico, cursor, sonidos, y en general, todos aquellos canales por los cuales se permite la comunicación entre el ser humano y la máquina.

El objetivo del diseño de una interfaz es producir una interfaz que sea intuitiva (explicarse por sí misma), eficiente y agradable para que al operar la máquina dé los resultados deseados.

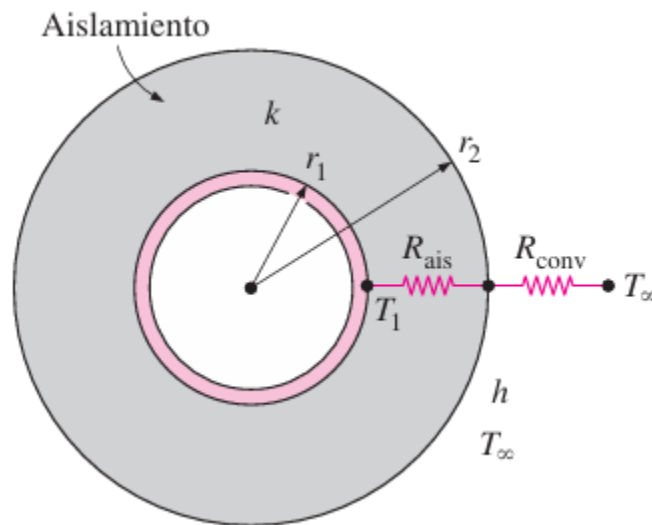
## **Radio Crítico de Aislamiento**

Según lo descrito por Cengel, Y. A. (2011), en el caso de una pared plana se tiene que entre más grueso sea el aislamiento, más baja es la razón de la transferencia de calor. Esto es previsible ya que el área  $A$  de la transferencia de calor es constante y agregar aislamiento siempre incrementa la resistencia térmica de la pared sin incrementar la resistencia a la convección. Pero, particularmente en sistemas cilíndricos o esféricos como tuberías y cables, el radio crítico de aislamiento ( $r_{crit}$ ) representa un fenómeno singular en el que la adición de material aislante no siempre resulta en una reducción inmediata de la pérdida de calor. Este concepto fundamental establece que, para un radio exterior de aislamiento inferior al radio crítico, la pérdida de calor desde la superficie exterior del aislamiento en realidad aumenta con cada adición de aislante.

Este comportamiento contraintuitivo se debe a la interacción de dos efectos opuestos: por un lado, el aumento de la resistencia a la conducción del calor a medida que se añade aislante; por otro lado, la disminución de la resistencia a la convección en la superficie exterior, ya que el área superficial para la transferencia de calor por convección aumenta con el radio exterior. Cuando el radio exterior del aislamiento es menor que el radio crítico, el aumento en el área superficial (y la consiguiente disminución de la resistencia por convección) domina sobre el incremento de la resistencia por conducción, lo que resulta en una mayor pérdida de

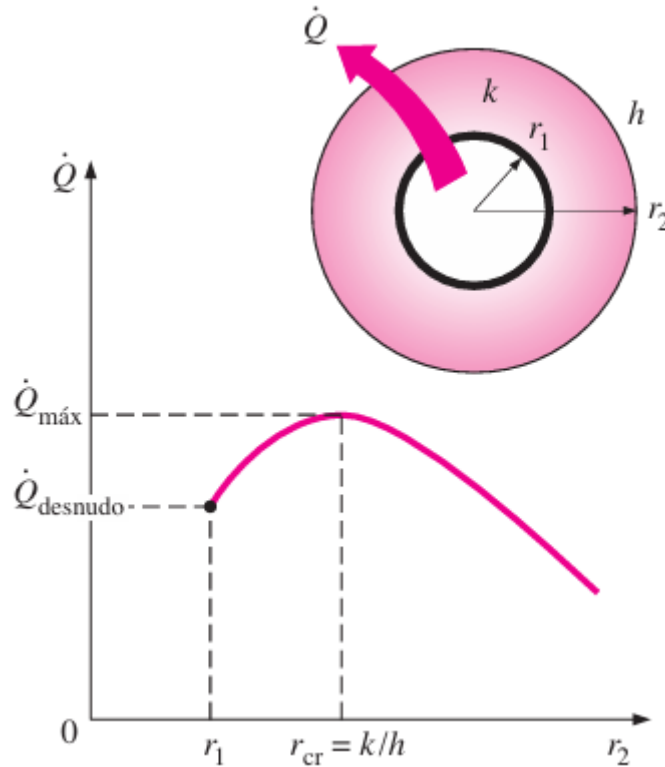
calor. Solo cuando el radio exterior del aislante supera el radio crítico, la resistencia a la conducción del aislante empieza a ser el factor dominante, y la adición de más aislante logra su objetivo de reducir la transferencia de calor.

Ahora, considere un tubo cilíndrico de radio exterior  $r_1$  cuya temperatura de la su perficie exterior,  $T_1$ , se mantiene constante (figura 1-1). Ahora se aísla el tubo con un material cuya conductividad térmica es  $k$  y su radio exterior es  $r_2$ . Se pierde calor del tubo hacia el medio circundante que está a la temperatura  $T_\infty$ , con un coeficiente de transferencia de calor  $h$  por convección. La razón de la transferencia de calor del tubo aislado hacia el aire circundante se puede expresar como (figura 1-2).



**Figura 1-1. Tubo cilíndrico aislado expuesto a la convección desde la superficie exterior y la red de resistencias térmicas asociada con él.**

**Fuente: Cengel, Y. A. (2011)**



**Figura 2-2. Variación de la razón de transferencia de calor con el radio externo del aislamiento  $r_2$  cuando  $r_1 < r_{crit}$ .  
Fuente: Cengel, Y. A. (2011)**

Además, para continuar con lo expreso se denota que

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{ais} - R_{conv}} = \frac{T_1 - T_\infty}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} - \frac{1}{h(2\pi r_2 L)}}$$

Y en la figura 1-2 se tiene la gráfica de la variación de  $\dot{Q}$  con el radio exterior del aislamiento  $r_2$ . El valor de  $r_2$  al cual  $\dot{Q}$  alcanza un máximo se determina a partir del requisito de que  $d\dot{Q}/dr_2 = 0$  (pendiente cero). Al derivar y despejar  $r_2$  resulta que el radio crítico de aislamiento para un cuerpo cilíndrico es

$$r_{crit,cilindro} = \frac{k}{h}$$

Note que el radio crítico de aislamiento depende de la conductividad térmica del aislamiento  $k$  y del coeficiente externo de transferencia de calor por convección  $h$ . La razón de la transferencia de calor del cilindro aumenta con la adición de aislamiento para  $r_2 < r_{crit}$  alcanza un máximo cuando  $r_2 = r_{crit}$  y empieza a decrecer para  $r_2 > r_{crit}$ . Por lo tanto, aislar

el tubo puede aumentar la razón de la transferencia de calor del tubo en lugar de disminuir la cuando  $r_2 < r_{crit}$ .

Se puede repetir la discusión antes presentada para una esfera y, de manera semejante, se puede demostrar que el radio crítico del aislamiento para una capa esférica es

$$r_{crit,esfera} = \frac{2k}{h}$$

donde  $k$  es la conductividad térmica del aislamiento y  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección sobre la superficie exterior.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **Metodología de la investigación**

A lo largo de este capítulo se estudia o hace referencia al marco estructurado que permite la recolección, análisis e interpretación de datos con el fin de responder a las preguntas de la investigación. Sabino (2000), dice que “El método científico es el procedimiento o conjunto de procedimientos que se utilizan para obtener conocimientos científicos, el modelo de trabajo o secuencia lógica que orienta la investigación científica” y además que “se habla de metodología de la investigación para hacer referencia a los pasos y procedimientos que se han seguido en una indagación determinada” (p. 31). En este sentido, se puede decir que la metodología no solo se limita a describir las técnicas utilizadas en la investigación, sino que también analiza la lógica detrás de su elección y aplicación. De esta manera, el diseño metodológico permite estructurar cada fase del estudio, asegurando la coherencia entre los objetivos planteados, los métodos empleados y la interpretación de los resultados obtenidos. Es decir, en estos apartados se exponen los criterios metodológicos que sustentan el presente proyecto, con el fin de seleccionar los modelos más idóneos para definir la estructura del trabajo de grado.

#### **Naturaleza de la Investigación**

De acuerdo con el marco de la investigación planteada para la implementación de un modelo matemático para calcular el espesor óptimo-económico de los aislantes térmicos, esta se encuentra dentro de la modalidad de proyecto factible, el cual es definido por el Manual de Trabajos de Grado de Especialización, Maestría y Tesis Doctorales (2006), de la UPEL como que “consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos” (p.13).

Este trabajo de investigación se enmarca en un proyecto factible, ya que busca desarrollar un modelo viable que responda a la necesidad de la industria de reducir pérdidas energéticas y minimizar costos operativos. Para lograrlo, propone una solución práctica basada en el diseño de una herramienta computacional que optimiza la toma de decisiones en la selección de espesores adecuados en base a los parámetros indicados. De esta manera, no solo mejora la eficiencia en el uso de los recursos, sino que también brinda la obtención de cálculos complejos de forma rápida, lo cual responde a necesidades sociales y económicas basadas en la industria, así como también brinda información, respuestas y bases para trabajos educativos posteriores.

### **Tipo de Investigación**

Los estudios exploratorios se realizan cuando un fenómeno o problema ha sido poco estudiado y existen muchas dudas o vacíos en la información disponible. Según Fideas (2006), “la investigación exploratoria es aquella que se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir un nivel superficial de conocimiento” (p. 23). Además, Hernández Sampieri y Mendoza (2018), indica que estas también se llevan a cabo “cuando la revisión de la literatura reveló que tan solo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas” (p. 106). Por último, tenemos también que Arias (2012) indica que “La investigación exploratoria es aquella que se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir, un nivel superficial de conocimientos” (p. 23).

En este sentido, el presente trabajo se encuentra dentro de una investigación exploratoria, puesto que, aunque existen estudios sobre aislamiento térmico en distintos contextos, la integración de factores económicos, eficiencia energética y herramientas computacionales de optimización sigue siendo un campo con escasa documentación y sin modelos estandarizados ampliamente aplicados en la industria. Por ello, esta investigación no solo aporta nuevos enfoques sobre el problema, sino que también sienta las bases para futuros estudios que profundicen en la optimización del aislamiento térmico bajo diferentes condiciones operativas.

Por otra parte, Vivero, L. y Sánchez, B. I. (2018) nos dicen que “La investigación documental es, como su nombre indica, aquella que se realiza a partir de la información hallada en documentos de cualquier especie, como fuentes bibliográficas, hemerográficas o archivísticas”, es decir, se puede definir como aquella en que su proceso se rige por la recolección, análisis y síntesis de información ya publicada en diversas fuentes, tales como libros, artículos científicos, informes y documentos oficiales. La amplia revisión bibliográfica no solo respalda la propuesta teórica, sino que también garantiza la viabilidad y solidez del planteamiento en un contexto industrial, esto gracias a la recolección de información y construcción de conocimientos desde distintas perspectivas, acerca de datos como también distintos métodos para la obtención de estos.

### **Diseño de la Investigación**

De acuerdo con Arias (2006), el diseño de investigación constituye el plan estratégico que orienta la manera en que el investigador aborda el problema de estudio. Este se fundamenta en el origen de los datos obtenidos, primarios, obtenidos mediante trabajo de campo, o secundarios, derivados de fuentes documentales; también, en la decisión de intervenir o no en las variables del contexto analizado.

Así, para definir el diseño de la presente investigación tenemos que según Hernandez Sampieri, Fernandez Collado y Baptista Lucio (2014), la investigación cuantitativa se caracteriza por su énfasis en la medición numérica de variables y el análisis estadístico de datos para contrastar hipótesis previamente establecidas. Este enfoque suele seguir un proceso estructurado y secuencial, el cual inicia con una revisión teórica, surgen o se formulan preguntas de investigación específicas, se diseñan instrumentos estandarizados para recolectar datos, y emplea técnicas estadísticas para generar resultados. Su naturaleza suele ser deductiva ya que parte de teorías o marcos conceptuales existentes para derivar conclusiones.

### **Población y Muestra**

Según Creswell (2014), la población en investigación se refiere al grupo total de individuos, casos o elementos que poseen características comunes y son objeto de estudio, además, expresa Palella y Martins (2008), que población es “un conjunto de unidades de las que desea



obtener información sobre las que se va a generar conclusiones" (p.83). Es así como se entiende por población al universo completo de estudio, dando origen de datos.

Por otra parte, en una investigación la muestra no es más que un subconjunto representativo de la población total que permite obtener conclusiones sin necesidad de analizar cada unidad individualmente, Sabino (2000) denomina la muestra como no más que una parte extraída y representativa del universo de estudio. Además, según Tamayo y Tamayo (2003) "La muestra descansa en el principio de que las partes representan el todo y por tanto refleja las características que definen la población de la cual fue extraída, lo cual nos indica que es representativa" (p. 176). Afirmando así, que esta permite a los investigadores analizar características sin necesidad de examinar a cada individuo de la población, facilitando la obtención de resultados más eficientes y manejables.

Podría decirse, que en este caso de estudio se trabaja con una muestra representativa conformada por sistemas industriales específicos en los que la optimización del aislamiento térmico puede evaluarse. La selección de estos casos permite analizar las condiciones térmicas y económicas involucradas, garantizando que los resultados puedan extrapolarse a contextos industriales similares, facilitando la toma de decisiones en la implementación de aislamientos térmicos óptimos.

### **Fases de la Investigación**

Para llevar a cabo el presente trabajo se desarrollan diversas fases estructurales, las cuales permiten resolver las interrogantes planteadas y cumplir con los objetivos establecidos. Es así como, en base a dichos objetivos, se requieren de cuatro fases para el cumplimiento satisfactorio de los mismos.

#### **Fase I: Diagnóstico**

La fase de diagnóstico constituye el primer acercamiento al problema de estudio y permite analizar o estudiar la necesidad de llevar a cabo la presente investigación para así establecer la viabilidad de la misma. En esta etapa se identificarán y analizarán los aspectos clave que justifican el desarrollo del trabajo de grado, tomando en cuenta el contexto, antecedentes y vacíos de conocimiento en el área de estudio. Para ello, se recurrirá a diversas estrategias metodológicas que permitan la recolección de información relevante. Según Sabino (2000),

“Un instrumento de recolección de datos es, en principio, cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información” (p. 114), así como también expresa que existen dos tipos de datos que se le pueden presentar al investigador, conformados por los primarios y secundarios, en base a esto se estudian las técnicas de recolección a emplear.

Bien es sabido que para todo trabajo de investigación las fuentes de información son de gran importancia, ya que estas brindan los datos necesarios al investigador para realizar evaluaciones y llegar a los resultados deseados. Dado que la investigación es de carácter documental, esta fase se desarrollará a partir de fuentes primarias y secundarias.

### **Fuentes Primarias**

Los datos primarios, suelen ser aquellos que se obtienen directamente del entorno de estudio mediante la aplicación de diversas técnicas, entre estas se encuentran las encuestas, entrevistas y experimentos. Estos datos, ofrecen información rica y actualizada que permite al investigador comprender de manera profunda y contextualizada el fenómeno investigado. Según Maranto M. y González M. (2015), las fuentes primarias son aquellas que contienen información de primera mano antes de ser manipulada por otra persona o, así como fue descrito anteriormente son aquellos denominados, datos primarios. Además, indican que las principales fuentes de información primaria son los libros, monografías, publicaciones periódicas, documentos oficiales o informe técnicos de instituciones públicas o privadas, tesis, trabajos presentados en conferencias o seminarios, testimonios de expertos, artículos periodísticos, videos documentales, foros.

### **Entrevista No Estructurada**

Adicionalmente, en concordancia con lo antes descrito como datos primarios y la obtención de estos, se aplicarán entrevistas no estructuradas con expertos y profesionales vinculados al tema. Según Cohen y Manion (1990), “la entrevista no estructurada es una conversación guiada que permite explorar en profundidad las percepciones y conocimientos del entrevistado sin restricciones fijas de preguntas o respuestas” (p. 271). Para estas se destacan las entrevistas informales y focalizadas, que de acuerdo con lo descrito por Sabino (2000), la informal consiste en una conversación no estructurada y sin algún esquema previo sino de

conversar con el entrevistado para así obtener un panorama de los temas que para él resultan sobresaliente, por otra parte la focalizada es tan libre como la anterior pero concentrada en un tema, generalmente para limitar alguna experiencia vivida o sus conocimientos en un tema particular; ambas son de gran utilidad para estudios exploratorios o para abordar temas en los cuales el investigador tiene pocos conocimientos o fácil acceso. Este método es útil para obtener perspectivas que complementen la revisión documental, facilitando la identificación de problemáticas, enfoques y posibles soluciones dentro del ámbito de estudio.

### **Fuentes Secundarias**

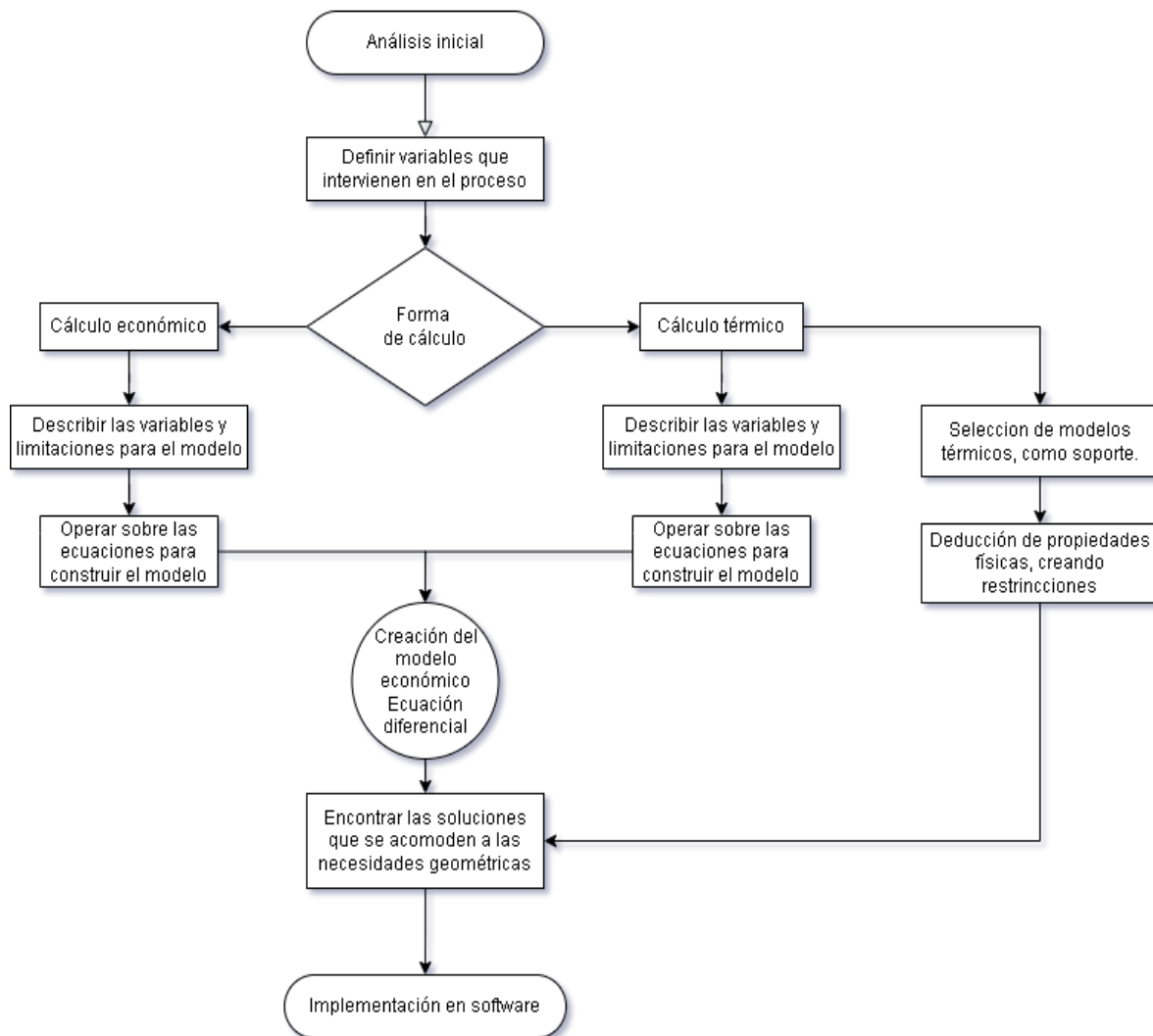
Generalmente, los datos secundarios se encuentran diseminados, puesto que estos se encuentran en distintas fuentes escritas según su registro y clasificación. Gracias al avance tecnológico y el acceso a bibliografía e información de distintos autores se hizo más fácil la obtención o la recopilación de este tipo de datos. Para Montgomery Lonestar College. (s.f.). las fuentes secundarias proporcionan información que fue analizada y comentada por otros investigadores, dentro de este tipo de fuente se encuentran libros académicos, bibliografías, artículos de científicos, reseñas, normativas y libros de referencia. Una fuente suele describir, interpretar o sintetizar fuentes primarias.

## **Fase II: Diseño**

A través de esta fase se busca desarrollar un modelo matemático para calcular el espesor óptimo del aislamiento térmico considerando pérdidas energéticas y costos de instalación por medio de los parámetros obtenidos durante la fase diagnóstico.

El diagrama de flujo es una herramienta visual que permite representar de forma secuencial los pasos y decisiones involucradas en un proceso. Según Kendall y Kendall (2014), un diagrama de flujo permite ensamblar una representación gráfica de los datos de forma organizada, es decir, la creación ilustrada de los procesos. En el contexto del diseño del modelo matemático, el flujograma facilita la identificación y distribución de las etapas críticas, desde la recopilación de datos hasta la formulación y validación de ecuaciones, permitiendo mejorar cada fase del proceso.

La utilización de este método permite representar de forma visual, a través de la figura (2) la fase de diseño. En este diagrama, muestra los pasos o el proceso a seguir para desarrollar el modelo para el cálculo del espesor óptimo-económico del aislamiento térmico.



**Figura 2. Diagrama de Diseño**  
**Fuente: Autores (2025)**

### **Fase III: Factibilidad**

Inicialmente, se dice que la factibilidad es la capacidad de la investigación de llevarse a cabo de forma efectiva y obtener el resultado planteado. En este orden de ideas se tiene entonces que esta fase se trata de determinar o establecer, de manera integral, la viabilidad del trabajo en diversos aspectos fundamentales para su implementación. A través de esto analiza si el proyecto puede llevarse a cabo de forma exitosa y sostenible, considerando no solo su factibilidad tecnológica y financiera, sino también de su operatividad y aceptación social. Este análisis permite identificar posibles limitaciones y fortalezas, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones informadas y la asignación eficiente de recursos.

#### **Factibilidad Técnica**

La factibilidad técnica se centra en determinar si los recursos, la infraestructura, las herramientas y los conocimientos técnicos disponibles son adecuados para llevar a cabo el proyecto. Según Enrique Arias (2020) “La factibilidad técnica determina si se dispone de los conocimientos, habilidades, equipos o herramientas necesarios para llevar a cabo los procedimientos, funciones o métodos involucrados en un proyecto”. Para concluir si se cumple dicha factibilidad, implica entonces analizar si la tecnología y los métodos actuales permiten implementar la solución propuesta, garantizando que el estudio pueda desarrollarse sin inconvenientes desde el punto de vista técnico.

#### **Factibilidad Operativa**

La factibilidad operativa evalúa la capacidad de la del equipo de trabajo para gestionar e implementar el proyecto en la práctica. Tamayo y Tamayo (2004) destacan que este aspecto involucra el análisis de procesos, la coordinación del equipo y la disposición de los recursos humanos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Es por ello que, se analiza si cuentan con las competencias laborales necesarias y los requisitos para llevar en buenos términos el proyecto.

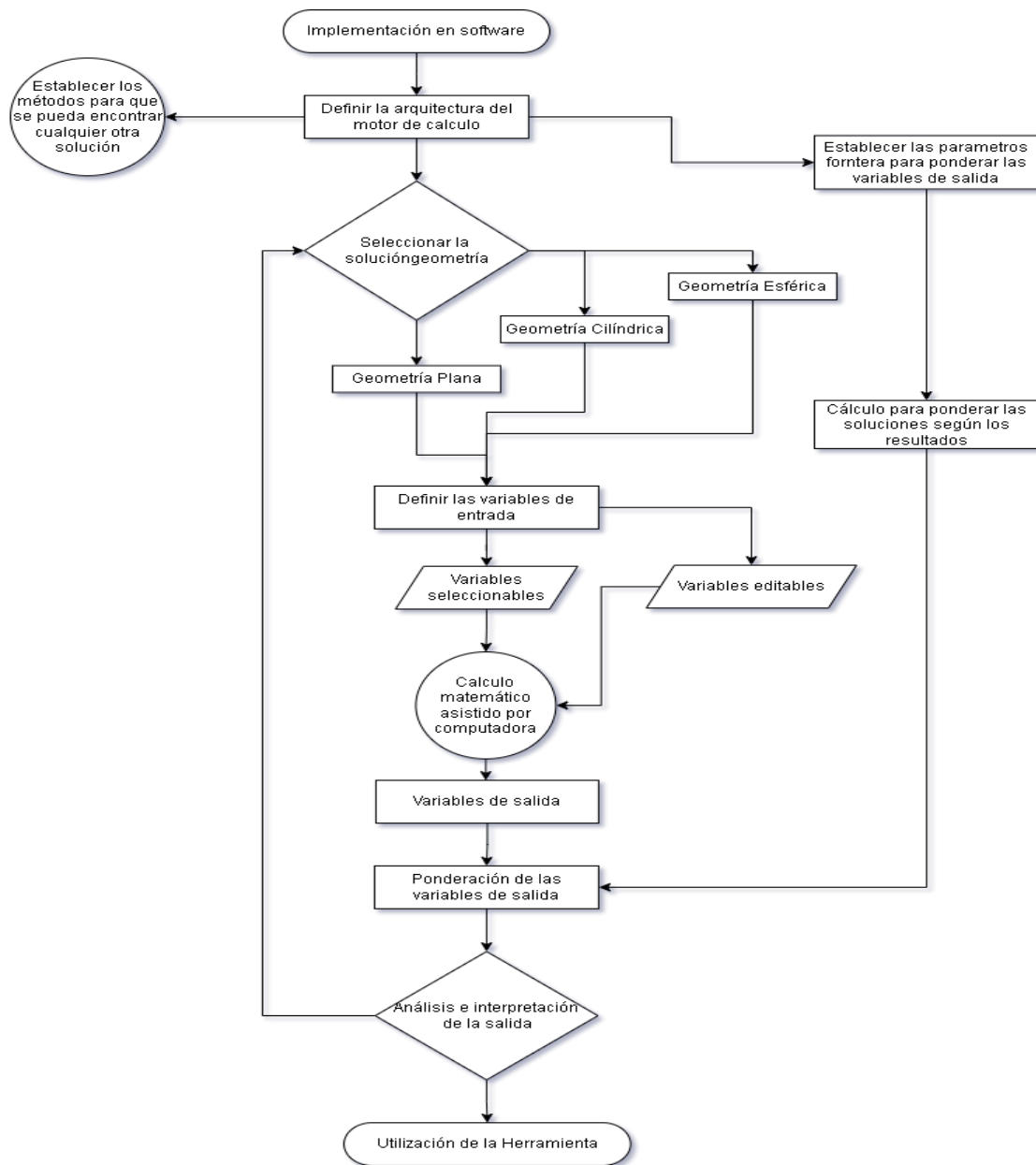
## **Factibilidad Económica**

La factibilidad económica se enfoca en el análisis de los costos y beneficios del proyecto, determinando si la inversión necesaria está justificada por los beneficios esperados. Ramírez, Vidal y Domínguez (2009) señalan que la evaluación económica-financiera tiene como objetivo valorar la inversión a partir de criterios cuantitativos y cualitativos, empleando las pautas más representativas usadas para tomar decisiones de inversión. Representa el punto culminante del estudio de factibilidad, debido a que mide los beneficios que se obtienen con la ejecución del proyecto, es posible establecer la rentabilidad del proyecto asegurando que la asignación de recursos resulte eficiente y sostenible en el tiempo.

#### **Fase IV: Implementación**

Una vez obtenido el modelo matemático, la fase de implementación se centra en la puesta en práctica de dicho modelo a través de una calculadora programada. Esta etapa no busca presentar la solución final de manera directa, sino más bien establecer el procedimiento para ejecutar y validar el modelo de forma interactiva. Se procederá a codificar las fórmulas y, en su caso, a programar macros que permitan automatizar los cálculos, facilitando el análisis de distintas variables y escenarios. De igual manera, se muestra este proceso por medio de la figura (3).





**Figura 3. Diagrama de Implementación**  
**Fuente: Autores (2025)**

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En toda investigación, el análisis de resultados constituye el proceso mediante el cual se organiza y manipula la información obtenida para establecer relaciones, extraer significados y elaborar conclusiones que den respuesta a las interrogantes planteadas. Selltiz (1970) expresa el propósito del análisis y la interpretación, expresando que el análisis resume las observaciones de tal forma que proporcionen respuestas mientras que la interpretación es un aspecto especial del análisis que busca un amplio significado en las respuestas mediante la relación con los conocimientos disponibles. Esta etapa transforma los datos crudos en hallazgos estructurados que pueden ser contrastados con los objetivos del estudio.

#### **Fase I: Diagnóstico**

El diagnóstico preliminar es el componente metodológico inicial para la estructuración y desarrollo del presente trabajo de grado, ya que establece de forma directa y documentada la información de la problemática de estudio. Este paso, permite comprender las variables técnicas, operativas y económicas asociadas a la implementación de sistemas de aislamiento térmico en contextos industriales. Cada una de las técnicas anteriormente seleccionadas poseen un propósito específico y complementario, las cuales se describen a través de esta fase.

#### **Fuentes Primarias**

Para dar inicio al análisis de las fuentes primarias, se encuentra un artículo de gran relevancia o apoyo para los cálculos u puntos al momento de deducir espesores óptimos económicos. Este artículo, denominado “*Análisis de Pérdidas Energéticas y Económicas por Transporte de Vapor en Tuberías sin un Adecuado Aislamiento Térmico*”, publicado en la revista Redes de Ingeniería por Aristizábal, Schäfer y Barrera en 2014, presenta un cálculo detallado de las pérdidas energéticas y económicas asociadas al transporte de vapor en tuberías que carecen de un aislamiento térmico adecuado. Asimismo, el estudio evalúa los ahorros potenciales que

se pueden lograr mediante la implementación de aislamiento en zonas críticas. Se basa en un caso de estudio real dentro de una empresa del sector de licores.

Como fue mencionado anteriormente, la relevancia de este artículo para la presente investigación es fundamental o una gran base para las claves en el desarrollo del modelo, ya que aborda directamente la problemática de las pérdidas energéticas en sistemas de transporte de fluidos calientes y la justifica desde una perspectiva económica. El artículo valida la importancia de optimizar el aislamiento térmico y demuestra, a través de un caso aplicado, cómo la ausencia o deterioro de este impacta significativamente en los costos operativos, lo cual refuerza el planteamiento del problema de este estudio.

Es así como, del contenido dentro de este artículo se extrajeron conceptos y elementos para la estructuración al momento de diseñar el modelo matemático. Principalmente, se consideró el uso de modelos de transferencia de calor aplicados a sistemas radiales, lo cual es pertinente para el análisis de tuberías, en el cual se detalló la aplicación del método de resistencias térmicas equivalentes para modelar la transferencia de calor a través de las distintas capas. También, Se tomaron como referencia las variables consideradas en el estudio, como las temperaturas del fluido y ambiente, las propiedades térmicas de los materiales y los costos asociados a los energéticos y materiales aislantes.

Por lo antes descrito, se resalta la importancia de este artículo para obtener valores técnicos y económicos de las pérdidas de calor en tuberías industriales, siendo una aplicación referente a una de las configuraciones geométricas de aplicabilidad del modelo a desarrollar. Este permitió confirmar la viabilidad y relevancia de desarrollar un modelo matemático que integre tanto la transferencia de calor como el análisis de costos, brindando conocimientos para la conformación de estos. Asimismo, sirvió para identificar las variables y parámetros fundamentales que deben ser considerados como entradas en dicho modelo sentando las bases para la formulación matemática, brindando alternativas para el cálculo económico y térmico. Su enfoque aplicado en un caso real justificó la necesidad de contar con una herramienta práctica que automatice estos cálculos complejos para facilitar la toma de decisiones y optimizar los recursos. Cabe resaltar que las expresiones matemáticas obtenidas en este artículo se indicarán en la Fase Diseño.

Por otra parte, el artículo “*Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor*” publicado en Redalyc por Gilbert Hernández, Retirado Mediaceja y Laurencio Alfonso en 2016 desarrolla un procedimiento para la selección del espesor óptimo económico del aislamiento térmico en tuberías que emplean trazas de vapor, como es descrito en el título de este.

A pesar de centrarse específicamente en tuberías con trazas de vapor, los principios de balance económico que presenta no son limitados a este caso sino que además son directamente aplicables a la determinación del espesor óptimo-económico en sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos de manera general, lo cual es el objeto de estudio de la presente investigación, es por esto que se integra como una referencia importante para la metodología de optimización económica del espesor del aislamiento.

De este, se extrajo el concepto fundamental en el cual el espesor óptimo económico se determina mediante el balance entre los costos de la inversión en aislamiento y los costos asociados a las pérdidas de calor a lo largo del tiempo de operación. Aquí resalta la metodología de búsqueda del espesor óptimo que minimiza el costo total, lo cual se visualiza al analizar cómo la pérdida total de calor disminuye mientras el costo de inversión del aislamiento aumenta con el espesor. Este principio de balance, a menudo ilustrado mediante una gráfica, donde la suma de los costos de energía perdida y los costos de inversión en aislamiento poseen un mínimo local. Tal concepto de representar un balance entre la inversión y los ahorros energéticos mediante el punto donde el incremento en el ahorro iguala al incremento en la inversión (o donde el costo total es mínimo) fue fundamental para conceptualizar la función objetivo de nuestro propio modelo matemático, así como una alternativa o base para obtener el valor de las pérdidas energéticas tomando en cuenta la pérdida de calor, el costo de la energía y el tiempo de funcionamiento, cada una con las unidades correspondiente y homogenizadas. En base a esto, a pesar de su enfoque en trazas de vapor, la aplicabilidad general de su procedimiento de optimización económica lo convierte en una fuente valiosa para adoptar estos elementos y conceptos que forman parte de este artículo.

Ahora, el documento titulado “Beneficios del Aislamiento térmico en la industria” es un documento técnico, publicado en octubre de 2009 por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y la Secretaría de Energía (SENER) de México, es en

resumen una guía integral sobre los beneficios, tipos, selección y cálculo del aislamiento térmico en entornos industriales. El mismo, proporciona mayormente información detallada sobre los materiales aislantes, pero también los procedimientos para calcular la transferencia de calor en superficies aisladas planas y tuberías en conjunto con la determinación del espesor óptimo.

La relevancia de esta fuente es muy alta. Como guía oficial de una entidad gubernamental encargada del uso eficiente de la energía, valida la importancia del tema de investigación desde una perspectiva regulatoria y de política energética. Además, ofrece un compendio detallado de información técnica y metodológica que sustenta directamente la necesidad y el desarrollo de un modelo para optimizar el aislamiento térmico en sistemas industriales.

Del contenido de este documento se extrajo información fundamental para el análisis diagnóstico y para sentar las bases del modelo. Aquí, se detallan las diversas razones para implementar aislamiento como lo es la conservación de energía, la protección de personal, el mantenimiento de temperatura de proceso, la prevención de corrosión y congelación, además de la reducción de ruido, lo cual refuerza la justificación de nuestro trabajo. En este, se describen y clasifican distintos tipos de aislantes térmicos industriales entre ellos el silicato de calcio, fibra de vidrio, lana de roca, entre otros, en conjunto con sus propiedades relevantes para su aplicación (límites de temperatura, conductividad térmica, resistencia a la compresión), lo cual es muy valioso para comprender las opciones disponibles y los parámetros de los materiales a considerar en la estructura de la calculadora, siendo cada uno factores que se deben tener en cuenta para el desarrollo de esta. Un aporte crucial son los procedimientos explícitos para el cálculo de la transferencia de calor en tuberías aisladas, se presentan las fórmulas para determinar el diámetro aislado, el coeficiente de transferencia de calor por convección y el flujo de calor, utilizando un enfoque basado en resistencias térmicas. Este detalle técnico es una base sólida para la formulación de nuestro propio modelo matemático. Cabe destacar que menciona la Norma Oficial Mexicana NOM-009-ENER-1995 como referencia para la eficiencia energética en aislamientos industriales, lo que aporta un marco normativo relevante que puede ser utilizado. El concepto de espesor de aislamiento óptimo como un balance económico entre los costos de inversión y los costos de energía desperdiciada también se presenta claramente, lo que concuerda y refuerza el enfoque de

optimización económica de la presente investigación, similar a lo encontrado en el artículo anterior, pero desde una perspectiva de guía técnica.

De manera más integrada, el documento proporciona una visión global sobre el aislamiento térmico industrial desde múltiples perspectivas, conformadas por la técnica, de seguridad y normativa y económica. La información sobre los distintos tipos de materiales aislantes enriqueció la comprensión de las variables de entrada relacionadas con las propiedades de los materiales. Al ser una fuente oficial, reforzó la justificación y la importancia práctica de desarrollar una herramienta para optimizar el aislamiento térmico en la industria venezolana, adaptando y aplicando principios y metodologías reconocidas internacionalmente y validadas por normativas.

### **Fuentes Secundarias**

Para dar congruencia a los conceptos y ecuaciones tanto mencionadas como utilizadas dentro de las fuentes primaria, se destacan dos fuentes secundarias y dentro de las mismas, lo que será a continuación descrito.

La *"Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial"* publicada en 2017 por la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (Fenercom), es un manual técnico comprensivo que aborda diversos aspectos del aislamiento térmico en el sector industrial. Su contenido abarca desde los beneficios y tipologías de los aislantes, hasta consideraciones de diseño, instalación, mantenimiento y criterios económicos. Su propósito es servir como una referencia práctica para ingenieros y profesionales que buscan implementar soluciones eficientes de aislamiento térmico.

Este documento, más allá de ofrecer un marco conceptual general sobre el aislamiento, proporciona metodologías y datos empíricos cruciales para la cuantificación de los fenómenos de transferencia de calor. Siendo el nivel de detalle en los cálculos de los coeficientes de convección aquello que lo convierte en una fuente indispensable para la precisión técnica del modelo matemático y su posterior implementación computacional.

Es por ello por lo que de esta guía se extrajo un conjunto invaluable de correlaciones y fórmulas para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección, un parámetro necesario para la determinación de las pérdidas energéticas en el modelo. Para esto, se incluyen diferentes escenarios, incluyendo:

- Cálculos específicos para superficies expuestas al ambiente, distinguiendo entre la convección en el exterior de los edificios y las instalaciones industriales.
- Consideraciones para la convección en el interior de los sistemas o espacios confinados.
- Diferenciación de los regímenes de flujo laminar y turbulento, basándose en la determinación de números adimensionales que permiten seleccionar la correlación apropiada para cada caso.
- Aplicabilidad a diversas geometrías, tales como superficies planas y cilíndricas, que son directamente relevantes para los sistemas de tuberías y tanques considerados en el modelo.

La provisión explícita de estas ecuaciones y sus criterios de aplicación ha sido crucial para la programación de la lógica interna del Backend de la herramienta computacional. Las cuales, serán expresas en la Fase de implementación.

Por otro lado, *"Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones"*, en su cuarta edición, es una obra fundamental de Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar, reconocida globalmente como un texto estándar en la enseñanza y aplicación de los principios de transferencia de calor y masa. Publicado por McGraw-Hill, este libro ofrece una exposición detallada de la conducción, convección y radiación, proveyendo tanto las bases teóricas rigurosas como una vasta colección de ejemplos y aplicaciones prácticas, lo que lo convierte en una referencia esencial para ingenieros y científicos.

Dicha fuente no solo proporciona las leyes y ecuaciones que describen los fenómenos de transferencia de calor, sino que establecen el marco conceptual y metodológico que permitió comprender a profundidad el problema de las pérdidas energéticas y formular la función objetivo del modelo. En la fase exploratoria, este libro fue la parte de las principales fuentes para la comprensión del comportamiento térmico en los sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos, permitiendo identificar las variables críticas y los mecanismos de transferencia de calor que debían ser considerados en la optimización del aislamiento. Su contenido robusto sentó las bases para el diseño de una solución algorítmica confiable.

De este libro se extrajo el concepto fundamental y las formulaciones de la resistencia térmica, que constituyen el pilar metodológico para la resolución del modelo matemático en sus tres

configuraciones geométricas: pared plana, cilindro y esfera. La poderosa analogía eléctrica de la resistencia térmica, que permite sumar las oposiciones al flujo de calor a través de diferentes capas de materiales, fue directamente aplicada para determinar la resistencia total del sistema aislante y, consecuentemente, la tasa de pérdida de calor. Este enfoque permitió resolver de manera unificada y coherente la transferencia de calor en las distintas geometrías, siendo la base sobre la cual se sustentan los cálculos principales del modelo. Además, el hecho de que la analogía de resistencia térmica sea un método estándar y ampliamente aceptado en la ingeniería, y que el resto de las fuentes tomadas para el diagnóstico de este trabajo a menudo utilicen o se basen en las teorías y principios expuestos en libros como el de Çengel, refuerza la credibilidad y la robustez de las soluciones obtenidas por la herramienta desarrollada. Por todo esto, se describe este libro como un pilar que permitió asentar las bases teóricas de la transferencia de calor en el modelo, asegurando que su funcionamiento y sus resultados estén alineados con los principios físicos y de ingeniería más aceptados. La vastedad de conocimientos presentes en el libro, si bien no se traduce íntegramente en cada línea del trabajo final, ha sido una referencia constante y un conocimiento de fondo esencial que ha guiado todo el proceso de desarrollo y la toma de decisiones técnicas.

### **Entrevistas**

Para complementar la solidez del diseño del modelo y la herramienta computacional, se realizaron entrevistas no estructuradas a dos profesores especialistas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO), sede Barquisimeto. El objetivo de estas conversaciones fue recopilar perspectivas cualitativas sobre la relevancia del estudio, la pertinencia de la metodología propuesta y el potencial impacto de la herramienta desarrollada en el ámbito académico e industrial.

Desde la perspectiva del primer entrevistado, se enfatizó la dualidad existente en las prácticas de aislamiento térmico, reconociendo tanto la prevalencia de formas empíricas en la industria como la complejidad inherente a los cálculos precisos en situaciones reales. En este sentido, se destacó la relevancia de estudiar en profundidad todas las variables involucradas en el fenómeno de la transferencia de calor y el aislamiento, más allá de la mera obtención de un



producto final. Se destacó que, aun cuando no todos los factores puedan ser expresamente cuantificados en un modelo, su comprensión y análisis detallado pueden develar elementos cruciales para futuros estudios y para la profundización del tema. Por lo tanto, se consideró que la presente investigación constituye un significativo punto de partida para abordajes más complejos. Asimismo, se resaltó el valor práctico y el ahorro de tiempo que la herramienta computacional ofrecerá a las empresas. Este beneficio se extiende tanto a aquellas compañías encargadas de instalar sistemas de aislamiento, al optimizar sus procesos de diseño y selección, como a las empresas que poseen los sistemas a aislar, permitiéndoles una gestión más informada al conocer el origen y las propiedades de sus aislantes.

Por otra parte, el segundo entrevistado valoró la innovación inherente a la naturaleza de este trabajo de grado, destacó particularmente el enfoque integral de la investigación, que no se limita al estudio y formulación del modelo matemático, sino que abarca también el desarrollo y la implementación de la herramienta computacional. Este enfoque, que emplea medios distintos para llevar la idea a una ejecución sencilla y accesible, fue calificado como un importante incentivo para la comunidad estudiantil. Se considera que este tipo de proyectos puede fomentar el interés de los futuros ingenieros en la automatización de procesos y en el desarrollo de herramientas informáticas que permitan simular y estudiar escenarios de ingeniería realistas, promoviendo así la aplicación práctica de los conocimientos teóricos.

En síntesis, las perspectivas de ambos especialistas convergen en la validación de la pertinencia y la aplicabilidad de este estudio. Las entrevistas confirmaron que el desarrollo de un modelo matemático y una herramienta computacional para el cálculo óptimo-económico del aislamiento térmico no solo aborda una necesidad latente en la industria venezolana, sino que también establece un precedente valioso para la investigación y la enseñanza en el área de la ingeniería mecánica, abriendo puertas a futuras líneas de investigación y fomentando la innovación en la resolución de problemas de ingeniería.

## **Fase II: Diseño**

La fase correspondiente al diseño y el proceso del análisis de esta es fundamental para traducir los hallazgos del diagnóstico en una herramienta cuantificable y predictiva. En el contexto del presente trabajo, se enfoca en la conceptualización y desarrollo del modelo matemático que permitirá determinar el espesor óptimo-económico del aislamiento térmico en sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos. El diseño del modelo se estructura sobre la base de un entendimiento profundo de las interacciones entre las propiedades termodinámicas de los fluidos y materiales, y los factores económicos asociados a la inversión y operación del aislamiento.

### **Variables que Intervienen en el Proceso**

El punto de partida para la construcción de este modelo y la consideración primordial al optimizar un sistema de transporte o almacenamiento de fluidos que implique control térmico es comprender la intrincada relación entre la energía y los costos. El objetivo al realizar estas evaluaciones u optimizaciones no debe ser únicamente evitar pérdidas de calor, sino de hacerlo de la manera más eficiente desde un punto de vista técnico-económico. Este proceso de diseño exige una conceptualización clara de las variables que inciden en el comportamiento térmico del sistema y en su viabilidad financiera, buscando un equilibrio donde los beneficios de la reducción de pérdidas superen los costos de implementación del aislamiento. Así, el objetivo final es alcanzar la mínima sumatoria del costo de inversión en aislamiento y el costo de la energía perdida a lo largo del periodo de operación, un punto que define el espesor óptimo-económico.

Para el desarrollo del modelo matemático, es crucial establecer un conjunto de variables que permitan cuantificar tanto las pérdidas energéticas como los costos asociados al sistema de aislamiento. Al concebir un modelo que nos permita optimizar el aislamiento térmico en sistemas como tuberías industriales, es indispensable tomar en cuenta diversos aspectos que interactúan directamente con la eficiencia y rentabilidad. Se debe considerar que la energía, aunque se perciba como intangible, tiene un costo directo asociado a su generación, como ejemplo, el combustible quemado en calderas, así como cualquier pérdida térmica se traduce en un desperdicio económico.

En base a esto, se puede categorizar dos tipos de variables principales. Por una parte, se tienen las variables térmicas, estas variables son el fundamento para cuantificar la pérdida de calor, la cual se puede describir como el núcleo del costo energético del sistema. Al diseñar, se debe pensar en los principios de transferencia de calor involucrados en los sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos térmicos, conducción, convección y radiación. Se estudia cuáles de estos medios permanecen y rigen cómo el calor fluye desde el interior de la tubería hacia el ambiente. Además, se consideran propiedades fundamentales como las temperaturas de operación del fluido, temperatura ambiente, las dimensiones geométricas de los sistemas, las conductividades térmicas de los materiales de la tubería y del aislante. La correcta definición de estas variables permite establecer la relación funcional entre el espesor del aislamiento y la cantidad de energía que se pierde, lo cual es un insumo directo para el cálculo de los costos operativos.

Por otra parte, se establecen las variables económicas, estas se pueden considerar como el criterio final para la optimización. Así como se dijo inicialmente, al concebir el modelo se debe tener en cuenta que la inversión en aislamiento es un capital que genera un ahorro energético a lo largo del tiempo por lo que estos dos factores deben equilibrarse. Se incluyen los costos de adquisición del material aislante y su instalación, así como los costos unitarios del combustible, la eficiencia de la máquina térmica y las horas de operación del sistema. La integración de estas variables permite definir una función de costo total que, al ser minimizada, revelará el espesor de aislamiento que representa la mayor eficiencia económica para un período determinado.

### Variables Económicas

Ahora, de forma más específica y delimitada. Se tiene claro que, las variables económicas constituyen el eje central del criterio de optimización del modelo, ya que estas cuantifican los aspectos financieros directamente relacionados con la implementación y el rendimiento del sistema de aislamiento térmico. La determinación del espesor óptimo-económico se fundamenta en la minimización de un Costo total (el cual será denominado como  $C_t$ ) a lo largo de un periodo de evaluación, el mismo se compone principalmente de dos categorías; el costo de inversión y el costo de funcionamiento asociado a la energía perdida. La interrelación entre estos componentes es dinámica, es decir, un aumento en la inversión

inicial en aislamiento generalmente reduce las pérdidas energéticas, consecuentemente, los costos operativos y viceversa, entonces el fin es encontrar el punto de equilibrio donde la suma de ambos es mínima.

La función de Costo Total ( $C_t$ ) es la suma de dos componentes, Costo de Inversión ( $C_{inv}$ ) y Costo de Funcionamiento ( $C_{fn}$ ), los cuales poseen distintas variables a considerar para que el modelo cubra las necesidades requeridas. Bajo este orden de ideas se definen cada uno como:

- Costo de Inversión ( $C_{inv}$ ), este es el componente que representa la inversión de capital inicial requerida para la adquisición e instalación del material aislante. El Costo de Inversión es directamente dependiente del espesor del aislamiento seleccionado, así como el tipo de aislante y las proporciones o medidas del sistema a aislar, esta información es detallada dependiendo del proveedor. De manera más explícita, dicho coste se desglosa en dos variables, es decir:
  - Costo del Material: Refiere al valor de compra del material aislante propiamente dicho. Este costo varía significativamente según el tipo de material, su densidad, sus propiedades térmicas y el volumen requerido, el cual está directamente relacionado con el espesor del aislamiento y el área de la superficie a cubrir.
  - Costo de Instalación: Incluye la mano de obra, los equipos y los materiales auxiliares necesarios para el correcto montaje del aislamiento. Dentro de esto, se encuentran además costos asociados a instalaciones de sistemas como el de las pantallas protectoras de aluminio, más comúnmente denominadas como chaqueta, el cual se encuentra estandarizado y no depende del espesor del aislante, ya que esto es un protector para el aislante, más aún en exteriores.
- Costo de Funcionamiento ( $C_{fn}$ ), se describe como el componente que representa el costo operativo continuo derivado de la energía térmica que se disipa a través del sistema de aislamiento hacia el ambiente. Es una consecuencia directa de las pérdidas de calor que, aunque minimizadas por el aislamiento, nunca son nulas. El Costo de Funcionamiento se reduce a medida que el espesor del aislamiento aumenta, ya que una mayor capa aislante disminuye las pérdidas energéticas. Los factores que lo determinan son:

- **Energía Perdida:** Es la cantidad de calor que se transfiere desde el fluido caliente al ambiente a través de la tubería y el aislante en un determinado período de tiempo. Esto será descrito con mayor detalle en las variables térmicas.
- **Costo real del Combustible/Energía:** Representa el precio unitario del energético que se utiliza para generar el calor que eventualmente se pierde. Este costo se multiplica por la cantidad de energía perdida para obtener el costo económico total de esa pérdida.
- **Eficiencia de la Máquina Térmica:** La eficiencia de la caldera o el sistema de generación de vapor es un factor crucial, ya que las pérdidas de calor deben compensarse con una mayor entrada de energía en la máquina térmica, cuya eficiencia no es del 100%. Por lo tanto, el costo de la energía perdida se ve afectado por la eficiencia con la que se genera esa energía.
- **Horas de Operación Anual:** Para evaluar los costos en un período determinado, se consideran las horas de funcionamiento del sistema, lo que permite proyectar las pérdidas energéticas totales a lo largo del tiempo.

### Variables Térmicas

Al diseñar un sistema de aislamiento, es esencial comprender cómo el calor fluye a través de diferentes medios y superficies, lo que requiere la consideración de las propiedades físicas y las condiciones operativas. Estas variables permiten modelar el fenómeno de transferencia de calor, siendo el insumo directo para el cálculo de la energía perdida, la cual, como se estableció previamente, es una función directa del espesor del aislamiento. De esta forma, se establecen las siguientes variables claves para el diseño:

#### ➤ Temperaturas:

- **Temperatura del fluido:** Representa la temperatura del fluido, bien sea vapor o cualquier otro fluido transportado por una tubería o almacenado en un tanque. Es la principal fuente de calor que impulsa la transferencia hacia el exterior y se asume constante a lo largo del segmento de tubería para los cálculos de estado estacionario.

- Temperatura ambiente: Corresponde a la temperatura del aire circundante a la tubería aislada. La diferencia de temperatura entre el fluido y el ambiente es la fuerza impulsora fundamental del flujo de calor.
- Medios de Transferencia de Calor:
  - Conductividad térmica del material aislante: Es una de las propiedades más críticas, ya que define la capacidad del material para resistir el flujo de calor. Materiales con baja conductividad térmica son más efectivos como aislantes. Esta propiedad es función del tipo de material seleccionado y puede variar ligeramente con la temperatura.
  - Coeficiente de transferencia de calor por convección: Cuantifica la tasa de transferencia de calor entre la superficie externa del aislamiento y el aire ambiente debido a la convección. Este coeficiente depende de factores como la velocidad del aire (viento), la geometría del sistema a aislar y las propiedades físicas del aire.
- Dimensiones Geométricas: Estas variables definen la configuración física del sistema y la superficie a través de la cual ocurre la transferencia de calor. El modelo considerará diversas geometrías, como lo plantea Guaman K. (1984) en su análisis para la optimización de sistemas de aislamiento en su caso para superficies planas y cilíndricas.
  - Para configuraciones cilíndricas se deben considerar los diámetros externos de lo que puede ser una tubería o depósito.
  - Para sistemas esféricos, de igual forma se deben considerar los diámetros externos, en este caso de lo que puede ser un tanque.
  - En el caso de sistemas de pared plana, se debe considerar el área, que expresa la superficie por la cual ocurre la transferencia de calor.

Una vez establecidas estas variables en el análisis para el desarrollo del modelo, se deben consolidar en función de las ecuaciones, fórmulas y consideraciones obtenidas a lo largo del diagnóstico por medio de las fuentes primarias y secundarias, además de las necesidades o peticiones mencionadas en las entrevistas, así como los cálculos propios, por lo cual se comienza a estructurar la ecuación.

En primera estancia, con lo mencionado anteriormente se tiene como base que:

$$C_t = \text{Costo total del periodo a evaluar}$$

$$C_t = \text{Costo de inversión} + \text{Costo de funcionamiento}$$

$$C_t = C_{inv} + C_{fn}$$

Donde se estableció que,

$$C_{inv} = \text{Costo de instalación} + \text{Costo de material}$$

$$C_{inv} = C_i + C_m$$

Se debe resaltar que, el costo del material es directamente proporcional al volumen del aislante, así que esté vendrá dado por

$$C_m * V_{(espe)}$$

Siendo  $V_{(espe)}$  la función que calcula el volumen del material en función del espesor.

Donde:

- $C_m$ : Parámetro de coste por unidad de volumen del material aislante (\$/m<sup>3</sup>).
- $C_i$ : Parámetro inicial de coste o costo de instalación (\$).
- $V_{(espe)}$ : Volumen de la capa de aislante a instalar (m<sup>3</sup>). Función del espesor del aislamiento (esp), en (m).

Por otra parte, se detalló en el artículo publicado en Redalyc por Gilbert Hernández, Retirado Mediaceja y Laurencio Alfonso en 2016 y descrito en la Fase anterior, que puedo conocer el valor de la energía si se establece una relación entre la pérdida total de calor por unidad de longitud, el valor de las pérdidas energéticas, el costo de la energía y el tiempo de funcionamiento de la instalación al año, con esto se puede entonces desarrollar el costo del funcionamiento, el cual se expresa como,

$$C_{fn} = \text{Energía Perdida} + \text{Costo real de Combustible}$$

En el cual, se describe como energía perdida al calor perdido por el aislante multiplicado por el tiempo de funcionamiento, es decir,

$$E_{perdida} = \dot{Q}_{(esp)} * h$$

Y para el costo real de combustible se debe conocer la eficiencia térmica del sistema, aunque el artículo mencionado se desprecia, debemos implementarla ya que ésta en conjunto con el

costo teórico del combustible, que es aquel brindado por el proveedor, nos resaltará dicho coste real, lo cual se expresa entonces como,

$$\text{Costo real de combustible} = \text{Costo teorico de comb} + \text{Eficiencia del sistema}$$

$$C_{rc} = C_2 * \eta$$

De esta manera se obtiene entonces que el coste del funcionamiento se expresa de la forma,

$$C_{fn} = \dot{Q}_{(esp)} * h * C_2 * \eta$$

Donde:

- $C_2$ : Costo del combustible (\$/kW-h).
- $h$ : Tiempo de funcionamiento en horas.
- $\dot{Q}_{(esp)}$ : Cantidad de calor perdido (W). Función del espesor del aislamiento (esp), en (m).
- $\eta$ : Eficiencia térmica.

Para un periodo medido anualmente, se tiene el término que describe las horas de operación por año, este es,

$$h_a = h/a$$

Además, para una mejor consistencia de unidades al tener W debido al calor perdido y kW dentro del denominador en el costo de combustible, se homogenizan las unidades multiplicando por  $\times 10^{-3}$ , así como también se integran los años de vida útil del aislante, por lo cual el coste de funcionamiento es,

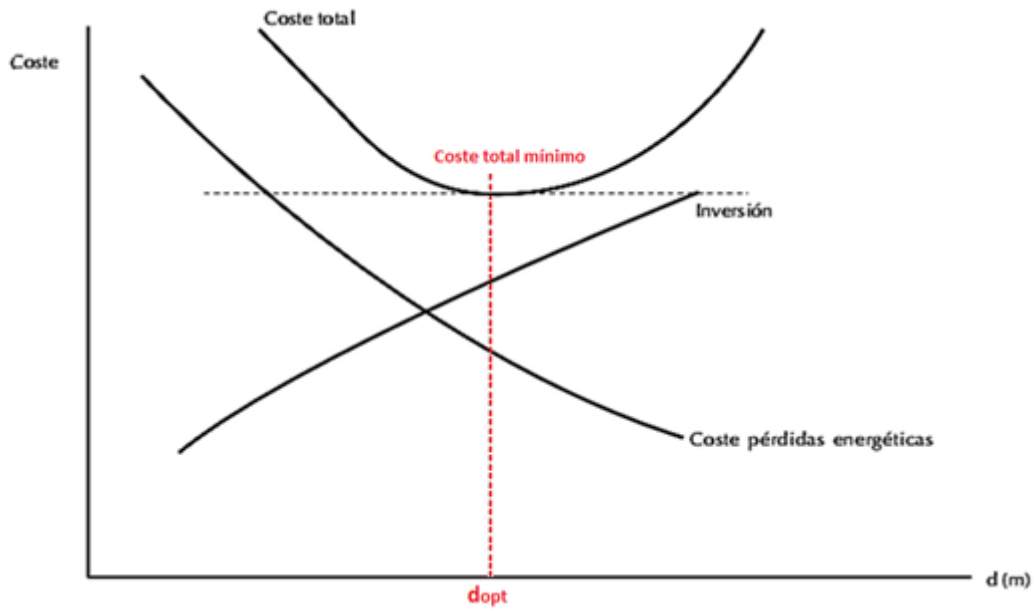
$$C_{fn} = \dot{Q}_{(esp)} * h_a * C_2 * a_{\bar{n}} * \eta \times 10^{-3}$$

Con todo esto se tiene que el costo total está dado por:

$$C_t = C_i + C_m * V_{(espe)} + \dot{Q}_{(esp)} * h_a * C_2 * a_{\bar{n}} * \eta \times 10^{-3}$$

Una forma de visualizar los costos de manera precisa y resumida es por medio de la figura (4) mencionada dentro del mismo artículo descrito para la evaluación del costo de las perdidas energéticas,





**Figura 4. Método de selección del espesor óptimo económico de aislamiento**

**Fuente: Isover 2004a**

Es de esta forma, que se puede observar el costo total mínimo como representación del espesor optimo-económico, punto en el cual se equilibran las pérdidas de calor y la inversión del aislamiento.

Ahora, el optimizar y conseguir dicho espesor que minimiza tanto las pérdidas monetarias como térmicas se traduce matemáticamente en obtener dicho mínimo local, este se obtiene aplicando la derivada con respecto al espesor a la función de costos totales y encontrando el dominio en el cual esta se anula.

Lo antes mencionado, se expresa de la forma,

$$\frac{d(C_t)}{desp} = \frac{d}{desp} [C_i + C_m * V_{(espe)} + \dot{Q}_{(esp)} * ha * C_2 * a_{\bar{n}} * \eta \times 10^{-3}] = 0$$

Así, derivando entonces respecto al espesor, se obtiene que,

$$C_m \dot{V}_{(esp)} + \ddot{Q}_{(esp)} * C_2 * ha * a_{\bar{n}} * \eta \times 10^{-3} = 0$$

Realizando un pequeño despeje para organizar términos se tiene entonces que,

$$\frac{\dot{V}_{(esp)}}{\ddot{Q}_{(esp)}} = -\frac{C_2 * ha * a_{\bar{n}} * \eta}{C_m} \times 10^{-3}$$

Es la ecuación diferencial que modela el espesor óptimo-económico en función del espesor. Antes de desarrollar las soluciones correspondientes, se deben establecer modelaciones matemáticas para el estudio de transferencia de calor en las configuraciones geométricas de estudio, las cuales como ya han sido mencionadas, vienen dadas por cilíndricas, esféricas y planas. Tal y como se menciona en la revista “*Redes de Ingeniería*” por Aristizábal, Schäfer y Barrera en 2014, los sistemas cilíndricos y esféricos a menudo experimentan gradientes de temperatura sólo en la dirección radial y se tratan como sistemas unidimensionales, por esta razón la teoría y ecuaciones de transferencia de calor son desarrolladas y aplicadas para este tipo de sistemas, teniendo entonces que la rapidez con la que se conduce la energía a través del sólido se expresa con,

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Además, sabemos que para el caso de pared plana es,

$$\dot{Q} = -kA \frac{T_1 - T_2}{L}$$

En dicha revista mencionada, además del resto de fuentes primarias, se destaca la obtención y el uso de la resistencia térmica como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor, en el cual para los casos de conducción se describe para el cilindro igual a,

$$R = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$$

Para esferas es,

$$R = \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k}$$

Por último, en el caso de paredes planas es,

$$R = \frac{L}{kA}$$

Para generalizarlo o estudiar la fuente de esto se obtiene una analogía de lo descrito en "*Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones*" para las redes de resistencias térmicas, el cual permite deducir que, si se toma en cuenta la Primera Ley de la Termodinámica, se analiza el caso de la transferencia de calor en cualquier cuerpo de cualquier forma geométrica de diferentes n capas, se puede observar que para una transferencia de calor en estado estacionario y sin generación de calor se obtiene la siguiente relación:

$$\left( \begin{matrix} \text{Razon de conveccion} \\ \text{entrante al cuerpo} \end{matrix} \right) = \left( \begin{matrix} \text{Razon de conduccion} \\ \text{en la primera capa} \end{matrix} \right) = \dots = \left( \begin{matrix} \text{Razon de conduccion} \\ \text{en la enesima capa} \end{matrix} \right) \\ = \left( \begin{matrix} \text{Razon de conveccion} \\ \text{saliente del cuerpo} \end{matrix} \right)$$

Por lo tanto, se puede escribir la siguiente expresión, para una pared plana:

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_1}{\frac{1}{h_a A_a}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_{1/2}}{k_{1/2} A_{1/2}}} = \dots = \frac{T_{n-1} - T_n}{\frac{L_{n-1/n}}{k_{n-1/n} A_{n-1/n}}} = \frac{T_n - T_b}{\frac{1}{h_b A_b}}$$

Usando el teorema “proporción a la serie de dos razones”, se puede escribir:

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_b}{\frac{1}{h_a A_a} + \frac{L_{1/2}}{k_{1/2} A_{1/2}} + \dots + \frac{L_{n-1/n}}{k_{n-1/n} A_{n-1/n}} + \frac{1}{h_b A_b}}$$

Gracias a la expresión anterior se puede calcular la razón de calor que fluye a través de una pared de n capas, sin tener a la mano, las n temperaturas intermedias.

Esto se puede extrapolar de la misma forma a las superficies cilíndricas, lo cual es,

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_b}{\frac{1}{h_a A_a} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi l_{1/2} k_{1/2}} + \dots + \frac{\ln(\frac{r_n}{r_{n-1}})}{2\pi l_{n-1/n} k_{n-1/n}} + \frac{1}{h_b A_b}}$$

De igual manera para esféricas, teniendo entonces,

$$\dot{Q} = \frac{T_a - T_b}{\frac{1}{h_a A_a} + \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k_{1/2}} + \dots + \frac{r_n - r_{n-1}}{4\pi r_{n-1} r_n k_{n-1/n}} + \frac{1}{h_b A_b}}$$

Una vez establecido métodos para soluciones a la ecuación modelo dada por,

$$\frac{\dot{V}_{(esp)}}{\ddot{Q}_{(esp)}} = - \frac{C_2 * ha * a_{\bar{n}} * \eta}{C_m} \times 10^{-3}$$

Se encuentran las soluciones para cada caso en base a su geometría. Como primer caso será tratado el de pared plana, por el cual se utilizarán cada uno de los parámetros establecidos para esta, resolviendo entonces tenemos que,

$$\dot{V}_{(plana)(esp)} = \frac{d}{desp} (A_s * e)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{(plana)(esp)} = A_s$$

$$\ddot{Q}_{(plana)(esp)} = \frac{d}{desp} \left( \frac{T_1 - T_2}{\frac{e}{kA_s} + \frac{1}{hA_s}} \right) = (T_1 - T_2) A_s \frac{d}{desp} \left( \frac{1}{\frac{e}{k} + \frac{1}{h}} \right)$$

Esto, es bajo las condiciones en la cual la temperatura del fluido es igual a la temperatura inicial a la cara de la pared en contacto, no hay convección interna, se desprecia la radiación y es una sola capa, de aquí se obtiene,

$$\ddot{Q}_{(plana)(esp)} = - \frac{(T_1 - T_2) A_s k h^2}{(eh + k)^2}$$

Ahora, se sustituye en la ecuación modelo y se tiene entonces que,

$$\frac{A_s}{\frac{-(T_1 - T_2)A_s k h^2}{(eh + k)^2}} = -\frac{C_2 * ha * a_{\tilde{n}} * \eta}{C_m} \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow \frac{(eh + k)^2}{k h^2 (T_1 - T_2)} = \frac{C_2 * ha * a_{\tilde{n}} * \eta}{C_m} \times 10^{-3}$$

Despejando el espesor se expresa entonces de la siguiente manera,

$$(eh + k)^2 = \frac{k h^2 C_2 * ha * a_{\tilde{n}} * \eta}{C_m} (T_1 - T_2) \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow eh + k = \sqrt{\frac{k h^2 C_2 * ha * a_{\tilde{n}} * \eta}{C_m} (T_1 - T_2) \times 10^{-3}}$$

Del cual solo se toma la parte positiva ya que  $e > 0, h > 0, k > 0$ ; por lo tanto,  $eh + k > 0$ .  
Entonces se puede decir que,

$$e = \sqrt{\frac{k h^2 C_2 * ha * a_{\tilde{n}} * \eta}{C_m} (T_1 - T_2) \times 10^{-3}} - \frac{k}{h}$$

El cual, nos da la solución para obtener el espesor optimo-económico para paredes planas en base al modelo desarrollado.

Ahora, análogamente se desarrolla la solución para configuraciones cilíndricas,

$$\dot{V}_{(cilindro)(esp)} = \frac{d}{desp} (\pi L (r_2^2 - r_1^2)), \text{ donde } e = r_2 - r_1$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{(cilindro)(esp)} = 2\pi L (e + r_1)$$

Además, se establece que  $r_1 \rightarrow r$ , así continuamos con

$$\ddot{Q}_{(cilindro)(esp)} = \frac{d}{desp} \left( \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\frac{\ln(e/r + 1)}{k} + \frac{1}{h(e+r)}} \right)$$

Considerando que la temperatura promedio del fluido es igual a la temperatura  $T_1$ , despreciando la radiación como se ha mencionado, tenemos

$$\begin{aligned} \ddot{Q}_{(cilindro)(esp)} &= \frac{2\pi L(T_1 - T_2)(k - h(e+r))hk}{(\ln(e/r + 1)h(e+r) + k)^2} \\ \Rightarrow \frac{2\pi L(e+r)}{\frac{2\pi L(T_1 - T_2)(k - h(e+r))hk}{(\ln(e/r + 1)h(e+r) + k)^2}} &= - \frac{C_2 * ha * a_{\bar{n}} * \eta}{C_m} \times 10^{-3} \\ \Rightarrow \frac{(\ln(e/r + 1)h(e+r) + k)^2(e+r)}{(h(e+r) - k)hk} &= \frac{C_2 * ha * a_{\bar{n}} * \eta}{C_m} (T_1 - T_2) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Por último, tenemos la solución para el caso de geometría esférica, en esta tenemos que

$$\begin{aligned} \dot{V}_{(esfera)(esp)} &= \frac{d}{desp} \left( \frac{4\pi}{3} (r_2^3 - r_1^3) \right), \text{ donde } e = r_2 - r_1 \\ \Rightarrow \dot{V}_{(esfera)(esp)} &= 4\pi L(e + r_1)^2 \end{aligned}$$

De igual manera se define que  $r_1 \rightarrow r$ , con esto establecido tenemos que

$$\begin{aligned} \ddot{Q}_{(cilindro)(esp)} &= \frac{d}{desp} \left( \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{4\pi(e+r)rk} + \frac{1}{4\pi(e+r)^2h}} \right) \\ \Rightarrow \ddot{Q}_{(esfera)(esp)} &= \frac{4\pi(T_1 - T_2)}{(eh(e+r) + rk)^2} (r^2kh(2k - h(e+r))(e+r) \end{aligned}$$

Sustituyendo en el modelo, se tiene que para obtener el espesor en geometrías esféricas,

$$\frac{\frac{4\pi(e+r)^2}{4\pi(T_1-T_2)}}{\frac{4\pi(T_1-T_2)}{(Ln(e/r+1)h(e+r)+k)^2}} = - \frac{C_2 * ha * a_{\tilde{n}} * \eta}{C_m} \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow \frac{(e+r)(eh(e+r)+rk)^2}{r^2kh(h(e+r)-2k)} = \frac{C_2 * ha * a_{\tilde{n}} * \eta}{C_m} (T_1 - T_2) \times 10^{-3}$$

Es importante destacar que, si bien el modelo ha sido diseñado y formulado para estas tres geometrías de análisis y para una única capa de material aislante, los principios fundamentales de transferencia de calor y la metodología de optimización económica son inherentemente flexibles y escalables. El uso de resistencias térmicas permite, en teoría, la extensión del modelo para considerar múltiples capas de distintos materiales aislantes, simplemente añadiendo sus resistencias en serie. Del mismo modo, aunque el alcance de esta investigación se ha limitado a estas configuraciones estándar por ser las más recurrentes en la industria y por la consecución de los objetivos del trabajo, la aproximación paramétrica podría sentar las bases para adaptar el modelo a geometrías más complejas como accesorios o formas irregulares, lo cual representa una valiosa línea de investigación futura.

En síntesis, la fase de diseño ha provisto la estructura matemática y la lógica de cálculo indispensable. Este sólido fundamento teórico y analítico es el punto de partida para la fase de implementación, donde el modelo será traducido a una herramienta computacional funcional, permitiendo la aplicación práctica de estas soluciones en escenarios industriales reales.

### **Fase III: Factibilidad**

El estudio de factibilidad constituye una fase crucial dentro del análisis de resultados, ya que permite valorar si la propuesta desarrollada puede ser implementada con éxito en condiciones reales. Según las definiciones abordadas previamente, la factibilidad de este trabajo puede analizarse desde tres enfoques principales; técnico, operativo y económico. Cada uno de ellos proporciona una perspectiva distinta y complementaria para validar la viabilidad del modelo físicomatemático propuesto y su herramienta computacional asociada. Es así como, a través de este análisis integral se determina la viabilidad y sostenibilidad del proyecto, respondiendo de manera factible a las necesidades u objetivos planteados considerando los recursos y el contexto de aplicaciones.

#### **Factibilidad Operativa**

La evaluación sistemática de factibilidad operativa constituye un elemento crítico en la valoración de la implementación potencial del modelo propuesto dentro del contexto organizacional, contemplando variables determinantes como las capacidades del recurso humano, nivel de aceptación por parte de los usuarios y la integración con las arquitecturas de los procesos preestablecidos. El presente desarrollo metodológico evidencia índices satisfactorios de factibilidad operativa, fundamentados en los parámetros técnicos y funcionales.

En base a lo antes descrito, se concluye que el presente trabajo es satisfactorio puesto que la utilización de este modelo no implica modificaciones estructurales de procesos existentes, sino que posiciona como un elemento complementario en el análisis técnico, económico y energético previo a la selección de materiales y el diseño de aislamiento térmico. Así, se fortalece la tanto planificación como la toma de decisiones del área de ingeniería, mantenimiento o análisis en estudios educativos acerca de este tipo de implementación, tanto en entidades públicas como privadas. Por otra parte, este modelo es una herramienta que puede ser utilizada para comprobar trabajos tercerizados y así evaluar si los valores proporcionados son los adecuados. Su naturaleza transparente, al estar basada en un modelo



matemático explícito e implementada en una plataforma accesible, permite una verificación sencilla y confiable de los resultados obtenidos por proveedores externos.

Para que el modelo sea factible en su totalidad operativa, se desarrolla una herramienta programada que presenta una arquitectura de interfaz concebida para ser intuitiva, adaptable y de fácil implementación; esto con el fin de optimizar los cálculos ya que, puede ser utilizada por profesionales en las áreas antes mencionadas, así como por personal técnico capacitado con conocimientos básicos en la manipulación de herramientas computacionales, integrándose fluidamente en los flujos de trabajo existentes.

Con respecto a dicho desarrollo, la interfaz de usuario ha sido diseñada con un enfoque en la simplicidad e intuición, pensando en ingenieros no especialistas en informática. Los campos de entrada están claramente etiquetados con sus unidades, y los resultados se presentan de forma legible y visualmente atractiva, incluyendo gráficos interactivos que facilitan el análisis de la curva de costo total. Esta facilidad de uso intrínseca fomenta una alta probabilidad de aceptación por parte de los usuarios finales, reduciendo la curva de aprendizaje y facilitando su rápida adopción en las operaciones diarias. Además, su estructura modular permite ajustarla a diferentes condiciones operativas, entre estos se encuentran el tipo de fluido, temperatura, longitud de la tubería o tipo de aislamiento, lo cual la hace versátil en entornos industriales diversos.

Al ser una aplicación web, la herramienta puede ser accedida desde cualquier dispositivo con un navegador web, ya sea ejecutándose localmente como un archivo ejecutable o desplegada en un servidor. Esta flexibilidad de acceso elimina barreras de compatibilidad con sistemas operativos o configuraciones de hardware específicas, haciendo que la herramienta esté fácilmente disponible para el personal relevante. Adicionalmente, la arquitectura modular del backend y frontend, junto con el uso de lenguajes de programación populares y bien documentados, simplifica el mantenimiento y la implementación de futuras actualizaciones. Los errores pueden ser depurados más fácilmente y nuevas funcionalidades pueden ser añadidas sin necesidad de reescribir toda la aplicación.

Más allá de su aplicación industrial, esta herramienta posee un valor educativo, al permitir la simulación de diversos escenarios y la visualización del impacto de las variables en la selección de espesor óptimo y los costos, facilita la comprensión de los principios de transferencia de calor y optimización económica. Esto la convierte en un recurso valioso para

la enseñanza y el aprendizaje, promoviendo la transferencia de conocimiento desde el ámbito académico a la práctica profesional y fomentando el interés en la automatización de cálculos de ingeniería.

### **Factibilidad Económica**

Como ya fue descrito, la valoración de la factibilidad económica se define por la capacidad del proyecto en generar beneficios cuantificables que superen los costos asociados a la implementación de este, considerando el uso eficiente de los recursos financieros, materiales y humanos. Para evaluar la factibilidad económica, se utilizan como sustento diferentes parámetros, los cuales serán expresos a continuación.

La aplicación del modelo propuesto cumple con el objetivo de optimizar de forma sustancial el consumo energético mediante la reducción significativa de pérdidas térmicas, lo que se traduce directamente en una reducción de consumo de combustible, pérdidas de materia prima o inversiones para el cálculo de los aislantes. Aunque la inversión inicial requerida para sistemas de aislamiento térmico suele percibirse como una preocupación en procesos industriales, el modelo implementado en la herramienta permite evaluarla desde su enfoque económico, lo cual facilita la determinación del punto de equilibrio de costos y la justificación de la inversión a través del análisis de los ahorros proyectados.

Anudado a esto, como se mencionó, la elección de tecnologías de código abierto elimina los costos asociados a licencias de software propietario, haciendo que la herramienta sea una solución accesible y de bajo costo para cualquier entidad, independientemente de su tamaño., lo cual reduce las barreras económicas para su adopción, especialmente en entidades pequeñas o medianas. Los costos asociados a la implementación se limitan principalmente al tiempo dedicado a la recopilación de datos de entrada y a la capacitación mínima necesaria para el uso de la herramienta, los cuales son considerablemente menores en comparación tanto con la adquisición de software comercial especializado.

El objetivo primordial del modelo es determinar el espesor de aislamiento que minimiza el costo total a lo largo de la vida útil del sistema. Esto se traduce directamente en:

- **Ahorros Energéticos Cuantificables:** Al seleccionar el espesor óptimo, se maximiza la reducción de las pérdidas de calor, disminuyendo el consumo de combustible o energía eléctrica.

- **Reducción de Costos Operacionales:** La inversión óptima en aislamiento previene el desgaste térmico de los equipos, minimizando la frecuencia de mantenimientos correctivos y las paradas no programadas, lo que impacta positivamente en la eficiencia operativa a mediano y largo plazo.

Finalmente, la utilización sistemática del modelo permite la planificación estratégica de inversiones en sistemas de aislamiento en función de las condiciones reales del entorno industrial, lo cual favorece decisiones informadas y rentables. Al mismo tiempo, permite evaluar sistemas implementados para así corroborar los valores y costes asignados por terceros, asegurando la transparencia y la optimización de los recursos económicos. La capacidad de realizar análisis comparativos entre diferentes opciones de aislamiento también facilita la selección de la alternativa más costo-efectiva a largo plazo.

### **Factibilidad Técnica**

La factibilidad técnica se centra en determinar si los recursos, la infraestructura, las herramientas y los conocimientos técnicos disponibles son adecuados para llevar a cabo el proyecto. Dicha evaluación implica analizar si la tecnología y los medios actuales permiten implementar la solución propuesta, garantizando que el estudio pueda desarrollarse sin inconvenientes desde el punto de vista técnico. En el contexto de la presente investigación, la factibilidad técnica del modelo matemático y la herramienta computacional se sustenta en varios pilares fundamentales.

En primer lugar, como anteriormente es descrito, La implementación se basa en un stack de tecnologías de código abierto, lo cual elimina la necesidad de adquirir un software especializado haciendo que la herramienta sea accesible para un amplio rango de usuarios. La ejecución del modelo no demanda hardware de alta gama, un servidor estándar o incluso una computadora personal con capacidades promedio pueden alojar el backend de Flask, mientras que el frontend solo requiere un navegador web. Los entornos de desarrollo son ligeros y ampliamente disponibles.

En segundo lugar, los conocimientos técnicos requeridos para el desarrollo del modelo matemático se encuentran dentro del alcance de la formación general como ingeniero mecánico. El manejo de los principios de transferencia de calor, las ecuaciones que rigen la

conducción y convección, así como las habilidades para el uso de herramientas computacionales para la automatización u optimización de los trabajos son competencias que forman parte del perfil de un ingeniero. Esto garantiza que el desarrollo y el mantenimiento de la herramienta sean técnicamente viables con los recursos humanos disponibles.

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto, que incluye la revisión bibliográfica, la formulación del modelo matemático basado en principios termodinámicos y de transferencia de calor, anudado a la implementación de este modelo es técnicamente factible y se alinea con los métodos de investigación y desarrollo de ingeniería. La disponibilidad de información técnica sobre las propiedades de los fluidos y los materiales aislantes, obtenida a través de fuentes confiables como y bases de datos, respalda la capacidad de obtener los datos de entrada necesarios para el modelo.

El modelo matemático se basa en principios físicos establecidos y las ecuaciones utilizadas son ampliamente reconocidas en el campo de la transferencia de calor. La integración de librerías científicas de alto rendimiento para la manipulación y resolución simbólica de ecuaciones, y para la resolución numérica de funciones complejas, garantiza la precisión y fiabilidad de los cálculos termodinámicos y económicos, incluyendo la determinación del espesor óptimo y el coeficiente de convección. Esto asegura que la complejidad matemática del modelo sea manejada con la exactitud requerida.

En resumen, la factibilidad técnica del proyecto se confirma por la disponibilidad de los recursos de software y hardware necesarios, la adecuación de los conocimientos técnicos del equipo desarrollador a los requerimientos del proyecto, la solidez de la metodología de desarrollo empleada y la accesibilidad a los datos de entrada necesarios. Esto asegura que la implementación del modelo y la herramienta computacional es técnicamente realizable y sostenible.

## Fase IV: Implementación

La Fase de implementación del proyecto se centra en la materialización del modelo matemático propuesto en una herramienta computacional funcional. Esta etapa es fundamental para transformar los principios termodinámicos y económicos, previamente definidos, en una aplicación práctica que permita a los ingenieros realizar cálculos de optimización del aislamiento térmico de manera eficiente y precisa. El objetivo es proporcionar una interfaz intuitiva que abstraiga la complejidad matemática subyacente, facilitando la toma de decisiones informadas en el ámbito de la eficiencia energética.

El desarrollo de la herramienta se concibió como una aplicación web, lo que garantiza accesibilidad y compatibilidad con diversas plataformas. Esta arquitectura se divide en dos componentes principales: un Backend (servidor), encargado de la lógica computacional y el procesamiento de datos, y un Frontend (interfaz de usuario), responsable de la interacción visual con el ingeniero usuario.

Para definir la estructura de dicha herramienta, se da entrada con la arquitectura de calculadora, organizada en dos módulos principales que interactúan para ofrecer la funcionalidad completa:

- Backend: O mejor descrito como la lógica de servidor y procesamiento. Este componente actúa como el cerebro de la aplicación, donde reside la inteligencia del modelo matemático. Está desarrollado utilizando la tecnología Flask, un framework que permite la construcción de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API RESTful). Sus principales funciones se componen por:
  - Core Computacional y Resolución de Ecuaciones: El núcleo de procesamiento matemático del modelo reside en este componente. Una función central (`solve_equation` en la lógica interna) es responsable de resolver las ecuaciones que definen el comportamiento térmico y económico del sistema. Para ello, recibe un conjunto completo de variables termodinámicas y económicas definidas por el usuario como las temperaturas, los diámetros, costos de combustible, vida útil, entre otras, la ecuación específica a resolver, por ejemplo, la función de costo total y la variable

incógnita a determinar, principalmente el espesor óptimo 'e', pero también otras como el radio crítico. La resolución de estas ecuaciones puede emplear dos enfoques complementarios:

- Resolución Analítica: Para ecuaciones que permiten un despeje directo o una solución explícita, el sistema utiliza capacidades de cálculo simbólico. Esto permite obtener soluciones exactas cuando es matemáticamente posible.
- Resolución Numérica: La necesidad de recurrir a métodos numéricos para la resolución de las soluciones del modelo, en particular aquellas que rigen la optimización del aislamiento, es fundamental y proviene de dos factores críticos inherentes a la naturaleza de los fenómenos de transferencia de calor y el análisis económico:
  - La no Linealidad de las Ecuaciones: La formulación matemática para el cálculo del espesor óptimo en configuraciones geométricas como cilindros y esferas, así como la función de costo total que integra múltiples variables interdependientes, resulta en ecuaciones inherentemente no lineales. Esta no linealidad hace que sea matemáticamente inviable o de manera práctica difícil despejar analíticamente la variable incógnita del espesor óptimo, para obtener una solución explícita. Recordando que, el espesor óptimo-económico o el valor que minimiza la función de costo, aparece de forma implícita dentro de la ecuación, lo que demanda un enfoque iterativo para su determinación.
  - Recursividad e Interdependencia de Parámetros: Un desafío adicional es la recursividad o el acoplamiento implícito de ciertos parámetros dentro del sistema de ecuaciones. Por ejemplo, el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_c$ ), vital para calcular las pérdidas de calor, a menudo depende de la temperatura superficial exterior del aislamiento. A su vez, esta temperatura superficial es una

función directa del espesor del aislamiento que se está intentando optimizar. Esta interconexión circular de dependencias imposibilita la escritura de un algoritmo de cálculo secuencial directo sin recurrir a un proceso iterativo que, partiendo de una estimación inicial, refine progresivamente los valores hasta alcanzar una convergencia satisfactoria.

Por lo antes descrito, el sistema recurre a un algoritmo de búsqueda de raíces para encontrar el espesor que minimiza la función de costo. Específicamente, se utiliza el método de Brentq, con un máximo de 50 iteraciones y con una tolerancia de convergencia de  $10^{-6}$ , implementado a través de la librería SciPy de Python. Este algoritmo es altamente eficiente, robusto y está diseñado para encontrar las raíces de funciones continuas dentro de un intervalo definido, garantizando la convergencia hacia la solución buscada. Su elección se justifica por su fiabilidad en problemas de optimización unidimensional con funciones no lineales y por su capacidad para manejar la naturaleza implícita de las ecuaciones.

- Cálculos de Coeficientes de Convección: Una parte integral del proceso de resolución es la determinación precisa del coeficiente de transferencia de calor por convección, que es crucial para cuantificar las pérdidas de calor. El backend incluye una lógica especializada llamada `calculate_convection_coefficient` en la lógica interna que, basándose en el tipo de ambiente (interior/exterior) y la orientación de la superficie (horizontal/vertical) especificados por el usuario, selecciona y resuelve la correlación termodinámica más adecuada para el coeficiente. Este cálculo se integra automáticamente en la resolución de la ecuación principal de costo total cuando se determina el espesor óptimo-económico, asegurando que la estimación de la pérdida de energía sea lo más precisa posible dentro del alcance del modelo. Las ecuaciones y el cálculo pertinente para emplear

dentro de la programación para obtener el coeficiente de convección, se describirá más adelante.

- Interacción mediante APIs (Endpoints): La comunicación entre el frontend y este núcleo de procesamiento se realiza a través de un conjunto de APIs (Application Programming Interfaces). Estas APIs actúan como puntos de acceso estandarizados para las solicitudes del frontend, de manera un poco más específica, tenemos:
  - `/solve_equation`: Esta es la API principal de cálculo, siendo entonces el *endpoint* fundamental al que el frontend envía todos los parámetros de entrada del usuario. Tras recibir la información, el backend invoca el núcleo computacional para resolver la ecuación relevante (sea para el espesor óptimo, radio crítico, u otros parámetros) y retorna los resultados al frontend.
  - `/plot_espesor`: Es la API para graficación, cuando el usuario desea visualizar las curvas de costo o la relación de otras variables con el espesor, el frontend envía una solicitud a este *endpoint*. El backend itera sobre un rango de valores de una variable específica, realizando múltiples cálculos a través del núcleo computacional para generar los datos necesarios para construir las gráficas de manera dinámica.
  - *Endpoints* menores: Existen algunos endpoints menos detallados, como `/equation_info` o `/variables_leyenda` que facilitan la transparencia y la usabilidad, proporcionando metadatos sobre las ecuaciones o descripciones de las variables al frontend. En términos de organización interna, el Backend separa lógicamente los servicios de cálculo, es decir, donde está la implementación directa de las ecuaciones y algoritmos, de la interfaz de la API que define cómo se comunican el frontend y el backend, promoviendo un diseño modular y mantenible.
- Frontend: Es lo que llamamos interfaz de usuario y la experiencia con esta. Es aquel componente que representa la parte visible y con la que interactúa directamente el usuario. Está construido utilizando tecnologías estándar de desarrollo web como



HTML, para la estructura del contenido; CSS, para el estilo y la apariencia visual; y JavaScript, para la lógica interactiva del lado del cliente. Sus funciones clave son:

- **Entrada de Datos:** Provee un conjunto intuitivo de campos de entrada o también llamados formularios, donde el usuario puede introducir las variables termodinámicas y económicas específicas de su caso. Esto también permite la selección de la geometría del sistema y las condiciones ambientales. Todo para realizar el cálculo personalizado a las configuraciones de su sistema, dentro del alcance del modelo y de lo empleado en la herramienta.
- **Visualización de Resultados:** Presenta los resultados del cálculo de manera clara y organizada, incluyendo el espesor óptimo-económico, el radio crítico para geometrías cilíndricas y esféricas, además, el coeficiente de convección calculado.
- **Representación Gráfica:** Permite la generación de gráficos interactivos que ilustran la relación entre el espesor del aislamiento y los costos asociados. Esta funcionalidad es fundamental para que el ingeniero visualice el punto de mínima inversión/operación y comprenda la sensibilidad de la optimización a las diferentes variables.
- **Gestión de Parámetros:** Incluye funcionalidades para guardar y cargar conjuntos de parámetros de entrada, lo que facilita la realización de análisis de diferentes escenarios o la reutilización de datos sin necesidad de reintroducirllos manualmente. Este diseño busca proporcionar una experiencia de usuario fluida y eficiente, donde la complejidad de los cálculos se maneja en el servidor, mientras que el ingeniero se enfoca en la entrada de datos y la interpretación de los resultados para la toma de decisiones en el diseño de sistemas de aislamiento.

### Cálculo de Coeficiente de Convección

Para el cálculo del modelo, en cada caso geométrico, es necesario como fue mencionado en las variables térmicas, tener calculado el coeficiente de transferencia de calor por convección. Esto es necesario ya que, a diferencia del coeficiente de conducción, este se encuentra

estrechamente relacionado a la geometría de la superficie, las características físicas del fluido y las configuraciones ambientales del lugar donde se encuentra el sistema a aislar.

Aunque el cálculo preciso de este coeficiente puede variar considerablemente según la configuración geométrica y las condiciones de flujo, es posible emplear correlaciones y ecuaciones empíricas generalizadas. Si bien estas expresiones representan aproximaciones, no soluciones exactas, resultan ser herramientas altamente valiosas y suficientemente precisas para fines de ingeniería.

En este marco, el número de Nusselt se presenta como un parámetro adimensional esencial. Este número establece una correlación directa y fundamental con el coeficiente de convección, facilitando su estimación en una amplia gama de escenarios de transferencia de calor. Ya que este es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre comparado con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción, así:

$$Nu = \frac{h * Lc}{k}$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente (W/m<sup>2</sup>).
- Lc: Longitud característica (m).
- k: Coeficiente de conductividad térmica en (W/m°C).

La determinación del coeficiente de convección (h), si bien fundamental, puede ser un proceso complejo para cada caso específico. No obstante, existen **correlaciones empíricas** que permiten estimar este número adimensional relacionándolo con otras variables igualmente adimensionales, las cuales caracterizan el flujo y la geometría donde ocurre el fenómeno de transferencia de calor. Entre estas variables se encuentran el número de Reynolds (Re), el número de Prandtl (Pr), el número de Rayleigh (Ra) y el número de Grashof (Gr). De esta manera, una correlación general para el número de Nusselt (Nu) puede expresarse en la forma:

$$Nu = f(Re; Pr; Ra; Gr)$$

$$Nu = C * Re^n * Pr^m * Ra^p * Gr^z$$

Donde C, n, m, p y z son constantes dimensionales cuyos valores son obtenidos a través de la experimentación. La inclusión de estas constantes permite que la ecuación generalizada se ajuste a diversas configuraciones y condiciones, proporcionando aproximaciones confiables y válidas para el cálculo del coeficiente de convección.

Es importante señalar que, debido a la complejidad de la determinación exacta del coeficiente de transferencia de calor por convección para cada escenario particular, y considerando los límites del alcance de este trabajo de grado, el presente estudio se enfocará en proporcionar y emplear ecuaciones como correlaciones específicas para casos definidos. Estas ecuaciones, si bien ofrecen un valor aproximado del coeficiente de convección, resultan ser suficientemente precisas para los propósitos del modelo matemático que se implementará. En base a esto, se extraen las ecuaciones recolectadas de la fuente secundaria “Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial” detallada en la Fase Diagnóstico, para los casos a estudiar los cuales son:

1. Interior de los edificios: En este, se puede asimilar lugares donde la velocidad del viento sea muy pequeña, donde pueda existir una convección natural, es por esto que se tienen cuatro ecuaciones, según su criterio se elegirá una u otra.

➤ Paredes planas o tuberías que estén verticalmente:

- Flujo laminar ( $H^3 * \Delta T \leq 10m^3K$ ).

$$h = 1.32 * \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{H}} = 1.32 * \sqrt[4]{\frac{T_c - T_a}{H}} \quad (1)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente ( $W/m^2$ ).
  - Ta: Temperatura de ambiente ( $^{\circ}C$ ).
  - Tc: Temperatura superficial media o promedio de la chaqueta ( $^{\circ}C$ ).
  - H: Altura de la pared o diámetro de la tubería (m).
- Flujo turbulento ( $H^3 * \Delta T \geq 10m^3K$ ).

$$h = 1.74 * \sqrt[3]{\Delta T} = 1.74 * \sqrt[3]{T_c - T_a} \quad (2)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente (W/m<sup>2</sup>).
- Ta: Temperatura de ambiente (°C).
- Tc: Temperatura superficial media o promedio de la chaqueta (°C).
- H: Altura de la pared o diámetro de la tubería (m).

➤ Paredes planas o tuberías que estén horizontalmente:

- Flujo laminar ( $H^3 * \Delta T \leq 10m^3K$ ).

$$h = 1.25 * \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{H}} = 1.25 * \sqrt[4]{\frac{T_c - T_a}{H}} \quad (3)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente (W/m<sup>2</sup>).
- Ta: Temperatura de ambiente (°C).
- Tc: Temperatura superficial media o promedio de la chaqueta (°C).
- H: Altura de la pared o diámetro de la tubería (m).

- Flujo turbulento ( $H^3 * \Delta T > 10m^3K$ ).

$$h = 1.21 * \sqrt[3]{\Delta T} = 1.21 * \sqrt[3]{T_c - T_a} \quad (4)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente (W/m<sup>2</sup>).
- Ta: Temperatura de ambiente (°C).
- Tc: Temperatura superficial media o promedio de la chaqueta (°C).

- H: Altura de la pared o diámetro de la tubería.

2. Exteriores de edificios: Para este caso, se puede asimilar lugares donde la velocidad del viento sea considerable y exista convección forzada, nuevamente, se tienen cuatro ecuaciones, que según una prueba lógica inicial se elegirá una u otra, tales son:

➤ Paredes planas o tuberías que estén verticalmente:

- Flujo laminar ( $v * H \leq 8m^2/s$ ).

$$h = 3.96 * \sqrt{\frac{v}{H}} \quad (5)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente ( $W/m^2$ ).
- v: Velocidad del viento (m/s).
- H: Altura de la pared o diámetro de la tubería (m).

- Flujo turbulento ( $v * H > 8m^2/s$ ).

$$h = 5.76 * \sqrt[5]{\frac{v^4}{H}} \quad (6)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente ( $W/m^2$ ).
- v: Velocidad del viento (m/s).
- H: Altura de la pared o diámetro de la tubería (m).

➤ Paredes planas o tuberías que estén horizontalmente:

- Flujo laminar ( $v * H \leq 8.55m^2/s$ ).

$$h = \frac{8.1 * 10^{-3}}{H} + 3.14 * \sqrt{\frac{v}{H}} \quad (7)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente ( $\text{W/m}^2$ ).
  - v: Velocidad del viento (m/s).
  - H: Altura de la pared o diámetro de la tubería (m).
- Flujo turbulento ( $v * H > 8.55 \text{ m}^2/\text{s}$ ).

$$h = 8.9 * \frac{v^{0.9}}{H^{0.1}} \quad (8)$$

Donde:

- h: Coeficiente de transmisión de calor al ambiente ( $\text{W/m}^2$ ).
- v: Velocidad del viento (m/s).
- H: Altura de la pared o diámetro de la tubería (m).

Nota: Las ecuaciones que dependen del diferencial de temperatura, para el cálculo de la convección, este diferencial no puede superar los  $100^\circ\text{C}$  o  $100\text{K}$ , ya que incurriría en porcentajes de errores muy altos.

Para conductos cilíndricos con un diámetro menor de  $0,25 \text{ m}$ , la parte convectiva del coeficiente externo puede ser calculado en buena aproximación por la ecuación (5).

Para mayores diámetros, por ejemplo,  $De > 0,25 \text{ m}$  la ecuación para paredes planas, ecuación (1) puede aplicarse. La exactitud respectiva es de 5% para diámetros mayores de  $0.4 \text{ m}$  y 10% para diámetros  $0,25 < De < 0,4 \text{ m}$ . La ecuación (1) también se usa para conductos con sección rectangular, con una anchura y altura de similar magnitud.

Para el cálculo de la temperatura superficial, las expresiones (1) y (2) debieran ser usadas para la pared y la tubería en lugar de las fórmulas (5) y (8) cuando no está establecida la presencia de aire.

Para paredes horizontales en superficies al exterior, en caso de flujo laminar se aplicaría la ecuación (5) y la (6) en caso de flujo turbulento.

Es así como se puede culminar la fase de implementación con la materialización del modelo matemático y sus algoritmos en la herramienta computacional interactiva y funcional descrita. Esta "calculadora" representa el resultado tangible de todo el proceso de diseño e implementación, consolidando las complejidades teóricas en una interfaz amigable que facilita la aplicación práctica de la optimización del aislamiento térmico. A continuación, se presenta una ilustración de cómo cada sección permite la interacción del usuario y la obtención de resultados bajo una visión general de la calculadora por medio de un ejemplo.

Como anteriormente se ha descrito, la calculadora está diseñada para capturar todos los parámetros necesarios para la ejecución del modelo termoeconómico. La precisión de los cálculos de espesor óptimo depende directamente de la calidad y veracidad de estos datos. Dichas variables de entrada se agrupan de manera lógica para facilitar la interacción del usuario, las cuales vienen dadas específicamente por:

## Calculadora de Aislamiento

### Parámetros de Cálculo

Tipo de Cálculo

Óptimo económico cilindro

Tipo de Entorno

Interior

Orientación

Horizontal

Vida Útil del Aislamiento (años)

15

Precio del Combustible (\$/kWh)

0,04

Eficiencia del Sistema (%)

85

Temperatura de la Superficie  
(°C)

50

Temperatura Ambiente (°C)

28

Temperatura Interna maxima  
(°C)

180

Velocidad del Viento (m/s)

2,1

Diámetro (m)

0,1016

Costo volumetrico del  
Aislamiento (\$/m³)

2205,48

Conductividad Térmica del  
Aislamiento (W/mK)

0,049

Coefficiente de Convección  
(W/m²K)

0

Horas de Funcionamiento  
(horas/año)

7968

Para optimizar la experiencia del usuario, minimizar errores de entrada y estandarizar ciertos datos, la calculadora incorpora listas seleccionables en puntos clave. Estas listas permiten al



usuario elegir entre opciones predefinidas y comunes, lo que agiliza el proceso de ingreso de datos y asegura la consistencia de los parámetros utilizados en los cálculos, los cuales en nuestro alcance se encuentra:

The image shows three configuration dropdown menus:

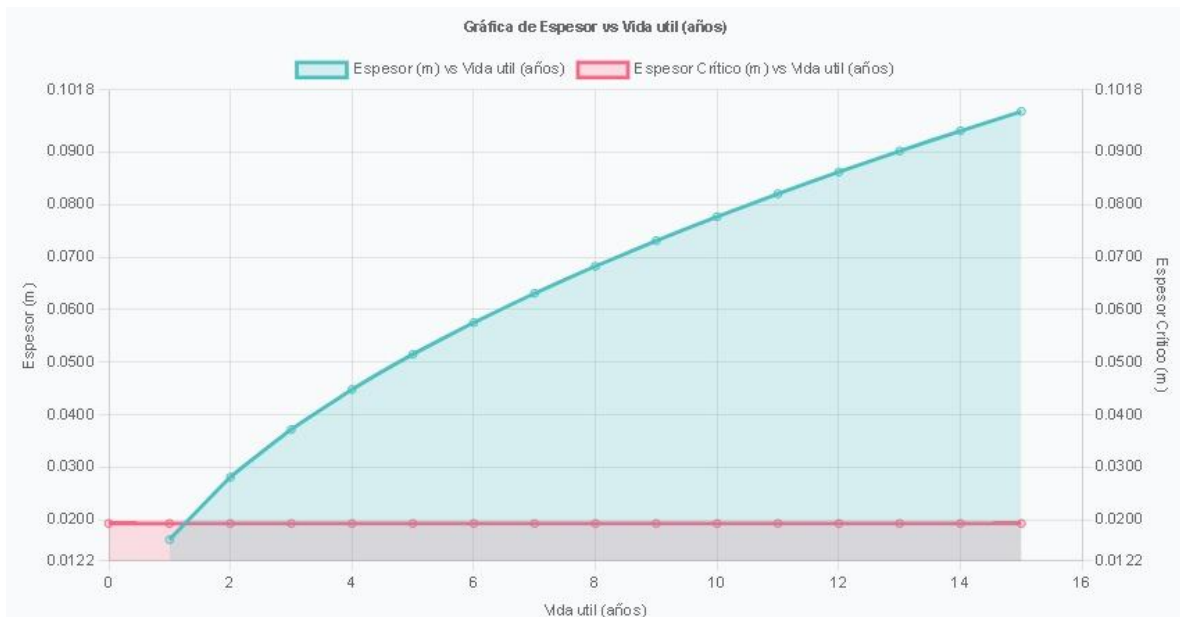
- Tipo de Cálculo:** Options include "Óptimo económico plano", "Óptimo económico cilindro", and "Óptimo económico esfera".
- Tipo de Entorno:** Options include "Interior" and "Exterior".
- Orientación:** Options include "Vertical" and "Horizontal".

Una característica extra de la calculadora es su capacidad para generar visualizaciones gráficas interactivas. Estas gráficas son de beneficio para la interpretación de los resultados de la optimización, permitiendo a los ingenieros comprender rápidamente la relación entre las variables y los costos. Las opciones de gráficas disponibles incluyen:

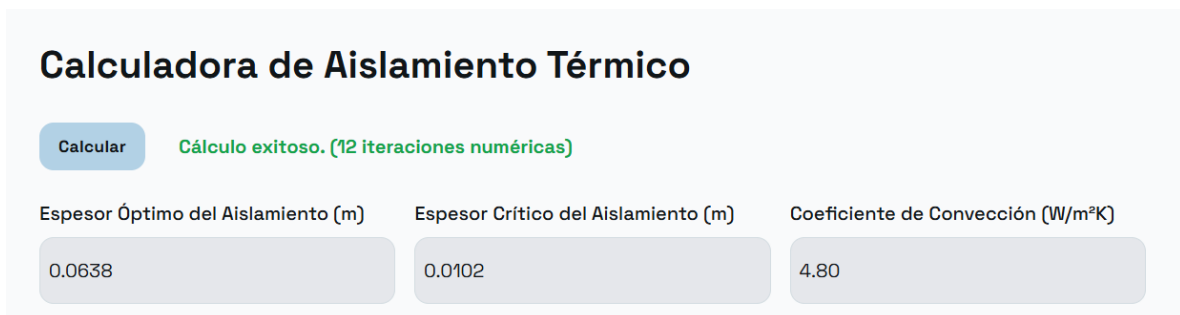
The image shows the "Gráfico" configuration interface:

- Seleccionar Variable:** A dropdown menu with options like "Temperatura ambiente (°C)", "Temperatura superficial (°C)", "Temperatura interna máxima (°C)", "Velocidad del viento (m/s)", "Conductividad térmica (W/mK)", "Diámetro (m)", "Costo volumétrico (\$/m³)", "Precio combustible (\$/kWh)", "Periodo operación (horas/año)", "Vida útil (año)", and "Eficiencia (%)".
- Minimo:** An input field for the minimum value.
- Máximo:** An input field for the maximum value.
- Paso:** An input field for the step value.

Como un gran ejemplo, se destaca el uso de esta para ver la variación del espesor óptimo-económico con respecto a la vida útil, ya que esto es una de las bases del modelo, de manera más clara, un ejemplo es:



Una vez que el usuario ingresa los datos y ejecuta el cálculo, la calculadora presenta de manera clara y organizada las variables de salida, que son los resultados directos del modelo de optimización. Estas variables proveen la información clave para la toma de decisiones, las cuales son:



Por último, pero no menos importante, para mejorar la eficiencia y la consistencia en el uso repetitivo de la herramienta, se ha implementado una funcionalidad que permite al usuario guardar y cargar configuraciones de parámetros localmente. Este "Catálogo de Parámetros" es una característica muy valiosa, ya que los usuarios pueden guardar conjuntos completos de datos de entrada como plantillas, así se evita la necesidad de reintroducir manualmente los mismos datos en cálculos futuros o para diferentes escenarios de un mismo proyecto, concluyendo con que estos datos se guardan directamente en el navegador del usuario.

**Parámetros Guardados**

Lana de roca

CargarEliminar

Silicato de calcio

CargarEliminar

Guardar Parámetros Actuales

Finalmente, una vista generalizada y ampliada de la web que refleja los calculo, con un ejemplo claro es:

Calculadora de Aislamiento

Parámetros de Cálculo

Tipo de Cálculo

Óptimo económico cilindro

Tipo de Entorno

Interior

Orientación

Vertical

Vida Útil del Aislamiento (años)

15

Precio del Combustible (\$/kWh)

0,04

Eficiencia del Sistema (%)

85

Temperatura de la Superficie (°C)

50

Temperatura Ambiente (°C)

28

Temperatura Interna maxima (°C)

180

Velocidad del Viento (m/s)

2,1

Diámetro (m)

0,1016

Costo volumetrico del Aislamiento (\$/m³)

2205,48

Conductividad Térmica del Aislamiento (W/mK)

0,049

Coefficiente de Convección (W/m²K)

Horas de Funcionamiento (horas/año)

7968

Calculadora de Aislamiento Térmico

Calcular

Cálculo realizado. Iteraciones: 12

Espesor Óptimo del Aislamiento (m)

0.0689

Espesor Crítico del Aislamiento (m)

0.0097

Coefficiente de Convección (W/m²K)

5.06

Parámetros Guardados

Lana de roca

Cargar

Eliminar

Silicato de calcio

Cargar

Eliminar

Guardar Parámetros Actuales

Gráfico

Seleccionar Variable

Conductividad térmica (W/mK)

Mínimo

0,01

Máximo

0,2

Paso

0,005

Graticar

Gráfica generada exitosamente.

Gráfica de Espesor vs Coeficiente de conductividad térmica (W/m²C)

Espesor (m) vs Coeficiente de conductividad térmica (W/m²C)

Espesor Crítico (m) vs Coeficiente de conductividad térmica (W/m²C)

Coefficiente de conductividad térmica (W/m²C)	Espesor Óptimo (m)	Espesor Crítico (m)
0,01	0,0400	0,0000
0,02	0,0500	0,0000
0,04	0,0600	0,0000
0,06	0,0650	0,0000
0,08	0,0680	0,0000
0,10	0,0700	0,0000
0,12	0,0720	0,0000
0,14	0,0740	0,0000
0,16	0,0750	0,0000
0,18	0,0760	0,0000
0,20	0,0770	0,0000

Seleccionar Visualización Secundaria

Espesor crítico

Exportar Datos

84

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **Conclusiones**

El presente trabajo de grado ha abordado el desafío de proporcionar una herramienta rigurosa y accesible para la determinación del espesor óptimo-económico del aislamiento en sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos. Las principales conclusiones derivadas de este estudio son las siguientes.

Se logró establecer los parámetros de ingreso y salida fundamentales para el dimensionamiento del espesor de aislamiento térmico, garantizando la recopilación de datos pertinentes para el cálculo preciso de las pérdidas energéticas y la evaluación económica.

Se desarrolló un modelo matemático robusto y versátil capaz de calcular el espesor óptimo-económico del aislamiento térmico, la formulación se basa en la minimización de la función de costo total, estableciendo una metodología clara para identificar el punto óptimo donde los ahorros compensan la inversión.

Se completó exitosamente la fase de diseño de una herramienta computacional, que traduce el modelo matemático en una estructura lógica y operativa. El diseño de esta se enfocó en la eficiencia y la practicidad para el usuario final, delineando una interfaz intuitiva y funcionalidades clave para la gestión de datos.

No menos importante, se culminó con la materialización del diseño de dicha herramienta por medio de la implementación de la misma a través de una aplicación web ejecutable y completamente funcional.

#### **Recomendaciones**

Una vez concluido el trabajo, para futuras investigaciones y mejoras del modelo y la herramienta computacional desarrollada, se proponen las siguientes recomendaciones:

Inicialmente, se recomienda adaptar el modelo para el análisis de aislamiento en frío, considerando fenómenos como la condensación y la formación de hielo, lo cual es fundamental en la industria de la refrigeración y criogenia.

Si bien el estudio del espesor óptimo para múltiples capas de diferentes materiales aislantes es técnicamente posible y representa una profundización del análisis de optimización, no forma parte de los objetivos específicos de esta investigación y se propone como una línea de trabajo futuro.

De igual forma, el modelo base tiene la capacidad de ser parametrizado para abordar configuraciones geométricas más complejas o específicas que generen pérdidas de calor, el estudio detallado se recomienda para un análisis de un trabajo futuro. En conjunto, se recomienda explorar e incorporar correlaciones más detalladas y especializadas para el coeficiente de convección en condiciones de flujo o dichas geometrías no ideales.

Incorporar al modelo características de las propiedades térmicas de los materiales al ser expuestas a altas temperaturas a lo largo del tiempo, lo cual puede conllevar a una degradación o envejecimiento del material aislante, esto para una predicción más realista de su rendimiento y costos a largo plazo.

Explorar la posibilidad de implementar una interfase (API) o una capa de compatibilidad para la integración con software de diseño asistido por computadora (CAD) o ingeniería asistida por computadora (CAE) de código abierto, como FreeCAD, para agilizar el flujo de trabajo en el diseño de plantas industriales, permitiendo la importación/exportación de geometrías o parámetros.

Por último, no menos importante, se recomienda realizar estudios de caso exhaustivos y validación en plantas industriales reales para calibrar el modelo en escenarios operativos complejos. En estos casos, o también de forma general, se recomienda incorporar la evaluación de la viabilidad económica del proyecto de aislamiento a través de indicadores financieros ampliamente aceptados en la ingeniería económica, tales como la Tasa Interna de Retorno (TIR o Internal Rate of Return - IRR), y el análisis detallado del Período de Recuperación (Payback Period) con y sin descuento. Estos indicadores proporcionarían una visión más completa de la rentabilidad y el atractivo financiero de la inversión en aislamiento

a lo largo de su vida útil, permitiendo una comparación directa con otras oportunidades de inversión.

Para lo antes mencionado, se recomienda implementar análisis de sensibilidad multifactoriales que evalúen cómo las variaciones en los costos del combustible, las tasas de interés, la inflación, los precios de los materiales aislantes, y otros factores económicos, impactan el espesor óptimo y la rentabilidad global del proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvinos. (s.f.). *Características tanques almacenamiento*. Alvinos. Recuperado de: <https://www.alvinos.com/caracteristicas-tanques-almacenamiento/>

Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (6.<sup>a</sup> ed.). Episteme.

Aristizábal, J. D., Schäfer, A., & Barrera, M. (2014). Análisis de pérdidas energéticas y económicas por transporte de vapor en tuberías sin un adecuado aislamiento térmico. *Redes de Ingeniería*, 1(2), 21-36. Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Redin/article/view/7614>

Área Tecnología. (s.f.). *Resistencia térmica*. Área Tecnología. Recuperado de: <https://areatecnologia.com/materiales/resistencia-termica.html>

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Coelho J. (2010), Análisis para la Selección de Elementos Flexibles de Transmisión de Potencia Mediante Algoritmos Matemáticos y los Mostrados por Software de Simulación.

Cohen, L., & Manion, L. (1990). *Research Methods in Education* (3rd ed.). Routledge.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) & Secretaría de Energía (SENER). (2009). *Beneficios del aislamiento térmico en la industria* (V. 1.1). Recuperado de: <https://www.gob.mx/conuee/documentos/beneficios-del-aislamiento-termico-en-la-industria>

Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

Fenercom. (2017). *Guía de buenas prácticas en el aislamiento industrial*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/guias/gbi-aislamiento-industrial.pdf>

Fideas. (2006). *Metodología de la investigación: Teoría y práctica*. FIDEAS.



Gilbert Hernández, Retirado Mediaceja y Laurencio Alfonso (2016). *Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor*.

Grupo Acura. (2022). *Tanque enchaquetado: la solución para controlar la temperatura de tus tanques industriales*. Grupo Acura. Recuperado de: <https://grupoacura.com/es/blog/tanque-enchquetado/>

Grupo Acura. (2022). *Tanques de almacenamiento: Tipos y aplicaciones*. Grupo Acura. Recuperado de: <https://grupoacura.com.mx/blog/tipos-de-tanques-de-almacenamiento/>

Guamán, K. (1984). *Optimización de espesores para sistemas de aislamiento térmico en centrales de vapor* [Tesis de grado]. Universidad Central del Ecuador.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4a ed.). Prentice Hall.

Isover. (s.f.). *¿Por qué el espesor es importante en la aislación térmica?* Isover. Recuperado de: <https://www.isover.com.ar/faq/porque-el-espesor-es-importante-en-la-aislacion-termica>

Kreith, F. (1999). *Principios de transferencia de calor*. Cengage Learning.

Ley Derecho. (s.f.). *Transporte de fluidos*. Ley Derecho. Recuperado de: <https://www.leyderecho.org/transporte-de-fluidos/>

Maranto, M., & González, M. (2015). *Manual de metodología de la investigación científica*. Eudeba.

Tamayo y Tamayo, M. (2004). *El proceso de investigación científica* (4.<sup>a</sup> ed.). Limusa.

Torralba Rubio, M. (2014). *Optimización del espesor de aislamiento en tuberías de sales fundidas para una central de captadores cilindro-parabólicos* [Proyecto Final de Carrera,

Universidad Politécnica de Valencia]. Recuperado de:  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/46063>

Zaki, M. M., & Al-Turki, Y. A. (2018). Optimal thermal insulation thickness for pipes considering cost and safety constraints. *Energy Reports*, 4, 317–324. Recuperado de:  
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.03.005>

Zapata Sigueñas, J. C. (2021). *Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para el dimensionamiento óptimo de espesores para aislamiento térmico en tuberías de vapor* [Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. Recuperado de:  
<https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/8416>

Ejecutable, extraído de

[https://github.com/MichellBDB/Calculadora\\_Espesores\\_Optimo\\_Economico/releases/](https://github.com/MichellBDB/Calculadora_Espesores_Optimo_Economico/releases/)