

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de banco de pruebas por modelos computacionales para determinación  
de conductividad térmica en materiales

INGE-3108

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Ruddy Verónica Hernández Navarro

Ronald Paul Villacres Medina

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Agradecimientos

---

Le agradecemos a Dios por darnos la oportunidad y sabiduría de cumplir una meta más en nuestras vidas, a nuestros padres por siempre apoyarnos en nuestras decisiones, a nuestros hermanos por instruirnos en este camino de la ingeniería. Además, al PhD. Freddy Jervis por ampliar nuestro conocimiento y ser nuestra guía en todo momento.

## **Evaluadores**

---

**PhD. Miguel Ángel Quilambaqui Jara**

Profesor de Materia

---

**PhD. Freddy Xavier Jervis Calle**

Tutor de proyecto

## Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar y desarrollar un banco de pruebas para la determinación de la conductividad térmica de materiales, una alternativa accesible frente a equipos comerciales de alto costo, que limitan la investigación aplicada y formación técnica en Ecuador. Se planea como hipótesis que es posible estimar la conductividad térmica de manera confiable mediante el método de conducción de calor inversa, empleando un sistema de bajo costo y apoyo de herramientas computacionales. El desarrollo del proyecto incluyó la selección y diseño de los componentes mínimos del banco de pruebas, la implementación del aislamiento térmico y termocuplas tipo K. El comportamiento térmico fue modelado en MATLAB, Simulink®/Simscape® y en ANSYS, considerando estados estables y transitorio. Los resultados obtenidos mostraron buena concordancia con valores teóricos reportados, con errores menores al 4% para materiales de alta conductividad térmica en estado estable, y una adecuada convergencia de conductividad térmica en función de temperatura en régimen transitorio. Se concluye que el banco de pruebas desarrollado es una herramienta viable, confiable y de bajo costo para la caracterización térmica de materiales.

**Palabras Clave:** simulación térmica, conducción de calor inversa, validación numérica, convección libre.

## Abstract

The present project aims to design and develop a test bench for the determination of thermal conductivity of materials, providing an accessible alternative to high-cost commercial equipment that limits applied research and technical training in Ecuador. The working hypothesis states that thermal conductivity can be reliably estimated using the Inverse Heat Conduction Method through a low-cost system supported by computational tools. The development of the project included the selection and design of the minimum required components of the test bench, the implementation of thermal insulation, and the use of Type K thermocouples. The thermal behavior of the system was modeled using MATLAB, Simulink®/Simscape®, and ANSYS, considering both steady-state and transient conditions. The results showed good agreement with theoretical values reported in the literature, with errors below 4% for high thermal conductivity materials under steady-state conditions, as well as an adequate convergence of thermal conductivity as a function of temperature in the transient regime. It is concluded that the developed test bench represents a viable, reliable, and low-cost tool for the thermal characterization of materials, contributing to experimental research and technical capacity building.

**Keywords:** thermal conductivity, inverse heat conduction, numerical simulation, test bench, heat transfer.

## Índice general

Resumen.....	IV
Abstract.....	V
Índice general.....	VI
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema.....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Marco teórico.....	7
1.5.1 Conductividad Térmica y propiedades de los materiales.....	7
1.5.2 Métodos experimentales de medición de conductividad térmica.....	8
1.5.3 Transferencia de calor en sólidos.....	11
1.5.4 Irradiadores y generación de flujo térmico controlado.....	12
1.5.5 Termocuplas como sensores de medición térmica.....	13
Capítulo 2.....	16
2. Metodología.....	17
2.1 Metodología de medición de conductividad térmica.....	17
2.2 Definición de requerimientos y especificaciones de diseño.....	19
2.3 Alternativas de diseño del banco de pruebas.....	21
2.4. Selección de Alternativas.....	25
2.5. Diseño del banco de pruebas para medición de conductividad térmica.....	28
2.6. Cálculos previos.....	30
Capítulo 3.....	40

3. Resultados y análisis.....	41
3.1. Evaluación del aislante.....	41
3.2. Resultados De Flujo De Calor Y Conductividad Térmica – Estado Estable.....	48
3.3. Simulación Estado Transitorio.....	61
3.4. Resultados De Flujo De Calor y Conductividad Térmica – Estado Transitorio.....	63
3.5. Comportamiento de la distribución de temperaturas al aplicarle ruido.....	69
3.6. Conductividad Térmica Aluminio 2024.....	77
3.7. Planos de Construcción.....	79
Capítulo 4.....	83
4.1. Conclusiones y Recomendaciones.....	84
4.1.1. Conclusiones.....	84
4.1.2. Recomendaciones.....	85
Referencias.....	86
Apéndice A.....	88
Apéndice B.....	120
Apéndice C.....	124

**Abreviaturas**

ANSYS	Analysis System (software de simulación computacional)
CFD	Computational Fluid Dynamics
IHT	Inverse Heat Transfer (Conducción de Calor Inversa)
IHP	Inverse Heat Problem
PID	Proportional-Integral-Derivative (Controlador PID)
TC	Thermocouple (Termocupla)
TCK	Termocupla tipo K

**Simbología**

$\Delta T$	Diferencia de Temperatura
$\Delta x$	Distancia axial entre puntos de medición
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección
$k$	Conductividad Térmica
$m$	Metro
$q$	Flujo de Calor
$q''$	Flujo de Calor por unidad de área
$T$	Temperatura
$T_{\infty}$	Temperatura ambiente
$W$	Watt

**Índice de figuras**

FIGURA 2 .....	22
FIGURA 3 .....	23
FIGURA 4 .....	24
FIGURA 6 .....	33
FIGURA 7 .....	37
FIGURA 8 .....	37
FIGURA 9 .....	38
FIGURA 10 .....	39
FIGURA 11 .....	39
FIGURA 12 .....	42
FIGURA 13 .....	44
FIGURA 16 .....	49
FIGURA 17 .....	51
FIGURA 18 .....	52
FIGURA 19 .....	54
FIGURA 20 .....	55
FIGURA 21 .....	56
FIGURA 22 .....	57
FIGURA 23 .....	61
FIGURA 24 .....	62
FIGURA 26 .....	64
FIGURA 27 .....	66
FIGURA 28 .....	68
FIGURA 29 .....	70
FIGURA 30 .....	72
FIGURA 31 .....	74
FIGURA 32 .....	76
FIGURA 33 .....	79
FIGURA 34 .....	80
FIGURA 35 .....	92
FIGURA 36 .....	93
FIGURA 37 .....	94
FIGURA 38 .....	95
FIGURA 39 .....	96
FIGURA 40 .....	97
FIGURA 41 .....	98

FIGURA 42 ..... 99

FIGURA 43 ..... 100

FIGURA 44 ..... 101

FIGURA 45 ..... 102

FIGURA 46 ..... 103

FIGURA 47 ..... 104

FIGURA 48 ..... 106

FIGURA 49 ..... 107

FIGURA 50 ..... 108

FIGURA 51 ..... 109

FIGURA 52 ..... 111

FIGURA 53 ..... 112

FIGURA 54 ..... 113

FIGURA 55 ..... 114

FIGURA 56 ..... 116

FIGURA 57 ..... 117

FIGURA 58 ..... 118

FIGURA 59 ..... 119

**Índice de tablas**

TABLA 1	25
TABLA 2	26
TABLA 3	41
TABLA 6	46
TABLA 8	50
TABLA 9	51
TABLA 10	53
TABLA 11	54
TABLA 12	55
TABLA 13	57
TABLA 14	58
TABLA 15	58
TABLA 16	59
TABLA 17	59
TABLA 18	60
TABLA 19	65
TABLA 20	67
TABLA 22	71
TABLA 23	71
TABLA 24	72
TABLA 25	73
TABLA 26	75
TABLA 27	77
TABLA 28	80
TABLA 30	92
TABLA 31	93
TABLA 32	94
TABLA 33	95
TABLA 34	96
TABLA 35	97
TABLA 36	98
TABLA 37	99
TABLA 38	100
TABLA 39	101
TABLA 40	102
TABLA 41	103

TABLA 42	104
TABLA 43	104
TABLA 44	105
TABLA 45	105
TABLA 46	106
TABLA 47	107
TABLA 48	108
TABLA 49	110
TABLA 50	111
TABLA 51	112
TABLA 52	113
TABLA 53	115
TABLA 54	116
TABLA 55	117
TABLA 56	118

**ÍNDICE DE PLANOS**

PLANO 1	25
PLANO 2	137
PLANO 3	138
PLANO 4	139
PLANO 5	140
PLANO 6	141
PLANO 7	142
PLANO 8	143
PLANO 9	144
PLANO 10	145
PLANO 11	146

## **Capítulo 1**

## 1.1 Introducción

La conductividad térmica es una propiedad de transporte, que indica la rapidez con la que la energía se transfiere mediante el proceso de difusión. Su correcta evaluación resulta en un parámetro esencial en el diseño de sistemas térmicos, materiales aislantes y transferencia de energía [1]. En los últimos años, la caracterización térmica de materiales ha cobrado mayor relevancia gracias a la necesidad de mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en los sectores como la construcción, la manufactura y la industria energética.

A nivel global, la optimización del consumo energético y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado la investigación de nuevos materiales con propiedades térmicas más precisas [2]. En este marco, el desarrollo de métodos experimentales y modelos computacionales precisos para determinar esta propiedad adquiere relevancia fundamental, consolidándose como una prioridad científica y tecnológica.

Por otro lado, los procesos de medición de conductividad térmica presentan limitaciones asociadas al equipamiento especializado debido a su alto costo y mantenimiento específico. Según [3], los instrumentos para la medición térmica pueden superar los USD 40000, lo que impide su disponibilidad en centros académicos y laboratorios de investigación. Esta situación limita la investigación aplicada, y dificulta la validación de modelos numéricos. Además, la falta de acceso a equipos adecuados impacta en la capacidad de diseñar materiales con eficiencia energética y reduce la competitividad de la industria local frente a los estándares internacionales de sostenibilidad [4].

En este contexto, el presente proyecto surge como una respuesta a la necesidad de desarrollar alternativas experimentales que permitan realizar mediciones térmicas

confiables, haciendo uso de recursos accesibles y herramientas disponibles en el entorno académico. Por ende, la problemática se centra en diseñar un banco de pruebas que integre el método de conducción de calor inversa (IHP) y la modelación computacional (CFD), permitiendo estimar efectivamente la conductividad térmica a partir de mediciones indirectas de temperatura y simulaciones numéricas. Este enfoque no solo reduce la dependencia tecnológica, sino que también fomenta la innovación mediante la incorporación de técnicas de simulación avanzadas y el aprovechamiento de materiales disponibles en el mercado nacional [5].

La importancia del proyecto se sustenta en su impacto académico, tecnológico y económico. Desde el ámbito académico, el banco de pruebas servirá como una herramienta didáctica para la formación del ingeniero mecánico, al aplicar conceptos de transferencia de calor, modelación numérica, simulación térmica, selección de instrumentos de medición y diseño mecánico. Desde una perspectiva industrial, disponer de un dispositivo de bajo costo permitirá a empresas y laboratorios de investigación realizar ensayos de caracterización térmica sin recurrir a servicios externos, promoviendo la eficiencia energética y la sostenibilidad productiva [6]

El proyecto, además, responde a los objetivos de desarrollo sostenible, particularmente en lo referente al Objetivo 4 (Educación de calidad), Objetivo 7 (Energía asequible y no contaminante) y al Objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructura) de la Agenda 2030 de Naciones Unidas [7]. Al desarrollar tecnología accesible para la medición térmica, se contribuye a la autonomía tecnológica ecuatoriana, al fortalecimiento de la investigación aplicada y al uso responsable de la energía en la industria y la educación.

Académicamente, el proyecto integra competencias de diseño térmico, simulación numérica, instrumentación electrónica y análisis de datos, articulando conocimientos de

mecánica, termodinámica y modelado computacional. Esta naturaleza multidisciplinaria permite aplicar herramientas como MATLAB®/Simscape® y software CFD (por ejemplo, ANSYS Transient Thermal®) para validar el comportamiento térmico del banco de pruebas bajo diferentes condiciones de frontera. De esta manera, el estudiante desarrolla capacidades analíticas y prácticas alineadas con las exigencias de la ingeniería moderna, fortaleciendo su formación profesional y su capacidad para enfrentar problemas reales de transferencia de calor en la industria [4].

El alcance del proyecto se orienta al diseño y validación computacional de un banco de pruebas para la medición de conductividad térmica. Esto, se logra mediante la comparación de perfiles de temperatura obtenidos por simulación y análisis teórico. Aunque no se contemple su construcción física, su desarrollo sentará las bases para una futura fabricación, permitiendo la extensión del trabajo a prototipado y automatización. Asimismo, se prevé que el banco pueda adaptarse a distintos materiales sólidos, garantizando su versatilidad y su aplicabilidad tanto en entornos académicos como industriales.

En síntesis, este proyecto representa una contribución al avance de la ingeniería mecánica aplicada en el Ecuador, al proponer un diseño experimental sustentado en modelos computacionales que promueven la accesibilidad educativa y la eficiencia energética. Su implementación fortalecerá las capacidades de investigación y desarrollo tanto en la educación como en la industria, alineándose con los principios de innovación, sostenibilidad y economía que guían la formación en ingeniería.

## **1.2 Descripción del Problema**

En Ecuador, la caracterización térmica de materiales es un proceso limitado por la falta de equipos accesibles y la dependencia de tecnología importada. Los equipos comerciales de medición de conductividad térmica, como el de hilo o disco caliente en

estado transitorio, requieren equipos que superan los USD 40 000, además de servicios de calibración y mantenimiento especializados [8]. Esto da como resultado que muchas universidades y laboratorios no puedan realizar estudios experimentales propios.

La Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), reconocida por su liderazgo en investigación aplicada, enfrenta esta misma limitación en sus laboratorios. Por ello, surge la necesidad de diseñar un banco de pruebas funcional y económico que permita estimar la conductividad térmica, aplicando el método de conducción de calor inversa (IHC) y obteniendo datos experimentales a través del modelado CFD. Asimismo, utilizando diferentes materiales sólidos en condiciones controladas específicas y replicables.

El problema principal surge en el desarrollo de un sistema que sea capaz de mantener condiciones térmicas estables, registrar temperaturas con precisión y procesar datos experimentales adecuadamente. Entre las variables de interés se incluyen la distribución de temperatura a lo largo del eje de la barra compuesta, el flujo de calor, el espesor del material aislante y la variación de la conductividad térmica en función de la temperatura. Además, el diseño debe contemplar restricciones de seguridad, bajo consumo energético y compatibilidad con sensores accesibles.

### **1.3 Justificación del Problema**

Al contar con un banco de pruebas de bajo costo, se crea una oportunidad para que las instituciones educativas, centros de investigación y empresas locales puedan realizar mediciones térmicas sin depender de equipos importados, fomentando la autonomía tecnológica y la formación práctica en ingeniería térmica. Además, el proyecto promueve la innovación y el uso eficiente de recursos, al emplear materiales locales y herramientas de simulación computacional.

Desde una perspectiva académica, el proyecto permite aplicar conocimientos de transferencia de calor, diseño mecánico, simulación CFD y métodos numéricos inversos,

fortaleciendo las competencias del estudiante en modelación, análisis y diseño experimental. En el ámbito social y productivo, el acceso a equipos accesibles fomenta la creación de soluciones sostenibles, especialmente en sectores como la construcción, energía y manufactura, donde el control térmico influye directamente en la eficiencia y el ahorro energético.

En consecuencia, el desarrollo de este banco de pruebas no solo tiene impacto académico, sino también económico y ambiental, contribuyendo al avance tecnológico nacional y a los objetivos de sostenibilidad planteados.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Diseñar un banco de pruebas para la determinación y verificación de conductividad térmica en materiales, aplicando el método conducción de calor inversa (IHP) y modelación computacional (CFD), con el fin de asegurar su comportamiento energético.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Diseñar y seleccionar los elementos mínimos necesarios para el funcionamiento del banco de pruebas para medición de conducción térmica
- Implementar el método de conducción de calor inversa (IHP) para la estimación indirecta de la conductividad térmica, considerando condiciones transitorias y de frontera controladas.
- Desarrollar un modelo de análisis computacionales (CFD) que permita evaluar el desempeño térmico del banco de pruebas bajo distintas configuraciones.

- Desarrollar un modelo de estimación de parámetros empleando Simulink®/Simscape® y contrastando los resultados obtenidos con valores teóricos y datos reportados para garantizar precisión y confiabilidad.

## 1.5 Marco teórico

### 1.5.1 Conductividad Térmica y propiedades de los materiales

La conductividad térmica es una de las propiedades fundamentales en el estudio de los fenómenos de transferencia de calor. Se define como la capacidad de un material para conducir energía en forma de calor a través de su estructura bajo un gradiente de temperatura [9]. Matemáticamente, esta propiedad se expresa a través de la Ley de Fourier, la cual establece que el flujo de calor por conducción  $q$  es proporcional al gradiente negativo de la temperatura, es decir  $q = -k \frac{dT}{dx}$ , donde  $k$  es la conductividad térmica del material, con unidades de  $W/m \cdot K$  [1]. Esta relación describe la transferencia unidimensional en estado estacionario y constituye la base de numerosos métodos de caracterización térmica.

En términos físicos, la conductividad térmica depende de la estructura cristalina, el tipo de enlace atómico y la densidad del material. Los metales, por ejemplo, presentan altos valores de conductividad térmica debido al movimiento libre de electrones, mientras que los materiales cerámicos y poliméricos, dominados por enlaces covalentes o iónicos, exhiben valores significativamente menores, donde la transferencia ocurre principalmente a través de vibraciones de la red o fonones. En materiales compuestos o porosos, la conductividad efectiva es resultado de la contribución combinada de las fases sólida, líquida y gaseosa, así como de los mecanismos de radiación y convección presentes a escala microscópica [4, 3].

Diversos autores han estudiado la variabilidad de la conductividad térmica en materiales utilizados en la construcción y la industria. Según [10], analizaron paneles tipo sándwich conformados por núcleos de poliestireno expandido, lana de vidrio y poliéster, concluyendo que las configuraciones multicapa presentan valores de  $k$  entre 0.03 y 0.05  $W/m \cdot k$ , comparables con los materiales aislantes convencionales.

De igual manera, [4] evaluó materiales poliméricos y reciclados mediante un prototipo de hot box a escala reducida, encontrando variaciones menores al 5 % respecto a un conductímetro comercial, lo que demuestra la viabilidad de sistemas de bajo costo para la caracterización térmica. Estos estudios evidencian la importancia de la conductividad térmica como parámetro esencial para la eficiencia energética, especialmente en el contexto de edificaciones sostenibles, donde el uso de materiales aislantes reduce el consumo energético hasta en un 40 %.

En síntesis, la conductividad térmica es una propiedad intensiva que depende de la naturaleza del material, sus condiciones de frontera y su microestructura. Su determinación precisa permite evaluar la idoneidad de materiales para aplicaciones donde el control térmico es crítico, como en intercambiadores de calor, envolventes de edificios, o sistemas de aislamiento industrial. En el contexto ecuatoriano, donde los equipos de medición especializados son escasos y de alto costo, la creación de bancos de pruebas locales constituye una solución tecnológica viable para la formación académica y la investigación aplicada.

### **1.5.2 Métodos experimentales de medición de conductividad térmica**

La determinación experimental de la conductividad térmica puede realizarse mediante técnicas estacionarias o transitorias, dependiendo de si el régimen térmico del sistema alcanza o no un estado permanente. Los métodos estacionarios son más simples y precisos para materiales homogéneos, mientras que los métodos transitorios permiten

tiempos de ensayo más cortos y la caracterización de materiales con propiedades dependientes del tiempo o de la temperatura [11].

### **1.5.2.1 Método estacionario**

Los métodos estacionarios se basan en establecer un flujo de calor constante a través de una muestra hasta que el gradiente de temperatura se estabiliza. Una vez alcanzado el equilibrio térmico, se aplica la ley de Fourier para calcular la conductividad. Entre las configuraciones más comunes se encuentran la placa caliente con guarda (ASTM C177) y la caja caliente (hot box) (ISO 8990). Se empleó el método de placa caliente con guarda en paneles compuestos, demostrando la efectividad del aislamiento térmico mediante la reducción del flujo de calor y obteniendo valores de conductividad concordantes con la literatura [10].

El método hot box, por su parte, ha sido ampliamente desarrollado y adaptado para investigación académica. [4] diseñó un prototipo de hot box a escala reducida con cámaras térmicas controladas, lo que permitió medir con precisión la conductividad de materiales poliméricos y textiles. Este tipo de dispositivos presenta ventajas como la visualización directa de los gradientes térmicos y la validación comparativa con sensores de flujo de calor. De forma similar, [12] desarrollaron un banco didáctico para materiales granulados que utiliza el principio de conducción radial en cilindros, evidenciando la aplicabilidad de modelos teóricos de Fourier en sistemas educativos.

A pesar de su precisión, los métodos estacionarios presentan limitaciones en el tiempo de estabilización, el control de pérdidas térmicas y la imposibilidad de evaluar materiales con propiedades variables en el tiempo. Estas limitaciones justifican la exploración de métodos alternativos o híbridos que combinen precisión y rapidez.

### 1.5.2.2 Método Transitorio

Los métodos transitorios se basan en el análisis de la evolución temporal de la temperatura en una muestra sometida a una perturbación térmica controlada. A diferencia de los estacionarios, no requieren alcanzar equilibrio térmico, lo que reduce el tiempo de ensayo y permite obtener simultáneamente propiedades como la difusividad y la capacidad calorífica. Entre las técnicas más difundidas se encuentran el método del hilo caliente y el del disco plano caliente (ASTM D5930 y ISO 22007).

En estudios recientes, [13] han empleado métodos transitorios para caracterizar maderas y materiales compuestos de baja densidad, observando una fuerte dependencia entre la conductividad y la humedad relativa. Asimismo, [5] desarrollaron un aparato portátil basado en un sistema de calentamiento resistivo y adquisición de datos en tiempo real, logrando errores menores al 3 % respecto a equipos comerciales. Estos avances demuestran que los métodos transitorios constituyen una alternativa viable para la medición rápida y precisa, especialmente cuando se requiere instrumentación de bajo costo o portabilidad.

El principio fundamental de estos métodos es la solución analítica de la ecuación de conducción transitoria de calor, cuya forma general es:

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = k \nabla^2 T \quad 1.1$$

La respuesta térmica registrada se ajusta a modelos teóricos o numéricos para estimar la conductividad. De acuerdo con [1], estos métodos son adecuados para materiales homogéneos y de baja capacidad térmica, aunque su precisión puede verse afectada por errores de contacto térmico o pérdidas por convección.

### 1.5.2.3 Método de conducción inversa (Inverse Heat Conduction Problem, IHP)

El método de conducción inversa (IHP) constituye una aproximación avanzada para la estimación indirecta de propiedades térmicas a partir de mediciones de

temperatura superficial o interna. A diferencia de los métodos directos, en los problemas inversos se conoce el campo de temperatura, pero no el flujo de calor o la propiedad térmica que lo genera, por lo que el objetivo es determinar estos parámetros mediante técnicas de ajuste numérico o de optimización [14].

propusieron una formulación analítica basada en funciones de transferencia y transformadas de Laplace para resolver el IHP, eliminando la necesidad de iteraciones o regularización numérica.

Este método permitió determinar flujos de calor en procesos de maquinado con gran precisión. En aplicaciones experimentales, el IHP se ha implementado junto con modelos de elementos finitos y algoritmos de mínimos cuadrados para identificar parámetros térmicos en materiales heterogéneos.

La relevancia de este enfoque radica en su aplicabilidad a sistemas donde la medición directa del flujo de calor es difícil o costosa. En el contexto del presente proyecto, el método IHP se emplea para estimar la conductividad térmica a partir de las mediciones de temperatura en el banco de pruebas, considerando condiciones de frontera controladas y un modelo de simulación que garantice estabilidad numérica. Esta metodología ha sido validada en investigaciones previas sobre medición indirecta en maderas, polímeros y compuestos, logrando resultados comparables a los obtenidos por métodos estacionarios [13].

### **1.5.3 Transferencia de calor en sólidos**

La transferencia de calor en sólidos se produce principalmente por conducción, fenómeno descrito por la ley de Fourier y gobernado por la ecuación de conducción térmica general. Este proceso involucra la transferencia de energía desde regiones de mayor a menor temperatura debido a la interacción molecular. Para un sólido homogéneo e isotrópico, la ecuación de conducción tridimensional se expresa como

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \nabla^2 T, \quad 1.2$$

Donde  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  es la difusividad térmica del material [1].

En el diseño de equipos experimentales, comprender el comportamiento del flujo de calor en sólidos permite establecer condiciones de frontera adecuadas, minimizar pérdidas térmicas y asegurar la linealidad del gradiente de temperatura. Según [4], la validación de equipos *hot box* o bancos de pruebas requiere modelar el régimen estacionario y transitorio para distintos espesores de muestra, considerando resistencias térmicas de contacto y efectos de radiación en superficies.

Por su parte, [12, 10] demuestran que el control del flujo térmico en materiales compuestos o granulados depende fuertemente de la geometría y la disposición de las capas. En aplicaciones más específicas, los modelos de conducción bidimensional y cilíndrica permiten analizar configuraciones como tuberías o componentes eléctricos, en los cuales la distribución de temperatura influye directamente en la estabilidad estructural y la eficiencia energética.

La comprensión detallada de la conducción en sólidos es también esencial para la simulación numérica. Los resultados experimentales deben correlacionarse con modelos teóricos que consideren tanto el régimen estacionario como el transitorio, a fin de validar la confiabilidad de las mediciones y extrapolar los resultados a diferentes condiciones operativas.

#### **1.5.4 Irradiadores y generación de flujo térmico controlado**

Los irradiadores térmicos son dispositivos utilizados para suministrar un flujo de calor controlado mediante radiación hacia una superficie objetivo. Su función principal es establecer un gradiente térmico reproducible sin necesidad de contacto directo, lo que los vuelve especialmente adecuados para experimentos de conducción de calor donde se

busca evitar perturbaciones del flujo térmico o pérdidas adicionales en la superficie de intercambio.

Según [1], la radiación térmica constituye un mecanismo de transferencia de calor altamente dependiente de la temperatura absoluta de la superficie emisora, así como de sus propiedades ópticas, tales como la emisividad y absorbancia. Los autores señalan que la potencia radiada se incrementa de manera pronunciada con la temperatura, lo que permite producir flujos de calor relativamente altos incluso sin contacto físico [9].

Los irradiadores comúnmente utilizados en aplicaciones de laboratorio pueden incluir lámparas halógenas, paneles infrarrojos, emisores cerámicos o elementos resistivos con superficies emisivas tratadas. Aunque el diseño específico varía entre dispositivos, todos buscan generar un campo de radiación lo más uniforme posible, de manera que el flujo térmico aplicado a la superficie de ensayo no introduzca gradientes no deseados que puedan afectar la medición. Esta uniformidad resulta crucial cuando el objetivo es evaluar la respuesta térmica de un material mediante métodos numéricos, como ocurre en este proyecto, pues cualquier variación espacial del flujo se refleja directamente en los resultados del modelo nodal y en las estimaciones del método inverso.

### **1.5.5 Termocuplas como sensores de medición térmica**

Las termocuplas son sensores ampliamente empleados en ingeniería térmica para obtener mediciones confiables de temperatura en sólidos, fluidos y superficies, debido a su simplicidad operativa, amplia gama de funcionamiento y estabilidad bajo condiciones térmicas variables.

En el campo de la transferencia de calor por conducción, las termocuplas cumplen un papel fundamental al permitir registrar la distribución espacial de temperaturas dentro de un cuerpo sólido. Tal como señalan [15], estos sensores presentan un comportamiento altamente estable en medios conductivos, ofreciendo una lectura representativa del estado

térmico local gracias a su pequeño volumen. Por esta razón, se emplean habitualmente en barras, placas y componentes metálicos donde es necesario caracterizar gradientes térmicos internos.

[16] explica que, al estar fabricadas con materiales metálicos de baja masa en su unión caliente, estas presentan una respuesta suficientemente rápida para capturar variaciones térmicas en aplicaciones experimentales y en análisis basados en la transferencia de calor.

En aplicaciones que involucran la reconstrucción del flujo térmico o la identificación de parámetros térmicos a partir de temperaturas internas, [17] destaca que las termocuplas proporcionan datos suficientemente precisos y repetibles, lo que permite emplear sus mediciones como insumo para métodos de estimación numérica sin necesidad de instrumentación compleja o técnicas ópticas avanzadas. Su facilidad de inserción en sólidos metálicos y su compatibilidad con sistemas de adquisición modernos las convierten en una herramienta versátil para estudios experimentales y comparaciones con modelos computacionales.

### **1.5.6 Análisis de diferencias finitas**

El Método de Diferencias Finitas (MDF) es la base del modelo térmico utilizado en este proyecto para analizar el comportamiento de la barra compuesta sometida a un flujo de calor. Su función principal es permitir que la ecuación de conducción de calor, que normalmente se expresa de forma continua, pueda representarse mediante un conjunto de ecuaciones discretas que describen qué ocurre en puntos específicos de la barra, llamados nodos.

Según la explicación presentada en Introducción al método de diferencias finitas [18], el MDF consiste en dividir el dominio físico en una malla y aproximar los cambios de temperatura a partir de la información disponible en los nodos vecinos. Esto permite reemplazar derivadas matemáticas por relaciones simples entre temperaturas adyacentes, facilitando el cálculo del campo térmico mediante algoritmos computacionales.

## Capítulo 2

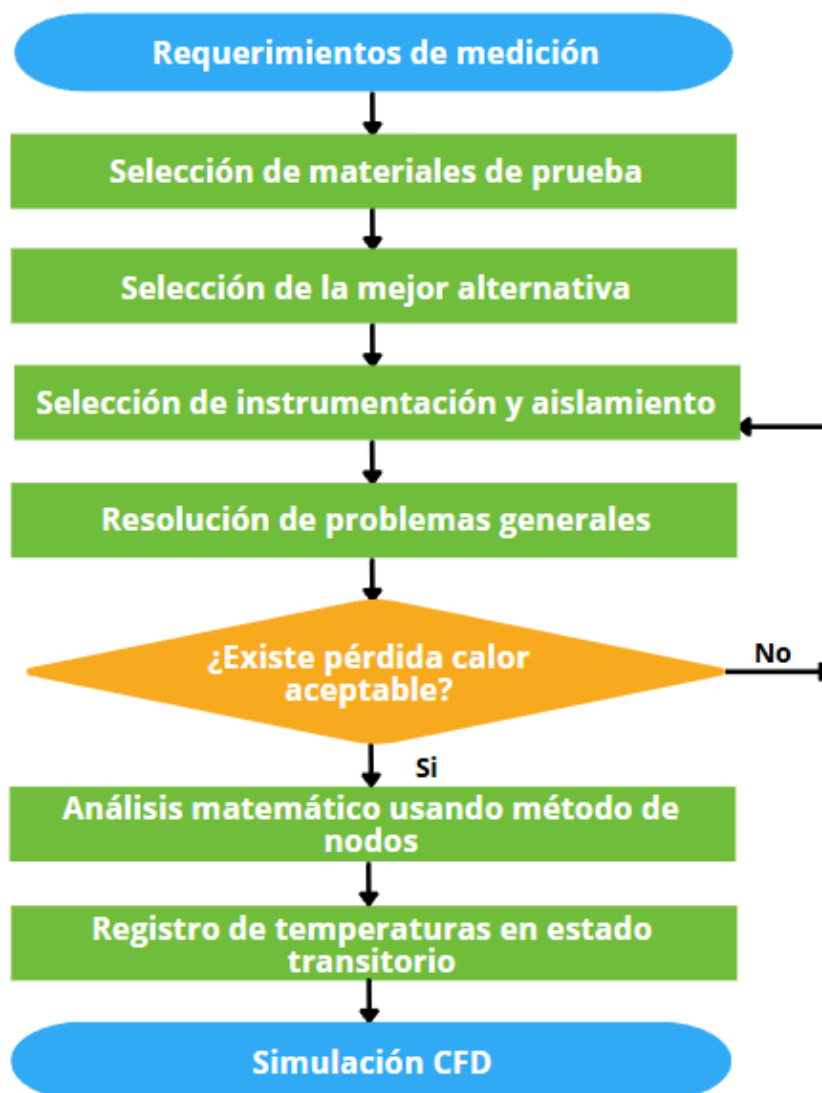
## 2. Metodología

### 2.1 Metodología de medición de conductividad térmica

La medición de la conductividad térmica consiste en determinar la capacidad de un material para transmitir calor a través de su estructura, bajo la aplicación de un gradiente de temperatura. Este proceso experimental requiere un control riguroso de las condiciones de frontera, la estabilidad térmica del sistema y la precisión en la medición de temperaturas. Existen diferentes métodos para su determinación, los cuales se clasifican en métodos estacionarios y métodos transitorios.

- Métodos estacionarios: se basan en establecer un flujo de calor constante hasta alcanzar equilibrio térmico. Una vez estabilizadas las temperaturas en las caras del material, se aplica la ley de Fourier para calcular la conductividad. Son adecuados para materiales homogéneos y ofrecen alta precisión, aunque requieren tiempos prolongados de medición [19].
- Métodos transitorios: analizan la respuesta del material ante una perturbación térmica en función del tiempo, lo que permite obtener resultados en menor tiempo y caracterizar materiales con propiedades variables. Ejemplos comunes incluyen el método del hilo caliente y el disco plano caliente [19].

En este proyecto se implementa una metodología híbrida, basada en el método de conducción inversa (IHP), que permite estimar la conductividad térmica a partir de datos experimentales de temperatura superficial. Este método utiliza un modelo computacional que resuelve la ecuación de conducción de calor mediante diferencias finitas y ajusta el valor de la conductividad hasta minimizar el error entre las mediciones experimentales y las simuladas.

**Figura 1***Flujograma del diseño*

*Nota.* La Figura muestra el proceso metodológico seguido para el diseño y validación del banco de pruebas destinado a medir la conductividad térmica de materiales.

El flujograma resume las etapas principales que combinan el diseño experimental, el análisis matemático y la simulación computacional.

El proceso inicia con la definición de los requerimientos de medición, donde se establecen los objetivos del ensayo, las variables térmicas y las condiciones de operación. Luego, se realiza la selección de materiales de prueba y la evaluación de alternativas de

diseño, eligiendo la configuración más adecuada en función del rendimiento térmico y la facilidad de instrumentación.

Posteriormente, se lleva a cabo la selección de la instrumentación y el aislamiento térmico, asegurando una adecuada distribución de sensores y un control efectivo de las pérdidas de calor. En la etapa de verificación, se analiza si existen pérdidas térmicas significativas; de ser así, se ajustan los materiales o la disposición del sistema.

Superada esta comprobación, se desarrolla un análisis matemático mediante el método de nodos, que permite modelar el comportamiento térmico del sistema. A continuación, se realiza el registro de temperaturas en estado transitorio, obteniendo los datos experimentales necesarios para estimar la conductividad térmica. Finalmente, la simulación CFD valida los resultados y permite comparar el desempeño térmico del diseño con las condiciones teóricas.

En conjunto, el flujograma representa una metodología iterativa que integra el diseño físico, la experimentación y la simulación numérica para garantizar la precisión y confiabilidad del banco de pruebas propuesto.

## **2.2 Definición de requerimientos y especificaciones de diseño**

El diseño del banco de pruebas se fundamenta en la necesidad de crear un sistema experimental funcional, seguro y preciso para la determinación de la conductividad térmica en materiales. Este diseño busca reproducir las condiciones de conducción de calor de forma controlada, minimizando los errores asociados a las pérdidas térmicas y garantizando la fiabilidad de las mediciones.

En primer lugar, el banco debe contar con una estructura resistente y estable que permita el montaje seguro de los componentes térmicos. La disposición de las placas conductoras debe asegurar un flujo de calor unidireccional a través del material de prueba, evitando desviaciones por convección o radiación. Para ello, se seleccionan dos

materiales altamente conductivos, como cobre y aluminio, que faciliten la transferencia de energía térmica y mantengan un gradiente de temperatura uniforme.

Entre estas placas se colocará el material de prueba, cuya conductividad térmica se desea determinar. Este material será sometido a un gradiente térmico generado por un irradiador o resistencia eléctrica que funcione como fuente de calor controlada. La cantidad de energía suministrada deberá regularse para mantener un flujo constante sin provocar sobrecalentamiento del sistema.

A fin de reducir las pérdidas térmicas hacia el ambiente, se incluirá un material aislante alrededor del sistema de ensayo. Este componente no solo contribuirá a la estabilidad térmica de las mediciones, sino que también garantizará la seguridad del usuario al evitar el contacto con superficies calientes. Entre los materiales adecuados se consideran la lana mineral, la fibra cerámica o la espuma fenólica, seleccionadas por su alta resistencia térmica y baja conductividad.

Para la adquisición de datos, se implementará un sistema de instrumentación térmica compuesto por termocuplas tipo k, ubicadas estratégicamente en las superficies de contacto y en el interior del material de prueba. Los sensores estarán conectados a un sistema de adquisición digital que permita registrar las temperaturas en intervalos de tiempo definidos y transferir los datos a una computadora para su posterior análisis.

Finalmente, el diseño integrará un modelo computacional, que permitirá reproducir numéricamente las condiciones experimentales. Este modelo se empleará para aplicar el método de conducción inversa (IHP), comparando los resultados simulados con los experimentales y ajustando los parámetros hasta obtener la conductividad térmica más precisa posible.

En conjunto, los requerimientos y especificaciones de diseño del banco de pruebas garantizan una herramienta experimental eficiente, segura y adaptable a distintos tipos de

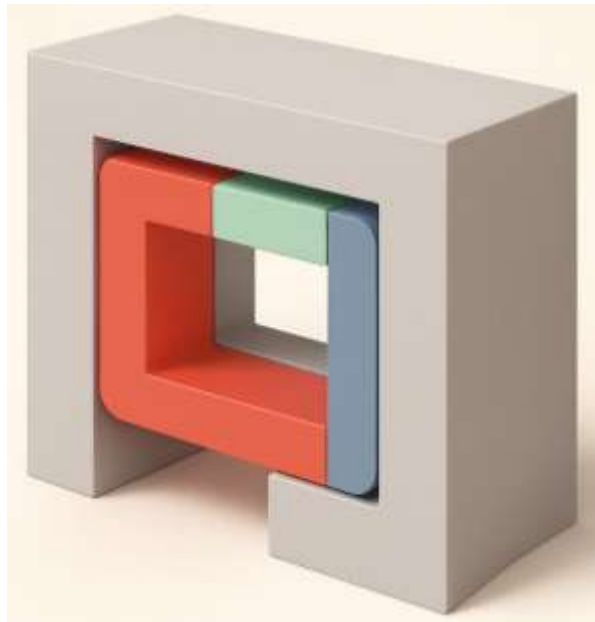
materiales, contribuyendo al fortalecimiento de la investigación térmica aplicada en el ámbito académico e industrial.

### **2.3 Alternativas de diseño del banco de pruebas**

#### **2.3.1 Alternativa 1: Banco en forma de herradura con bloque conductor central**

La primera alternativa consiste en un banco de pruebas con geometría en forma de herradura, cuyo volumen interno está conformado por un bloque conductor rectangular en el que, a su vez, se inserta una probeta del material a caracterizar. En el centro del bloque conductor se dispone una probeta rectangular extraíble, correspondiente al material cuya conductividad térmica se desea determinar. Esta probeta se aloja en un canal o cavidad central, de manera que queda en contacto directo con el bloque conductor por ambas caras principales, garantizando una transferencia de calor predominantemente unidimensional.

El conjunto bloque–probeta se encuentra rodeado en sus laterales y parte posterior por un material aislante térmico, conformando el contorno en herradura. El lado abierto de la herradura corresponde a la zona de acceso al sistema de calentamiento y a los sensores de temperatura. Sobre una de las caras del bloque conductor se instala el elemento calefactor (irradiador o resistencia eléctrica), mientras que en la cara opuesta se asegura una condición casi adiabática mediante el aislante, reduciendo al mínimo las pérdidas de calor hacia el entorno.

**Figura 2***Alternativa 1 de diseño***2.3.2 Alternativa 2: Conjunto de varillas horizontales con probeta central**

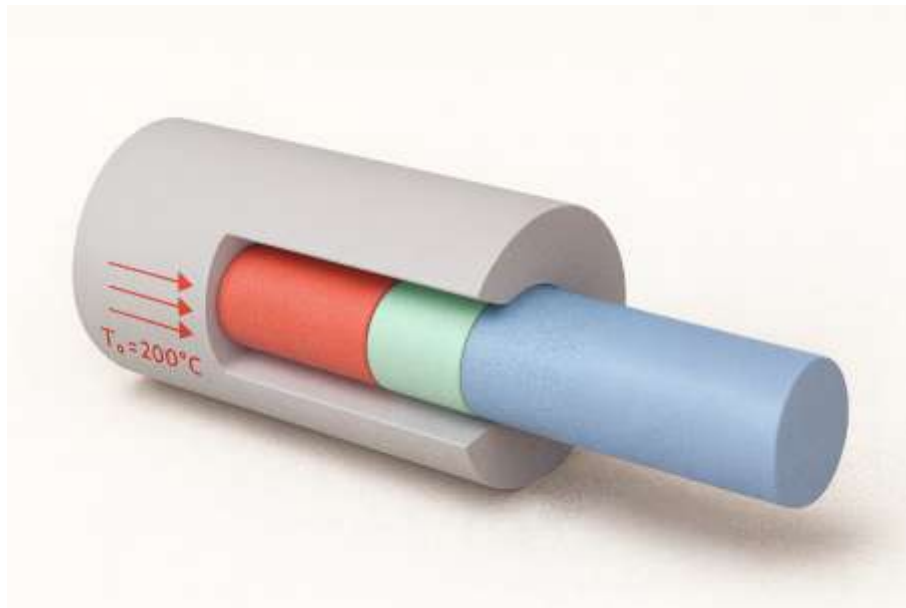
La segunda alternativa propone un banco de pruebas basado en un arreglo horizontal de varillas, donde la transferencia de calor se produce a lo largo del eje longitudinal de las mismas. En las esquinas de la sección útil del banco se disponen varillas de cobre de alta conductividad térmica, que actúan como elementos de referencia y distribuyen de manera uniforme el flujo de calor. En el centro del conjunto se ubica una varilla del material de prueba, cuya conductividad térmica se desea determinar.

Todas las varillas se montan dentro de un bloque de material aislante que las rodea en toda su longitud, de modo que solo sus extremos queden expuestos al sistema de calentamiento y a las condiciones de disipación. Uno de los extremos de las varillas se conecta al elemento calefactor, mientras que el extremo opuesto se mantiene a una temperatura conocida (ambiente controlado o placa disipadora), generando así un gradiente térmico a lo largo de cada varilla.

La disposición horizontal facilita el acceso para la instalación de termopares a lo largo de las varillas, permitiendo comparar el perfil de temperatura en el cobre y en la probeta central. De esta manera, las varillas conductivas de referencia sirven para validar el comportamiento del sistema y para estimar la uniformidad del flujo de calor impuesto.

### Figura 3

*Alternativa 2 de diseño*



#### 2.3.3 Alternativa 3: Módulo tipo “sándwich” placa caliente–placa fría

La tercera alternativa plantea un banco de pruebas con configuración tipo “sándwich” plano, inspirado en el principio de la placa caliente guardada. En este diseño, el material de prueba se presenta en forma de placa o lámina rectangular, ubicada entre dos placas metálicas conductoras de espesor conocido (por ejemplo, placas de cobre o aluminio). La placa superior funciona como superficie calefactora, mientras que la inferior se mantiene a una temperatura más baja, generando un gradiente térmico prácticamente unidimensional a través del espesor de la muestra.

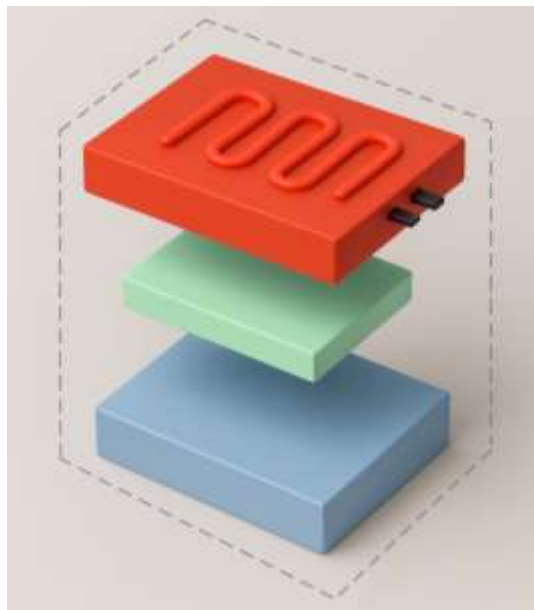
Todo el conjunto placa caliente–muestra–placa fría se aloja en el interior de una cámara aislada térmicamente, de manera que los bordes de la muestra y de las placas metálicas queden recubiertos por material aislante [20]. Este encapsulamiento reduce las

pérdidas de calor laterales y facilita la aproximación a un régimen estacionario de conducción plana. La cámara puede contar con una tapa desmontable que permita el acceso para el montaje de nuevas probetas y la inspección de los sensores.

En ambas placas metálicas se instalan sensores de temperatura distribuidos en diferentes posiciones para verificar la uniformidad de la temperatura en la superficie caliente y la fría. El flujo de calor que atraviesa el material se controla mediante la potencia suministrada al elemento calefactor de la placa superior y se puede estimar a partir de las propiedades conocidas de las placas conductoras.

#### **Figura 4**

*Alternativa 3 de diseño*



## 2.4. Selección de Alternativas

### 2.4.1. Comparación por pares

**Tabla 1**

*Comparación por pares*

Criterios	Costo de producción	Facilidad de montaje	Precisión de medición	Seguridad térmica	Mantenimiento	Innovación	Factibilidad operativa	Eficiencia térmica	Total	Peso relativo
Costo de producción		2	0.5	1	2	3	2	0.33	10.83	12.00%
Facilidad de montaje	0.5		0.33	1	1	2	1	0.25	6.08	6.70%
Precisión de medición	2	3		3	2	3	3	2	18	19.80%
Seguridad térmica	1	1	0.33		1	2	1	0.5	6.83	7.50%
Mantenimiento	0.5	1	0.5	1		2	1	0.5	6.5	7.10%
Innovación	0.33	0.5	0.33	0.5	0.5		1	0.33	3.49	3.80%
Factibilidad operativa	0.5	1	0.33	1	1	1		0.33	5.16	5.70%
Eficiencia térmica	3	4	0.5	2	2	3	3		17.5	19.40%
Totales									74.39	100%

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 1, los criterios con mayor influencia en la selección de la alternativa de diseño son la precisión de medición (19.8%) y la eficiencia térmica (19.4%), dado que el objetivo principal del banco de pruebas es minimizar las pérdidas de calor y garantizar resultados experimentales confiables en la determinación de la conductividad térmica.

El costo de producción (12%) y la seguridad térmica (7.5%) también presentan un peso significativo, ya que contribuyen al equilibrio entre el rendimiento térmico, la viabilidad económica y la protección del usuario frente a posibles riesgos por altas temperaturas.

Los criterios de facilidad de montaje (6.7%), mantenimiento (7.1%) y factibilidad operativa (5.7%) poseen un peso moderado, orientado a asegurar que el diseño sea funcional, fácil de ensamblar y de operar en condiciones de laboratorio. Finalmente, la innovación (3.8%) tiene el menor peso relativo, puesto que en este proyecto la prioridad se centra en la funcionalidad térmica y la precisión experimental antes que en la novedad del diseño.

#### 2.4.2. Matriz de decisión

**Tabla 2**

*Matriz de decisión*

Criterios	Peso %	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Calificación	Subtotal	Calificación	Subtotal	Calificación	Subtotal
Costo de producción	14,56	3	0,437	4	0,582	2	0,291
Facilidad de montaje	8,17	3	0,245	5	0,409	4	0,327
Precisión de medición	24,20	3	0,726	4	0,968	5	1,210
Seguridad térmica	9,18	4	0,367	4	0,367	5	0,459
Mantenimiento	8,74	3	0,262	5	0,437	2	0,175
Innovación	4,69	5	0,235	4	0,188	3	0,141
Factibilidad operativa	6,94	3	0,208	5	0,347	3	0,208
Eficiencia térmica	23,52	3	0,706	5	1,176	4	0,941
Total	100		3,186		4,474		3,752

El análisis de la Tabla 2 permite determinar la alternativa de diseño más adecuada en función de los pesos porcentuales obtenidos en la comparación por pares. Se observa que la Alternativa 2 obtuvo el puntaje más alto (4.47), superando a la Alternativa 1 (3.18) y a la Alternativa 3 (3.75). Este resultado evidencia que la configuración horizontal con varillas de cobre en los extremos y una probeta central rodeada de material aislante ofrece un equilibrio óptimo entre desempeño térmico, precisión de medición y facilidad operativa.

La Alternativa 2 destaca especialmente en los criterios de eficiencia térmica (19.4%) y precisión de medición (19.8%), debido a que su disposición estructural permite un flujo de calor uniforme, minimiza las pérdidas laterales y garantiza una lectura más estable de la temperatura. Además, presenta buena facilidad de montaje (6.7%) y mantenimiento (7.1%), lo que contribuye a la practicidad del sistema dentro del laboratorio. Aunque el costo de producción (12%) es ligeramente superior al de la Alternativa 1, esta diferencia se justifica por la mejora en la confiabilidad térmica y en la repetitividad de los resultados obtenidos.

En contraste, la Alternativa 1, a pesar de ser más económica, presenta mayor complejidad constructiva y mayores pérdidas de calor por su geometría. La Alternativa 3, aunque posee buena precisión, requiere una estructura más compleja y un sistema de aislamiento menos eficiente, lo que afecta su factibilidad práctica.

Por lo tanto, se selecciona la Alternativa 2 como la opción más adecuada para el diseño del banco de pruebas para la determinación de la conductividad térmica, al ofrecer el mejor equilibrio entre exactitud experimental, eficiencia energética, facilidad de operación y estabilidad térmica, garantizando la validez de los ensayos y la seguridad del usuario.

## 2.5. Diseño del banco de pruebas para medición de conductividad térmica.

Tras determinar que la Alternativa 2 era la configuración más adecuada para el banco de pruebas, se procedió a seleccionar los componentes que conformaron su diseño final, asegurando que cada elemento cumpliera con los requisitos térmicos, estructurales y experimentales necesarios para la medición de conductividad térmica. La selección se basó en criterios de eficiencia térmica, estabilidad del gradiente de temperatura, reducción de pérdidas energéticas y compatibilidad con la instrumentación requerida.

### 2.5.1. Selección del material aislante

El aislante térmico desempeñó un papel fundamental en la estabilidad del banco de pruebas, ya que evitó pérdidas indeseadas de calor hacia el ambiente y permitió mantener un flujo de calor predominantemente unidireccional hacia la probeta. Se seleccionó un material con conductividad extremadamente baja ( $0.035 \frac{W}{m \cdot K}$ ), capaz de soportar temperaturas de operación superiores a 150 °C sin degradación [21].

Entre las opciones evaluadas lana de vidrio, fibra cerámica y espuma fenólica se seleccionó lana de vidrio debido a su:

- Alta resistencia térmica,
- Mínima conductividad,
- Compatibilidad con geometrías cilíndricas,
- Excelente desempeño como barrera térmica alrededor de las varillas.

Este aislante permitió encapsular las varillas y minimizar las pérdidas laterales, garantizando que la transferencia de calor se concentrara en dirección axial hacia la probeta central.

Una vez escogido el material aislante, se analizó qué espesor del mismo sería el adecuado para mantener la concentración de calor en el interior de la varilla compuesta. Entre las opciones analizadas: 8in, 4in, 2in se seleccionó el espesor de 8 in, puesto que al

tener un mayor espesor del aislante, se tuvo mayor concentración de temperatura y se redujeron en gran proporción el porcentaje de pérdidas de calor.

### **2.5.2. Selección del irradiador o fuente de calor**

Para generar un gradiente térmico estable y bien distribuido a lo largo de las varillas, se seleccionó un irradiador de tipo resistencia eléctrica cartucho debido a su:

- Alta densidad de potencia,
- Respuesta térmica rápida,
- Facilidad de control mediante variadores o controladores P&D,
- Geometría compatible con el extremo del módulo de varillas,
- Estabilidad durante ensayos prolongados.

La selección se justificó frente a otras fuentes como placas calefactoras, lámparas infrarrojas o resistencias de película, debido a que la resistencia tipo cartucho permitió una aplicación de calor puntual, controlada y de baja fluctuación, esencial para que los sensores registraran gradientes térmicos limpios y repetibles [22]. Además, su geometría cilíndrica facilitó el acoplamiento térmico directo con las varillas laterales de cobre y la probeta central, asegurando una transferencia homogénea hacia toda la matriz de varillas.

### **2.5.3. Selección de las varillas conductoras**

El sistema propuesto empleó tres varillas: dos varillas laterales de alta conductividad (cobre) y una varilla central correspondiente al material cuya conductividad térmica debía determinarse. Se eligieron dos varillas laterales de cobre debido a su elevada conductividad térmica ( $400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), lo que permitió utilizarlas como elementos de referencia para validar el comportamiento térmico del banco y asegurar la uniformidad del gradiente impuesto. Su función consistió en establecer un flujo conocido y estable que facilitara la detección de posibles pérdidas laterales o asimetrías. En la posición central se incorporó una varilla correspondiente al material

cuya conductividad térmica se deseaba determinar, seleccionada con el mismo diámetro que las varillas de referencia para garantizar continuidad geométrica, facilidad de montaje y repetibilidad en la transferencia de calor. Esta configuración permitió comparar los perfiles de temperatura entre el cobre y la probeta, facilitando la calibración del sistema y la aplicación del modelo nodal para la estimación de la conductividad térmica del material en estudio.

#### **2.5.4. Selección y ubicación de los sensores tipo termocupla**

Para registrar con precisión los perfiles de temperatura, se seleccionaron termocuplas tipo K, debido a su:

- Amplio rango de operación ( $-200$  a  $1200$  °C),
- Buena estabilidad
- Bajo costo,
- Respuesta rápida,
- Compatibilidad con sistemas de adquisición estándar.

Las termocuplas se ubicaron en:

- Los extremos caliente y frío de cada varilla,
- Posiciones intermedias a lo largo de la probeta central,
- Puntos de referencia en el aislante para verificar pérdidas térmicas.

Esta distribución permitió capturar la evolución del gradiente térmico y validar el comportamiento axial del flujo de calor [23]. Además, las termocuplas sirvieron como entrada para el esquema nodal y para la estimación de la conductividad mediante el método inverso.

#### **2.6. Cálculos previos**

Para la estimación de la conductividad térmica en los materiales evaluados, se desarrolló un procedimiento experimental integrado al banco de pruebas, en el cual la

distribución de temperaturas es procesada mediante un esquema nodal que permite realizar un balance de energía en cada punto de la probeta.

### 2.6.1. Discretización del dominio y construcción de la malla (x-r)

El dominio físico se dividió en una malla bidimensional en la dirección axial  $x$  y radial  $r$  de manera que cada punto de la geometría del banco de pruebas quede representado mediante un nodo  $(n, m)$  donde  $n$  es índice axial y  $m$  es índice radial [24].

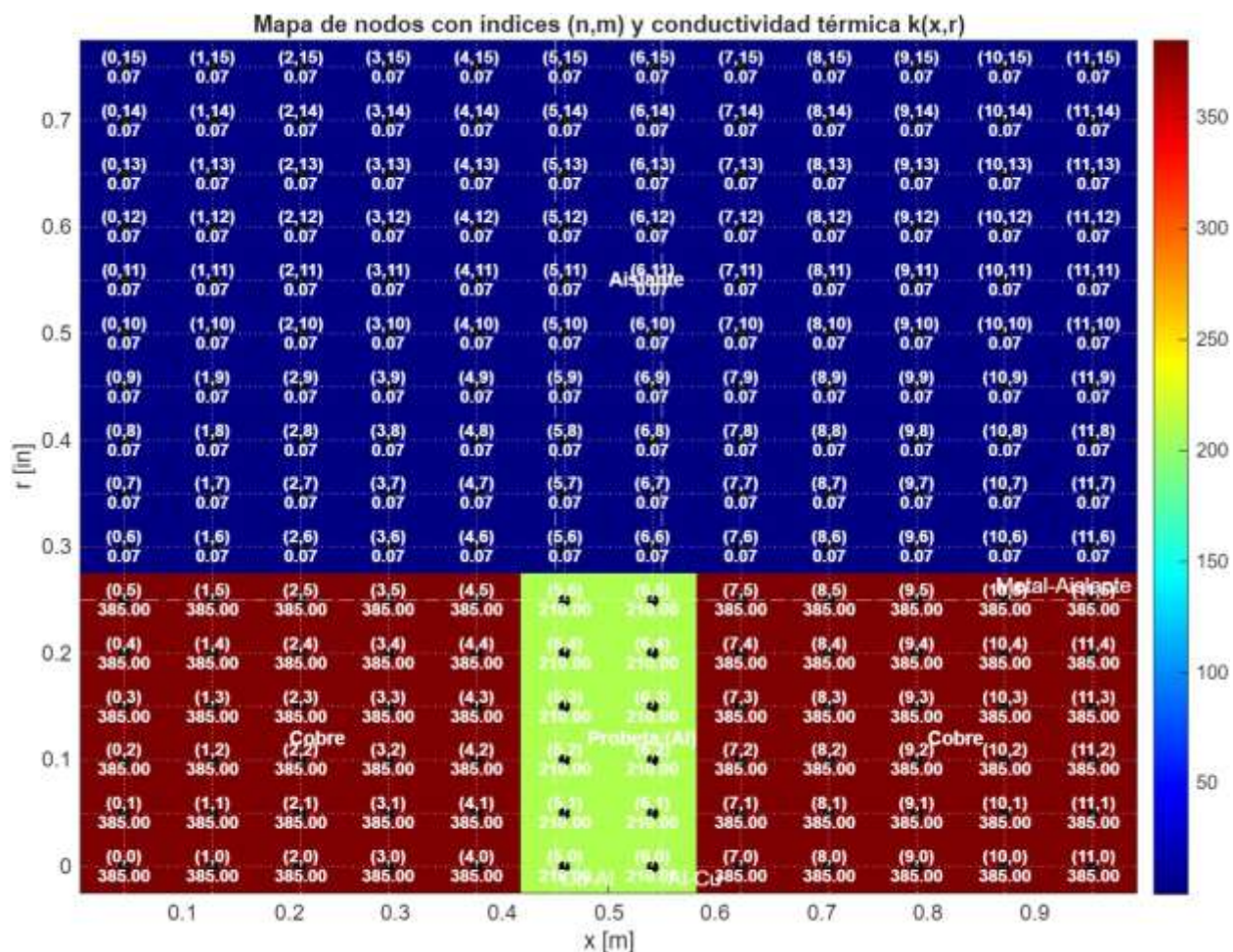
La separación entre nodos es:

$$\Delta x = \frac{L_{tot}}{N_x - 1} \tag{2.3}$$

$$\Delta r = \frac{r_{tot}}{N_r - 1} \tag{2.4}$$

Figura 5

Mapa de nodos con índices  $(n,m)$  y conductividad térmica  $k(x,r)$



*Nota.* La figura permite verificar visualmente que l malla representa correctamente las regiones de cobre, aluminio (probeta) y aislante.

### 2.6.2. Balance de energía en estado estable

En cada nodo se aplica un balance de energía estático:

$$\sum q_{entra} + \sum q_{sale} = 0 \quad 2.5$$

Y para representar la transferencia de calor presente en el banco de pruebas, se utilizaron las ecuaciones de conducción, convección y radiación.

$$q_{cond} = \frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1) \quad 2.6$$

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad 2.7$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) \quad 2.8$$

A partir de estas ecuaciones de transferencia de calor, se estableció el balance de energía correspondiente para cada nodo del dominio, considerando las particularidades térmicas de cada zona [25]. De esta manera, los nodos interiores emplearon únicamente la ecuación de conducción, mientras que en las superficies expuestas se integraron los términos adicionales de convección y radiación.

### Consideraciones

$$r_{total} = r_{mat} + r_{aislante} \quad 2.9$$

Donde:

$$r_{mat} = 0.25 \text{ in}$$

$$r_{aislante} = 4 \text{ in}$$

$$\Delta r = 0.05 \text{ in}$$

$$L_{Total} = L_{mat} + L_{probeta} + L_{mat} \quad 2.10$$

Donde:

$$L_{mat} = 0.45 \text{ m ; segmento principal | cobre}$$

$$L_{probeta} = 0.1 \text{ m ; segmento intermedio | aluminio}$$

$$L_{mat} = 0.45 \text{ m ; segmento secundario | cobre}$$

$$\Delta x = 0.1 \text{ m}$$

## Propiedades

$$h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$k_{cobre} = 400 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$k_{probeta} = \text{Desconocido}$$

$$k_{aislante} = 0.035 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$T_{inicial} = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$$

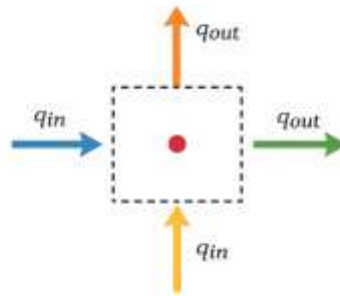
$$T_{\infty} = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## Asunciones

- Estado Estable
- Propiedades térmicas constantes
- Superficie inicial del aislante sin convección ni radiación

## Figura 6

*Balace de energía nodal*



## Ecuaciones para diferentes secciones

Zona (0,0)

$$q'_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)} \quad 2.11$$

$$\frac{k_{(n+1,m \rightarrow n,m)}(T_{n+1,m} - T_{n,m})}{\frac{\Delta x}{2}} \cdot \pi(\Delta r)^2 + \frac{k_{(n,m+1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m+1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi\Delta r \cdot \frac{\Delta x}{2} = 0 \quad 2.12$$

Zona (n,0) de n: 1 hasta i

$$i = \frac{L}{\Delta x} \quad 2.13$$

$$q'_{(n-1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)} = 0 \quad 2.14$$

$$\begin{aligned} & \frac{k_{(n-1,m \rightarrow n,m)}(T_{n-1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi(\Delta r)^2 + \frac{k_{(n+1,m \rightarrow n,m)}(T_{n+1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi(\Delta r)^2 \\ & + \frac{k_{(n,m+1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m+1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left(m + \frac{\Delta r}{2}\right) * \Delta x = 0 \end{aligned} \quad 2.15$$

Zona (i,0)

$$i = \frac{L}{\Delta x} + 1 \quad 2.16$$

$$q'_{(n-1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)} + q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)} = 0 \quad 2.17$$

$$\begin{aligned} & \frac{k_{(n-1,m \rightarrow n,m)}(T_{n-1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi(\Delta r)^2 + h(T_{\infty} - T_{n,m}) \cdot \pi(\Delta r)^2 \\ & + \frac{k_{(n,m+1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m+1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left(m + \frac{\Delta r}{2}\right) * \Delta x + \\ & h_r(T_{n,m} - T_{\infty}) \cdot \pi(\Delta r)^2 = 0 \end{aligned} \quad 2.18$$

Donde

$$h_r = \sigma(T_{n,m} + T_{\infty})(T_{n,m}^2 - T_{\infty}^2) \quad 2.19$$

$\sigma$ : Stefan Boltzmann constant

Zona (0,m) de m: 1 hasta j

$$j = \frac{r_{mat}}{\Delta r} \quad 2.20$$

$$\begin{aligned} & q'_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)} = 0 \\ & \frac{k_{(n+1,m \rightarrow n,m)}(T_{n+1,m} - T_{n,m})}{\frac{\Delta x}{2}} \cdot \pi \left( \left(m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2}\right)^2 - \left(m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2}\right)^2 \right) + \\ & \frac{k_{(n,m+1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m+1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left(m + \frac{\Delta r}{2}\right) * \frac{\Delta x}{2} + \\ & \frac{k_{(n,m-1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m-1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left(m + \frac{\Delta r}{2}\right) * \frac{\Delta x}{2} = 0 \end{aligned} \quad 2.21$$

Zona (0, m) de m:  $j_1$  hasta  $j_2$

$$j_1 = \frac{r_{mat}}{\Delta r} + 1 \quad 2.22$$

$$j_2 = \frac{r_{tot}}{\Delta r} - 1 \quad 2.23$$

$$q'_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)} = 0 \quad 2.24$$

$$\frac{k_{(n+1,m \rightarrow n,m)}(T_{n+1,m} - T_{n,m})}{\frac{\Delta x}{2}} \cdot \pi \left( \left(m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2}\right)^2 - \left(m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2}\right)^2 \right) +$$

$$\frac{k_{(n,m+1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m+1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi(m + \frac{\Delta r}{2}) * \frac{\Delta x}{2} + \frac{k_{(n,m-1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m-1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi(m + \frac{\Delta r}{2}) * \frac{\Delta x}{2} = 0 \quad 2.25$$

Esta diferencia permitió formular ecuaciones específicas por zona, garantizando que el modelo nodal representara con precisión los fenómenos térmicos que actúan en la probeta y en los materiales adyacentes.

### Cálculo de Flujo de calor Antes y Después de la probeta

$$Q'' = \frac{k_{cobre}}{\Delta x} (T_2 - T_1) \quad 2.26$$

$$Q''_{promedio} = \frac{Q''_{antes} + Q''_{después}}{2} \quad 2.27$$

### Cálculo de Conductividad Térmica

$$k_{probeta} = \frac{Q''_{promedio}(\Delta x)}{(T_{0.45} - T_{0.55})} \quad 2.28$$

Al ser una conductividad desconocida, se estimó analizando el flujo de calor en las fronteras de la probeta realizando así un análisis promedio para el flujo de calor en la zona de la probeta.

### Porcentaje de error

$$\%error = \frac{|k_{Teórico} - k_{experimental}|}{k_{Teórico}} * 100 \quad 2.29$$

### Modelo de medición con ruido (Termocupla)

La medición de temperatura mediante termocuplas se modeló considerando la adición de ruido gaussiano a la temperatura ideal obtenida del modelado del banco, de acuerdo con:

$$T_{TC} = T_{ideal} + \sigma * N(0,1) \quad 2.30$$

Donde

$T_{TC}$ : es la temperatura medida por la termocupla

$T_{ideal}$ : es la temperatura ideal calculada

$\sigma$ : desviación estándar del ruido

$N(0,1)$ : representa una variable aleatoria con distribución normal estándar

Para representar la incertidumbre máxima del sensor, las temperaturas simuladas se restringieron al rango de:

$$T_{ideal} - \Delta T \leq T_{TC} \leq T_{ideal} + \Delta T$$

Donde:

$\Delta T$ : es la diferencia de temperatura entre dos puntos

## 2.7. Selección de Mallado Numérico

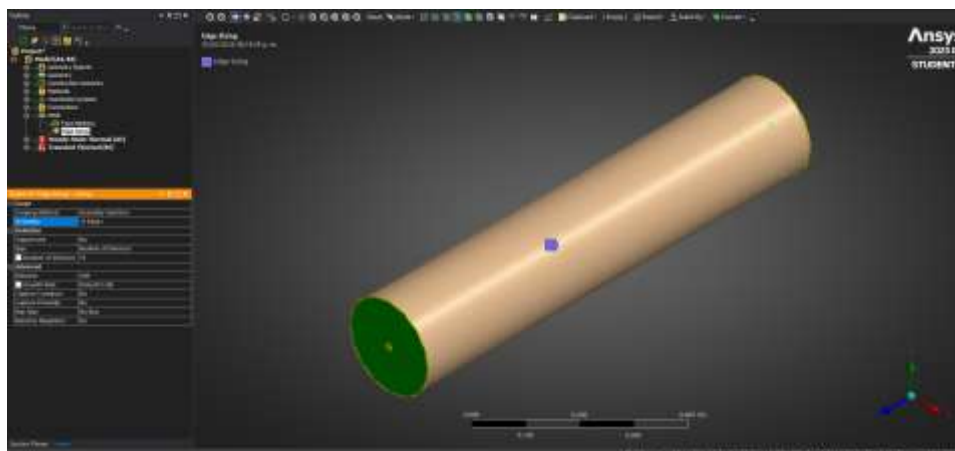
Con el fin de garantizar la estabilidad numérica y la confiabilidad de los resultados térmicos obtenidos mediante simulación, se definió una estrategia de mallado estructurado orientada a capturar adecuadamente los gradientes de temperatura a lo largo del eje axial y radial del sistema. El dominio geométrico está conformado por un conjunto de tres barras cilíndricas sólidas y un aislante cilíndrico hueco, lo que permitió la aplicación de técnicas de mallado controlado mediante edge sizing y face meshing, optimizando el número de elementos sin comprometer la precisión de la solución. El mallado fue implementado en ANSYS Workbench (versión Student), considerando las limitaciones propias de la plataforma en cuanto al número máximo de elementos permitidos.

Para controlar la discretización a lo largo de las direcciones longitudinal y circunferencial del modelo, se aplicó un criterio de edge sizing sobre un conjunto total de 10 aristas (edges) seleccionadas estratégicamente.

Sobre este conjunto de aristas se estableció un número uniforme de 16 divisiones, valor que representa el límite superior admisible de refinamiento dentro del entorno ANSYS Student. Esta configuración permitió obtener una malla suficientemente densa para describir el campo térmico, especialmente en las regiones de contacto entre materiales y a lo largo de la dirección axial, donde se esperan mayores gradientes de temperatura.

**Figura 7**

*Configuración del refinamiento mediante Edge Sizing*

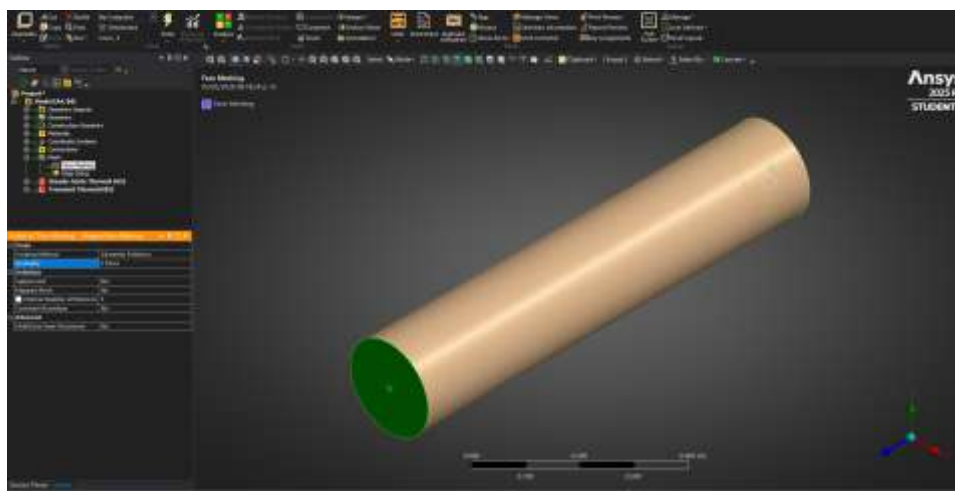


De manera complementaria, se empleó la técnica de face meshing sobre las dos caras extremas del cilindro aislante, con el objetivo de mejorar la calidad del mallado superficial y asegurar una adecuada transición de elementos en la generación de la malla volumétrica.

Esta configuración permitió obtener una malla más regular en las secciones transversales del aislante, favoreciendo la correcta propagación del calor en la simulación y reduciendo posibles distorsiones geométricas en los elementos cercanos a las fronteras.

**Figura 8**

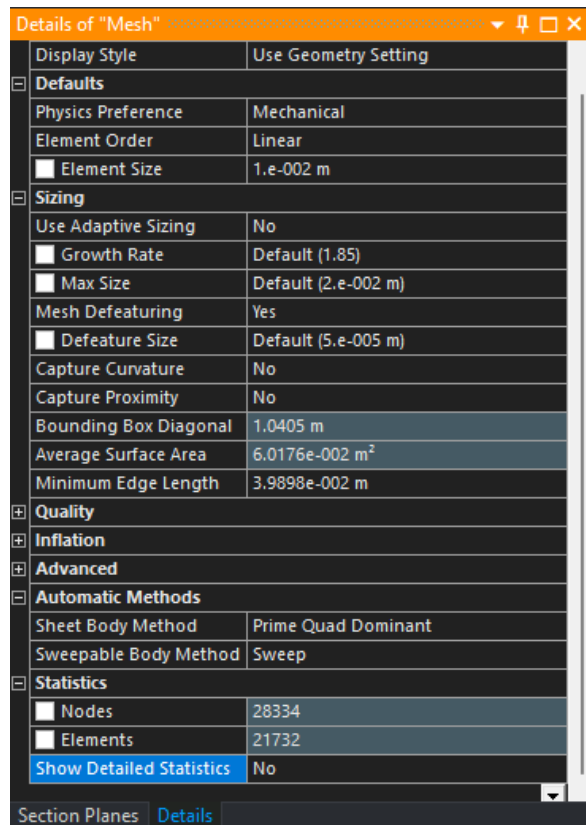
*Aplicación de Face Meshing sobre las dos caras extremas del cilindro aislante*



Una vez definidos los controles locales de mallado, se establecieron los parámetros globales de la malla. Se utilizó un método de mallado tipo Sweep, adecuado para geometrías predominantemente cilíndricas, lo que permitió generar una malla estructurada a lo largo del eje longitudinal del sistema. Asimismo, se seleccionó un orden de elemento lineal, consistente con el tipo de análisis térmico realizado y suficiente para capturar el comportamiento transitorio y estacionario del campo de temperaturas.

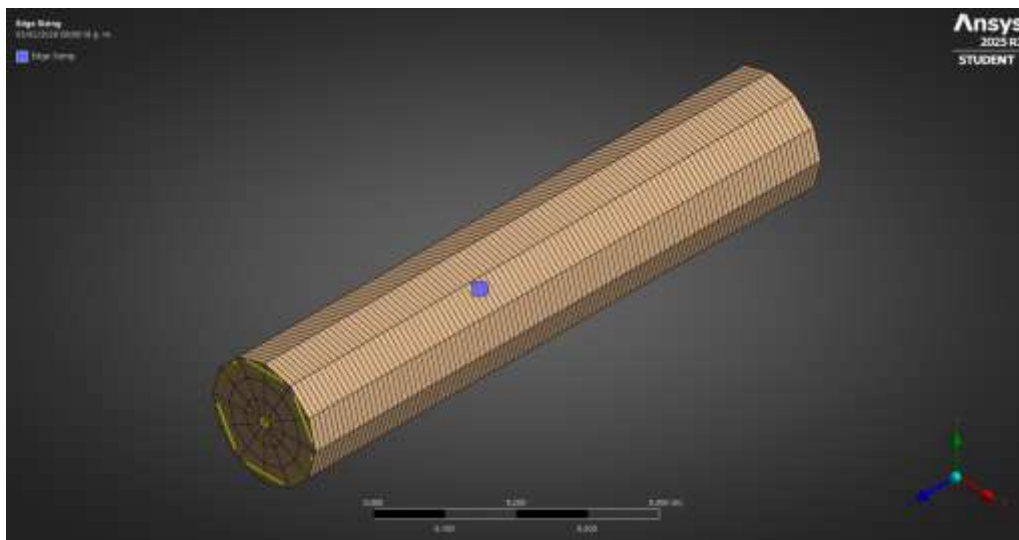
**Figura 9**

*Parámetros globales del mallado*

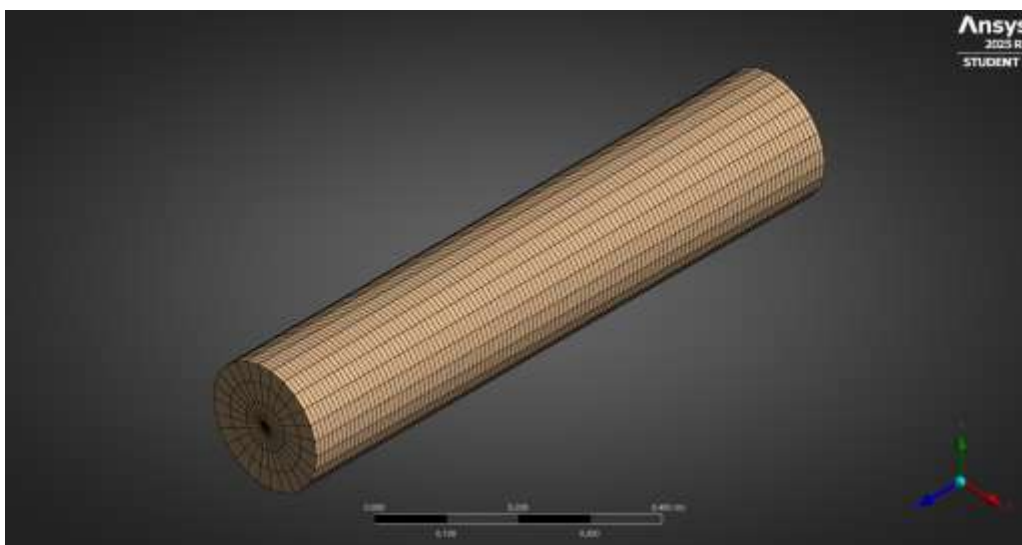


**Figura 10**

*Vista de la malla más holgada correspondiente a 6 divisiones por arista*

**Figura 11**

*Vista de la malla refinada correspondiente a 16 divisiones por arista*



## Capítulo 3

### 3. Resultados y análisis

#### 3.1. Evaluación del aislante

Mediante el uso de MATLAB, se generaron mapas de calor de distribución de temperatura de forma axial y radial, con el fin de evaluar cómo la variación en el espesor del material aislante influye en el comportamiento térmico del banco de pruebas. Se realizaron comparaciones considerando espesores del material aislante de 1.50, 4 y 8 [in].

**Tabla 3**

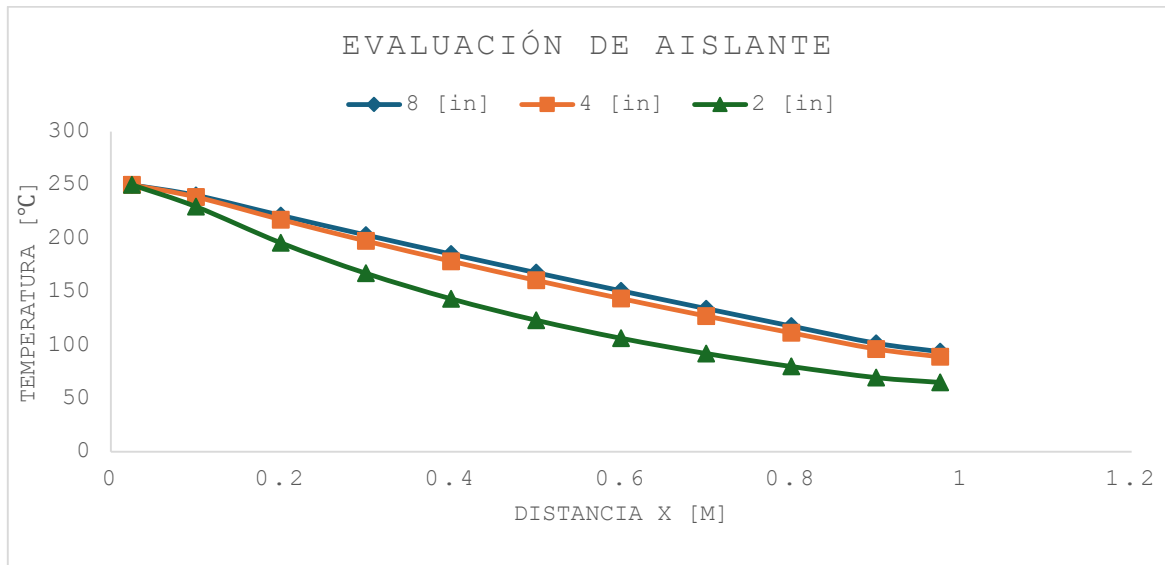
*Evaluación de Selección de espesor de Aislante (material: aluminio)*

Evaluación de Aislante (Aluminio)

Aislante D=8 [in]		Aislante D=4 [in]		Aislante D=2 [in]	
x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]
0.025	250	0.025	250	0.025	250
0.1	240.2593	0.1	238.7057	0.1	229.6711
0.2	221.3766	0.2	217.473	0.2	195.6592
0.3	203.0388	0.3	197.4621	0.3	167.1866
0.4	185.1944	0.4	178.5446	0.4	143.3183
0.5	167.7752	0.5	160.5801	0.5	123.2491
0.6	150.7509	0.6	143.4734	0.6	106.3445
0.7	134.0914	0.7	127.1317	0.7	92.0636
0.8	117.7323	0.8	111.4323	0.8	79.9197
0.9	101.6309	0.9	96.2748	0.9	69.5138
0.975	93.7298	0.975	88.9404	0.975	65.0144

**Figura 12**

*Comparación de Aislantes de diferente espesor (material: aluminio)*



Estas comparaciones permitieron analizar la influencia conjunta del espesor aislante y del nivel térmico sobre la distribución de temperatura, las pérdidas de calor y la eficiencia térmica del banco de pruebas. Como se observa en la Figura 12. A medida que aumenta el espesor del material aislante, se logra una mayor conservación de la temperatura axial, reduciendo significativamente las pérdidas de calor en los extremos del sistema. En consecuencia, se seleccionó un aislante con espesor de 8 [in], ya que esta configuración proporciona una mayor precisión en la medición, al minimizar los efectos de pérdidas térmicas no deseadas.

### **Simulación Estado Estable**

Se realizó el análisis térmico en estado estable del banco de pruebas, donde se empleó tres herramientas de modelado: un modelo matemático desarrollado en MATLAB, un modelo basado en bloques en Simulink/Simscape y un modelo computacional mediante ANSYS. Dicho análisis se aplicó a diferentes materiales conductores, específicamente aluminio, plata, acero inoxidable, latón y hierro fundido, con el fin de evaluar el desempeño térmico del sistema a diferentes conductividades.

### 3.1.1. Modelo Matemático en Matlab

**Tabla 4**

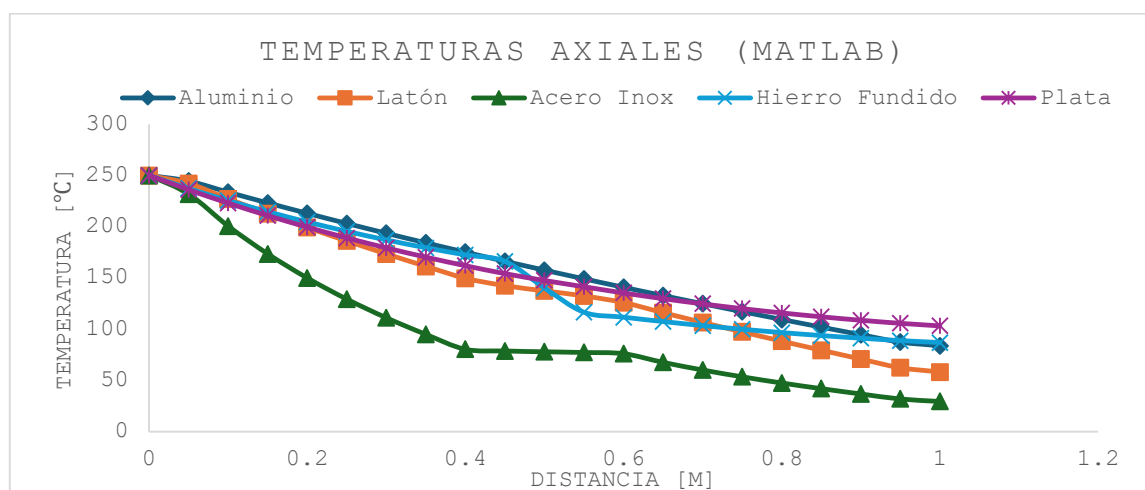
*Perfiles de temperaturas axiales en diferentes materiales (MATLAB)*

	ALUMINIO	LATÓN	ACERO INOXIDABLE	HIERRO FUNDIDO	PLATA
Distancia [m]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
0	250	250	250	250	250
0.05	244.4289	242.1371	231.7955	237.23	235.99
0.10	233.6306	227.1418	200.5245	225.44	222.95
0.15	223.1555	212.8158	173.4494	214.57	210.82
0.2	212.9866	199.1095	149.8875	204.57	199.54
0.25	203.1079	185.9768	129.2681	195.4	189.06
0.3	193.5041	173.3737	111.0955	187	179.33
0.35	184.1601	161.2582	94.9309	179.35	170.31
0.4	175.0613	149.5887	80.3666	172.4	161.95
0.45	166.1842	142.3971	78.7454	166.07	154.22
0.5	157.5154	137.2946	77.9612	140.02	147.55
0.55	149.0507	132.3645	77.2565	116.35	141.41
0.6	140.7855	125.8774	76.0826	111.57	135.36
0.65	132.7066	116.0492	67.64	107.27	129.8
0.7	124.7926	106.5189	60.1894	103.34	124.73
0.75	117.0313	97.2538	53.5366	99.766	120.11
0.8	109.4105	88.2229	47.5196	96.528	115.92
0.85	101.9188	79.3966	41.9942	93.613	112.14

0.9	94.5463	70.7476	36.8291	91.008	108.76
0.95	87.2918	62.2591	31.9078	88.707	105.77
1	83.7548	58.1243	29.5359	86.797	103.28

**Figura 13**

*Temperaturas vs Distancia en diferentes materiales (MATLAB)*



### 3.1.2. Modelo de bloques Simulink/Simscape

**Tabla 5**

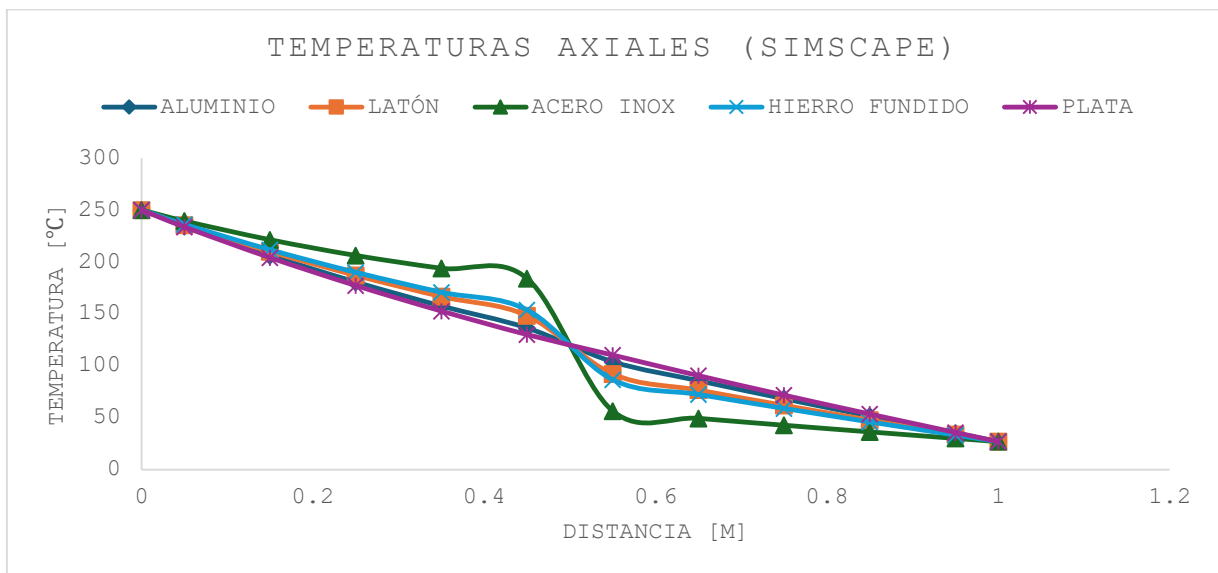
*Perfiles de temperaturas axiales en diferentes materiales (SIMSCAPE)*

	ALUMINIO	LATÓN	ACERO INOXIDABLE	HIERRO FUNDIDO	PLATA
Distancia [m]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
0	250	250	250	250	250
0.05	234.31	235.57	239.342	236.149	233.641
0.15	206.098	209.898	221.271	211.6432	204.082
0.25	180.623	187.02	206.1682	189.9587	177.228
0.35	157.495	166.587	193.8029	170.764	152.68
0.45	136.361	148.289	184.0216	153.7693	130.031

0.55	103.9	92.057	56.4338	86.5794	110.31
0.65	85.696	76.603	49.4423	72.4265	90.523
0.75	68.305	61.906	42.793	58.9674	71.702
0.85	51.546	47.743	36.385	45.9967	53.564
0.95	35.161	33.897	30.1205	33.3163	35.832
1	27	27	27	27	27

**Figura 14**

*Temperaturas vs Distancia en diferentes materiales (SIMSCAPE)*



### 3.1.3. Modelo numérico Ansys

**Tabla 6**

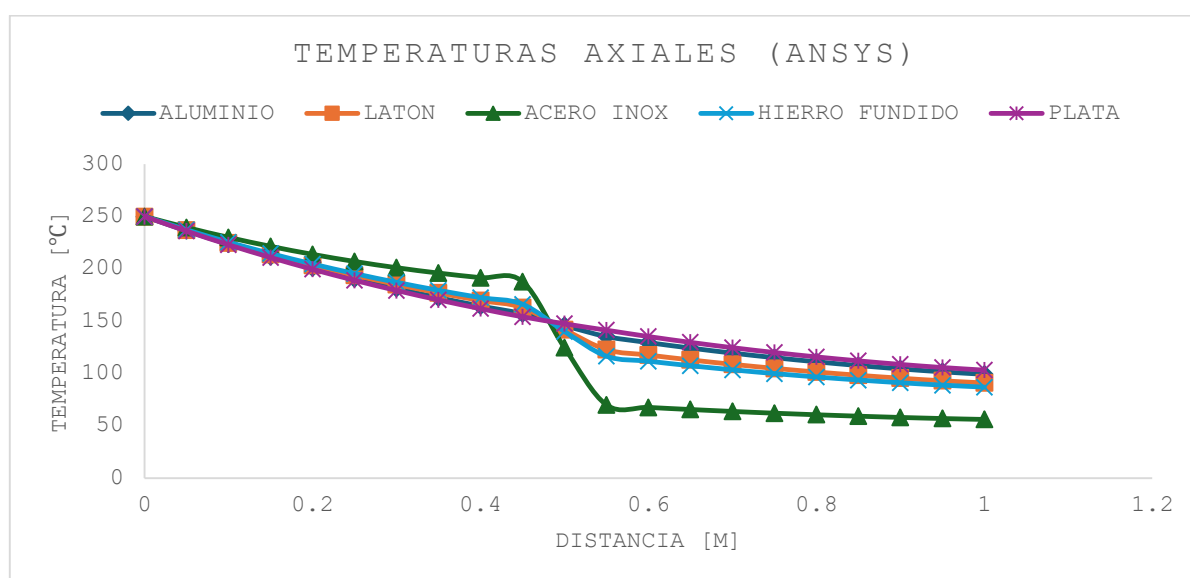
*Perfiles de temperaturas axiales en diferentes materiales (ANSYS)*

	ALUMINIO	LATÓN	ACERO INOXIDABLE	HIERRO FUNDIDO	PLATA
Distancia [m]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
0	250	250.00	250	250	250
0.05	236.29	236.92	239.52	237.23	235.99
0.10	223.55	224.81	230.02	225.44	222.95
0.15	211.73	213.61	221.47	214.57	210.82
0.2	200.76	203.29	213.81	204.57	199.54
0.25	190.6	193.78	207.03	195.4	189.06
0.3	181.19	185.04	201.07	187	179.33
0.35	172.5	177.04	195.93	179.35	170.31
0.4	164.49	169.73	191.57	172.4	161.95
0.45	157.08	163.04	187.86	166.07	154.22
0.5	145.76	141.99	124.64	140.02	147.55
0.55	135.37	122.78	69.99	116.35	141.41
0.6	129.6	117.66	67.654	111.57	135.36
0.65	124.36	113.05	65.638	107.27	129.8
0.7	119.56	108.83	63.799	103.34	124.73
0.75	115.19	104.98	62.13	99.766	120.11
0.8	111.24	101.50	60.623	96.528	115.92
0.85	107.67	98.37	59.273	93.613	112.14

0.9	104.48	95.57	58.073	91.008	108.76
0.95	101.65	93.09	57.02	88.707	105.77
1	99.306	91.04	56.156	86.797	103.28

**Figura 15**

*Temperaturas vs Distancia en diferentes materiales (ANSYS)*



En términos generales, la figura 6 evidencia que la variación de la temperatura axial en el banco de pruebas depende directamente de la conductividad térmica de cada material. Los materiales con mayor conductividad como el aluminio y la plata, presentan perfiles de temperatura más uniformes, manteniendo valores más elevados a lo largo de la distancia, lo que indica una transferencia de calor más eficiente. En contraste, materiales con menor conductividad térmica, como el hierro fundido, y especialmente el acero inoxidable, muestran gradientes térmicos más pronunciados, con una caída rápida de la temperatura conforme aumenta la distancia axial. El latón presente un comportamiento intermedio, coherente con su conductividad térmica moderada. Estos resultados confirman que la distribución de temperatura está fuertemente influenciada por las propiedades térmicas del material, validando la capacidad del banco de pruebas para diferenciar materiales según su conductividad térmica.

### 3.2. Resultados De Flujo De Calor Y Conductividad Térmica – Estado Estable

En esta sección se presentan los resultados de flujo de calor  $Q''$  [ $W/m^2$ ] y conductividad térmica  $k$  [ $W/m^2 \cdot K$ ], considerando dos materiales representativos de alta y baja conductividad (Plata-Acero Inoxidable). Es importante destacar que los valores obtenidos de flujo de calor y conductividad térmica fueron validados mediante la comparación entre las tres herramientas de modelado mencionadas anteriormente.

#### 3.2. 1 Flujo de Calor Estado Estable

El flujo de calor en estado estable se calculó a partir de la Ley de Fourier para conducción, ecuación 2.6.

**Tabla 7**

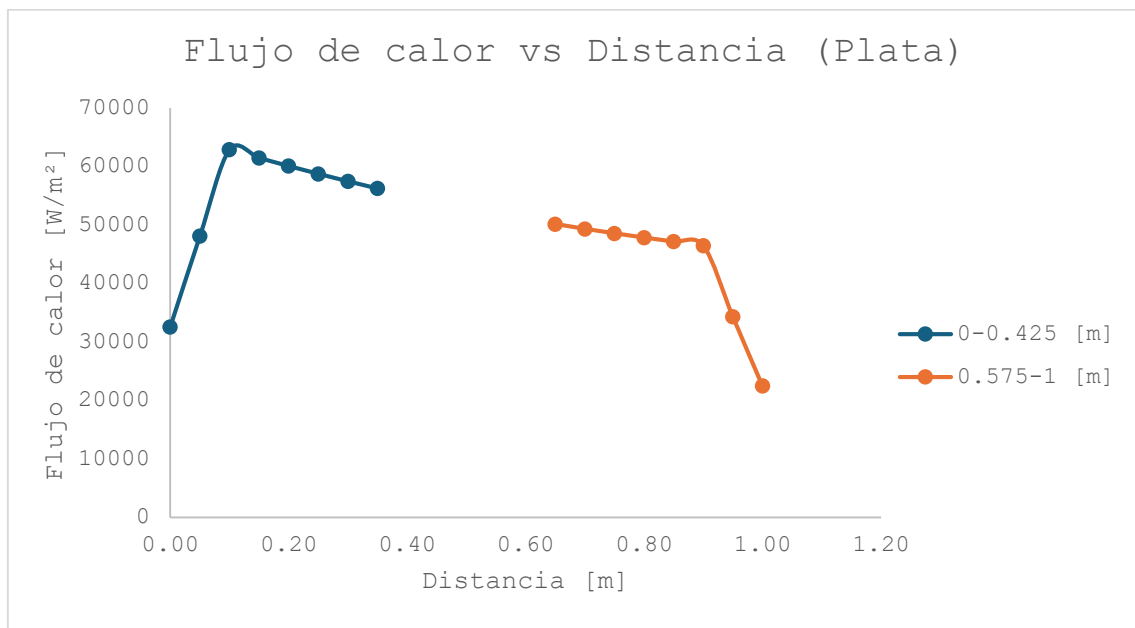
*Resultado de flujo de calor (Plata-MATLAB)*

MATLAB			
k [ $W/m^2 \cdot K$ ]	Distancia [m]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]	$Q''$ [ $W/m^2$ ]
401	0	250.00	32589.27
401	0.05	245.94	48118.00
401	0.1	238.00	62913.69
401	0.15	230.25	61475.71
401	0.2	222.67	60092.66
401	0.25	215.26	58761.74
401	0.3	208.02	57481.35
401	0.35	200.93	56249.87
401	0.4	193.99	62912.09
401	0.45	185.24	70178.21
401	0.55	161.38	66259.64
401	0.6	153.12	58415.68

401	0.65	146.81	50157.08
401	0.7	140.61	49348.26
401	0.75	134.51	48581.55
401	0.8	128.50	47855.34
401	0.85	122.57	47163.21
401	0.9	116.74	46473.49
401	0.95	110.98	34308.76
401	1	108.18	22495.30

**Figura 16**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Plata-MATLAB)*



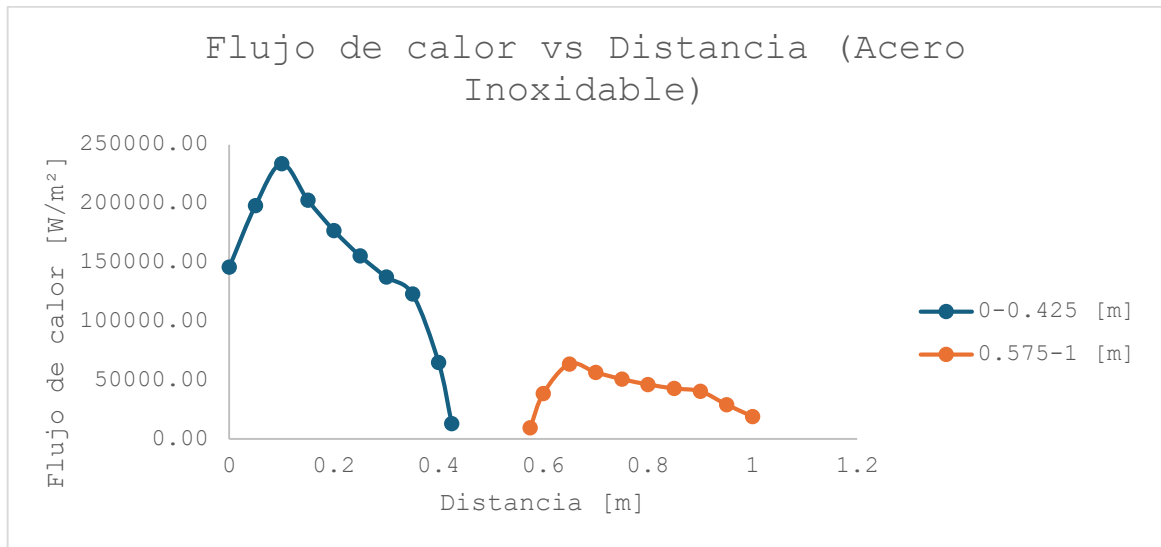
**Tabla 8***Resultado de flujo de calor (Acero Inoxidable-MATLAB)*

## MATLAB

k	Distancia	Temperatura	Q"
[W/m <sup>2</sup> ·K]	[m]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]
401	0.00	250.00	146000.09
401	0.05	231.80	198396.76
401	0.10	200.52	233967.86
401	0.15	173.45	203054.37
401	0.20	149.89	177167.01
401	0.25	129.27	155555.92
401	0.30	111.10	137692.17
401	0.35	94.93	123222.89
401	0.40	80.37	64903.85
401	0.45	78.75	13002.02
401	0.55	77.26	9414.68
401	0.60	76.08	38562.17
401	0.65	67.64	63731.73
401	0.70	60.19	56554.63
401	0.75	53.54	50805.90
401	0.80	47.52	46285.02
401	0.85	41.99	42868.91
401	0.90	36.83	40446.46
401	0.95	31.91	29245.73
401	1.00	29.54	19022.64

**Figura 17**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Acero Inoxidable-MATLAB)*

**Tabla 9**

*Resultado de flujo de calor (Plata-Ansys)*

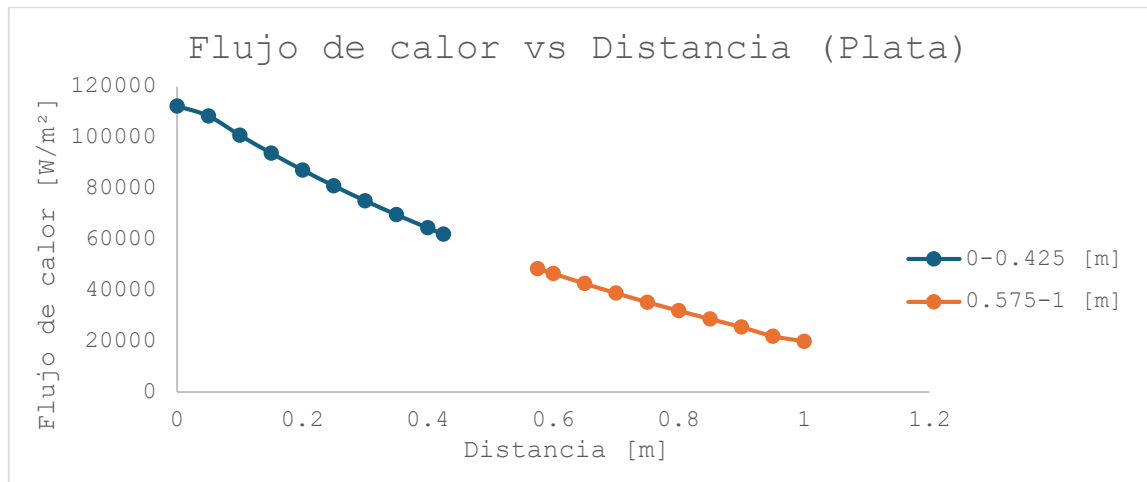
ANSYS

k	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q"
[W/m <sup>2</sup> ·K]			[W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250	112360.2
401	0.05	235.99	108470.5
401	0.1	222.95	100931.7
401	0.15	210.82	93874.1
401	0.2	199.54	87257.6
401	0.25	189.06	81042.1
401	0.3	179.33	75187.5
401	0.35	170.31	69693.8
401	0.4	161.95	64520.9
401	0.45	154.22	61994.6

401	0.55	141.41	48521
401	0.6	135.36	46556.1
401	0.65	129.8	42626.3
401	0.7	124.73	38856.9
401	0.75	120.11	35328.1
401	0.8	115.92	31959.7
401	0.85	112.14	28711.6
401	0.9	108.76	25543.7
401	0.95	105.77	21974.8
401	1	103.28	19969.8

**Figura 18**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Plata-ANSYS)*



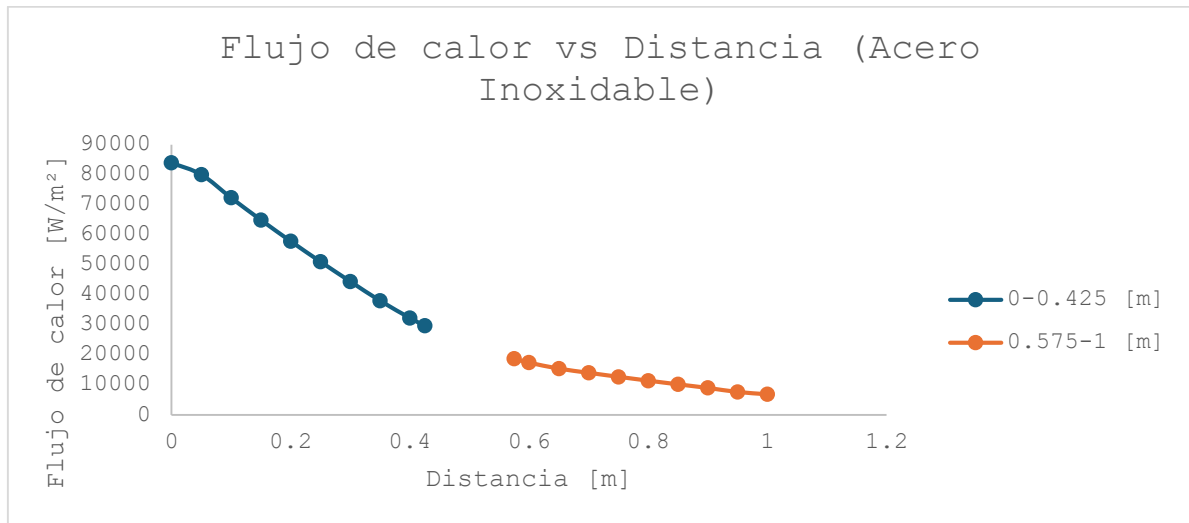
**Tabla 10***Resultado de flujo de calor (Acero Inoxidable-ANSYS)*

ANSYS

k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0.00	250	84049.6
401	0.05	239.52	80119.8
401	0.10	230.02	72380.5
401	0.15	221.47	65002.1
401	0.20	213.81	57904.4
401	0.25	207.03	51087.4
401	0.30	201.07	44511
401	0.35	195.93	38095
401	0.40	191.57	32360.7
401	0.45	187.86	29754.2
401	0.55	69.99	18734.72
401	0.60	67.654	17451.52
401	0.65	65.638	15458.55
401	0.70	63.799	14067.08
401	0.75	62.13	12735.76
401	0.80	60.623	11456.57
401	0.85	59.273	10225.5
401	0.90	58.073	9034.53
401	0.95	57.02	7687.17
401	1.00	56.156	6929.28

**Figura 19**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Acero Inoxidable-ANSYS)*

**Tabla 11**

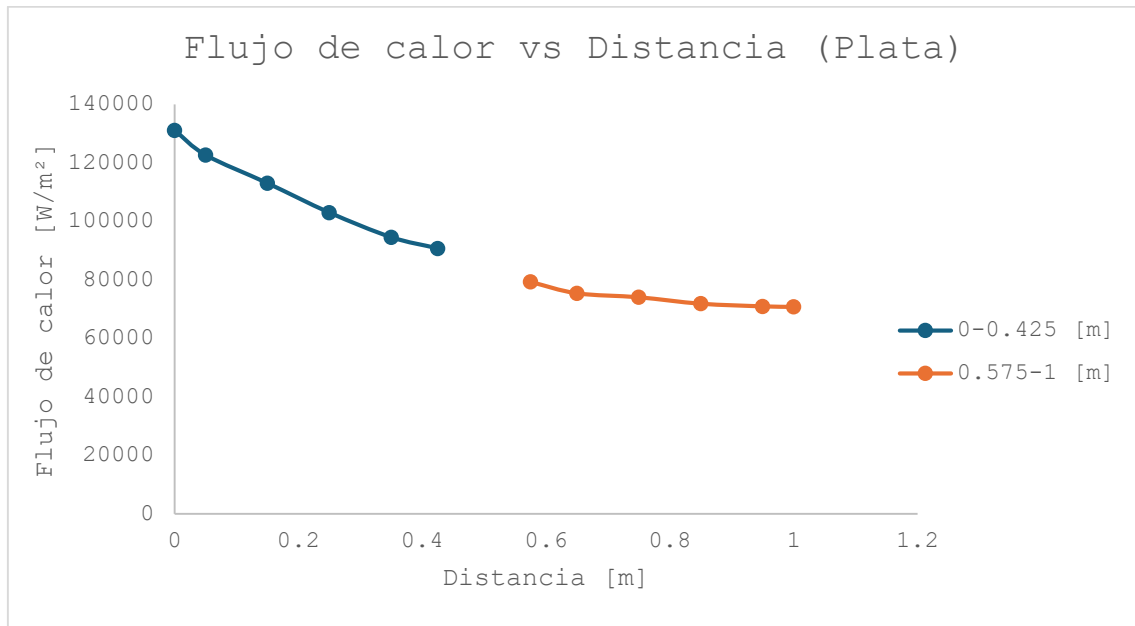
*Resultado de flujo de calor (Plata-SIMSCAPE)*

SIMSCAPE

k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250.00	131199.18
401	0.05	233.64	122754.12
401	0.15	204.08	113108.07
401	0.25	177.23	103061.01
401	0.35	152.68	94629.99
401	0.45	130.03	90822.49
401	0.55	110.31	79345.87
401	0.65	90.52	75472.21
401	0.75	71.70	74102.80
401	0.85	53.56	71919.35
401	0.95	35.83	71014.43
401	1	27.00	70832.64

**Figura 20**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Plata-SIMSCAPE)*

**Tabla 12**

*Resultado de flujo de calor (Acero Inoxidable-SIMSCAPE)*

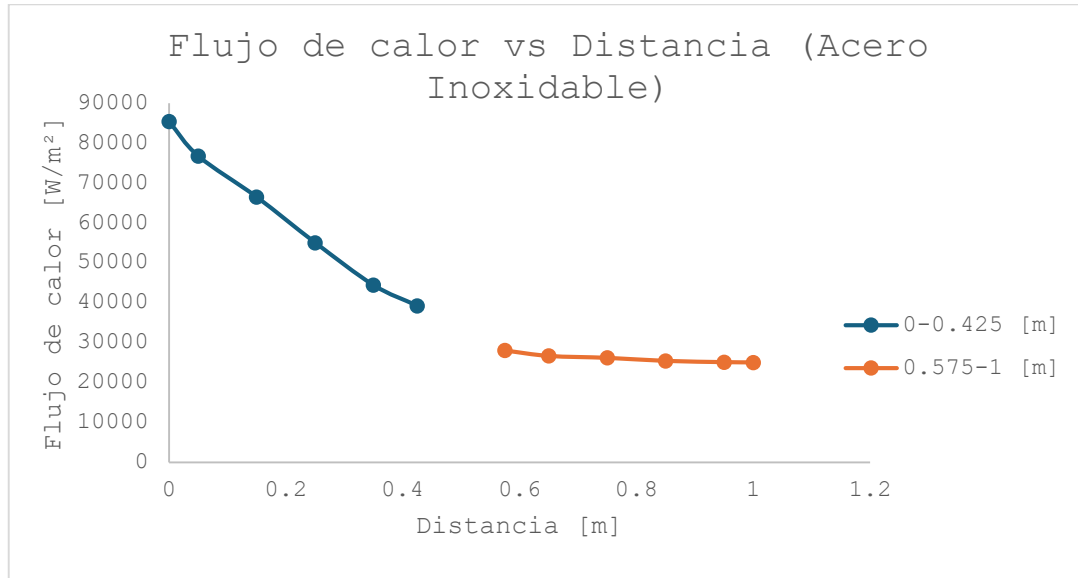
SIMSCAPE

k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250.00	85477.16
401	0.05	239.34	76802.19
401	0.15	221.27	66513.47
401	0.25	206.17	55073.54
401	0.35	193.80	44403.93
401	0.45	184.02	39223.01
401	0.55	56.43	28035.92
401	0.65	49.44	26663.69
401	0.75	42.79	26179.89
401	0.85	36.39	25408.36

401	0.95	30.12	25089.23
401	1	27.00	25026.41

**Figura 21**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Acero Inoxidable-SIMSCAPE)*



El análisis del flujo de calor axial evidencia diferencias significativas entre la plata y el acero inoxidable, atribuibles principalmente a sus contrastantes valores de conductividad térmica. En el caso de la plata, al presentar una conductividad térmica elevada, el flujo de calor se mantiene relativamente alto y con una variación axial más suave, por el contrario, el acero inoxidable caracterizado por una conductividad térmica considerablemente menos muestra un descenso más pronunciado del flujo de calor conforme aumenta la distancia, reflejo de una mayor resistencia térmica interna. Este comportamiento confirma que materiales con alta conductividad favorecen una distribución más uniforme del flujo de calor, mientras que materiales de baja conductividad intensifican su atenuación axial.

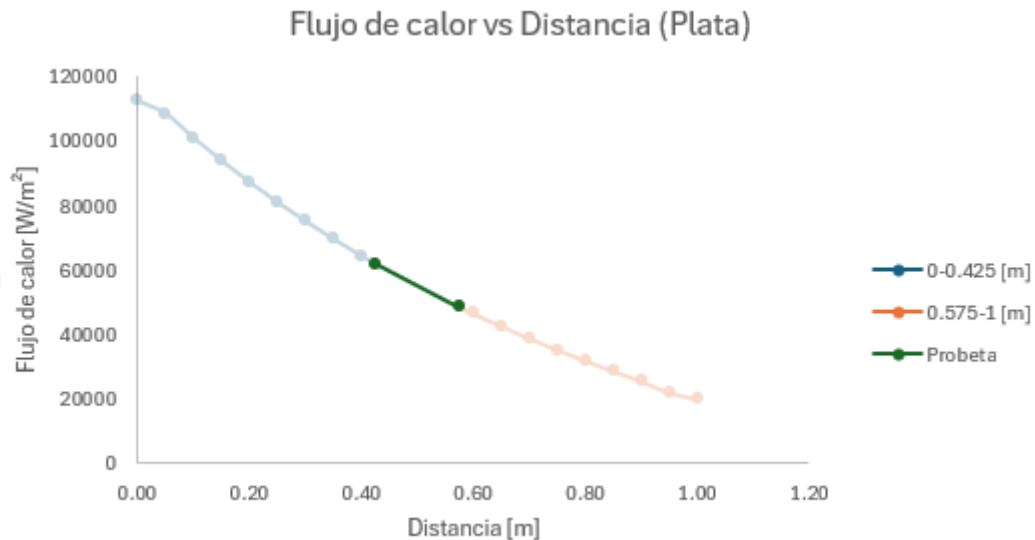
### 3.2.2 Conductividad Térmica Estado Estable

El flujo de calor se calculó anteriormente en dos regiones del banco de pruebas, antes de  $x = 0.45 [m]$  y después de  $x = 0.55 [m]$ , correspondientes a las zonas de cobre, cuyo valor de conductividad térmica es conocido. Estas regiones se seleccionaron debido a que la probeta central

presenta conductividad térmica desconocida, por lo que no es posible calcular directamente el flujo de calor en su interior. A partir de los valores de flujo de calor obtenidos en  $x = 0.425 [m]$  y  $x = 0.575 [m]$ , así como de las temperaturas medidas y la distancia axial  $\Delta x$ , se asumió un régimen de estado estable, permitiendo trazar una función de temperatura en la probeta Figura 22 y estimar una conductividad térmica promedio. De este modo, al despejar la ley de Fourier, se obtuvo el valor de conductividad térmica  $k [W/m^2 \cdot K]$  en un punto.

**Figura 22**

*Ejemplo de Función Trazada*



**Tabla 13**

*Conductividad (Plata-MATLAB)*

Temperatura	173.87
[°C]	
CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL	
[W/(m·K)]	
420.86	
CONDUCTIVIDAD TEORICA	
[W/(m·K)]	

425
ERROR
0.98%

**Tabla 14***Conductividad (Acero Inoxidable-MATLAB)*

Temperatura [°C]	78
CONDUCTIVIDAD	
EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	
20.53	
CONDUCTIVIDAD TEORICA	
[W/(m·K)]	
15.1	
ERROR	
35.99%	

**Tabla 15***Conductividad (Plata-ANSYS)*

Temperatura [°C]	148
CONDUCTIVIDAD	
EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	
431.36	
CONDUCTIVIDAD TEORICA	
[W/(m·K)]	
425	
ERROR	
1.50%	

**Tabla 16***Conductividad (Acero Inoxidable-ANSYS)*

Temperatura [°C]	129
CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL	
[W/(m·K)]	
20.56	
CONDUCTIVIDAD TEORICA	
[W/(m·K)]	
15.1	
ERROR	
36.22%	

**Tabla 17***Conductividad (Plata-SIMSCAPE)*

Temperatura	120
[°C]	
CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL	
[W/(m·K)]	
431.44	
CONDUCTIVIDAD TEORICA	
[W/(m·K)]	
425	
ERROR	
1.52%	

**Tabla 18***Conductividad (Acero Inoxidable-SIMSCAPE)*

Temperatura	120
[°C]	
<b>CONDUCTIVIDAD</b>	
<b>EXPERIMENTAL [W/(m·K)]</b>	
26.36	
<b>CONDUCTIVIDAD TEORICA</b>	
<b>[W/(m·K)]</b>	
15.1	
<b>ERROR</b>	
74.56%	

Los resultados de conductividad térmica obtenidos mediante los modelos de estado estable, al ser comparados con valores teóricos, muestran un buen nivel de concordancia para materiales de alta conductividad térmica, como la plata, donde los errores se mantienen entre 1-3%. En contraste, para materiales de baja conductividad térmica, como el acero inoxidable, se observaban errores significativamente mayores, lo cual puede atribuirse a una mayor sensibilidad a las pérdidas térmicas laterales, gradientes de temperaturas más pronunciadas y a la limitación del método que asume conducción unidimensional. Adicionalmente la conductividad térmica fue estimada a partir de un único punto de operación, correspondiente a una temperatura promedio, esta simplificación introduce inconvenientes especialmente en materiales cuya conductividad varía de forma más marcada con la temperatura.

En conjunto, los resultados confirman que el banco de pruebas y la metodología implementada, presentan mayor precisión para materiales altamente conductores, mientras que para materiales de menor conductividad es necesario aumentar puntos de medición para reducir errores observados.

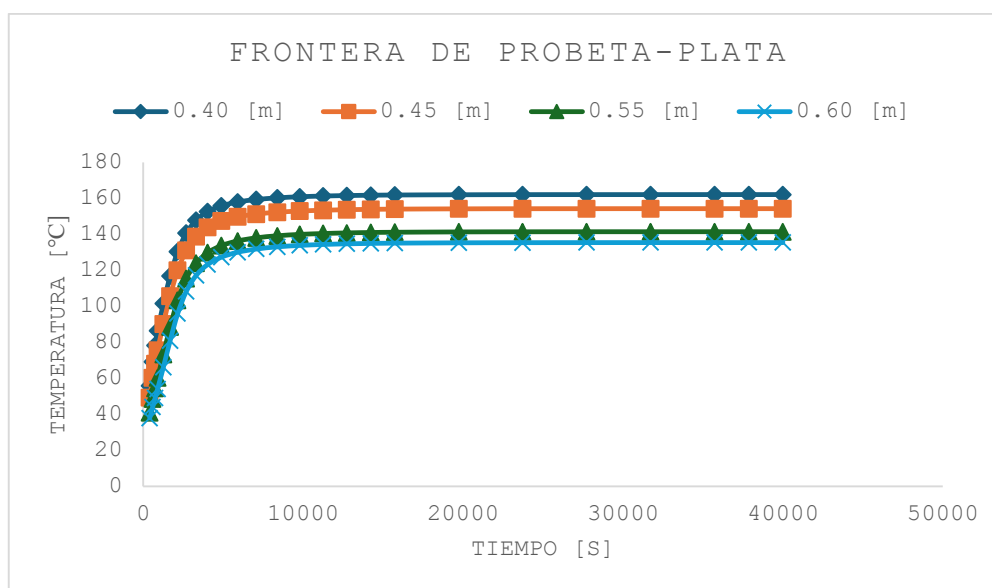
### 3.3. Simulación Estado Transitorio

Para el análisis térmico en régimen transitorio, se evalúa la evolución del flujo de calor  $Q''$  [ $W/m^2$ ] y de la conductividad térmica  $k$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] en el tiempo, considerando los materiales del método anterior (plata y acero inoxidable). A diferencia del estudio en estado estable, este análisis se desarrolló exclusivamente mediante simulaciones en ANSYS, lo que permitió estudiar la respuesta térmica dinámica del sistema y estimar la conductividad térmica como función de la temperatura, obteniendo curvas  $k(T)$  a partir de las condiciones transitorias.

Es importante mencionar que para estudiar cómo varía la conductividad en la temperatura se fijó puntos de interés en posiciones axiales  $x = 0.40 - 0.45 - 0.55 - 0.60$  [m], localizados en las fronteras de la probeta.

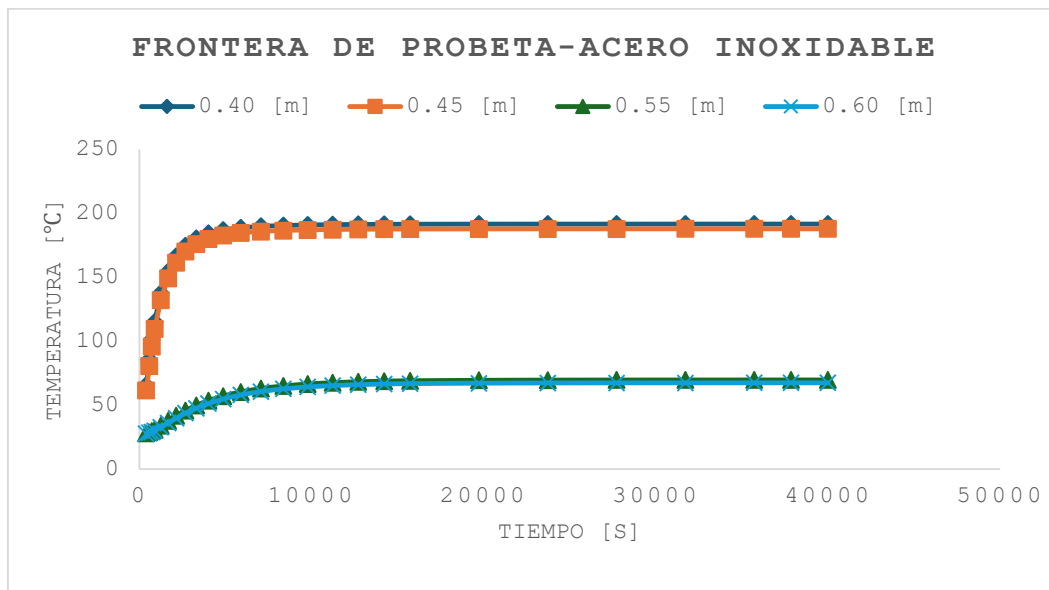
**Figura 23**

*Temperatura Antes y Después de la probeta, Plata*



**Figura 24**

*Temperatura Antes y Después de la probeta, Acero Inoxidable*



Las Figura 23 y Figura 24 evidencian claramente la influencia de la conductividad térmica del material en el comportamiento transitorio del sistema. En el caso de la plata, se observa una menor separación entre las curvas correspondientes a las distintas posiciones axiales, lo que indica una transferencia de calor eficiente y una adecuada conservación de la temperatura a lo largo de la probeta. Sin embargo, el acero inoxidable como ya se evidenció en el análisis de estado estable, presenta una brecha térmica significativa entre los puntos de interés, reflejando una mayor caída de temperatura y pérdidas térmicas más pronunciadas, propias de un material de baja conductividad térmica. Este contraste confirma nuevamente que los materiales altamente conductores mantienen una distribución térmica más uniforme, mientras que los de baja conductividad intensifican los gradientes de temperatura y disipación de calor.

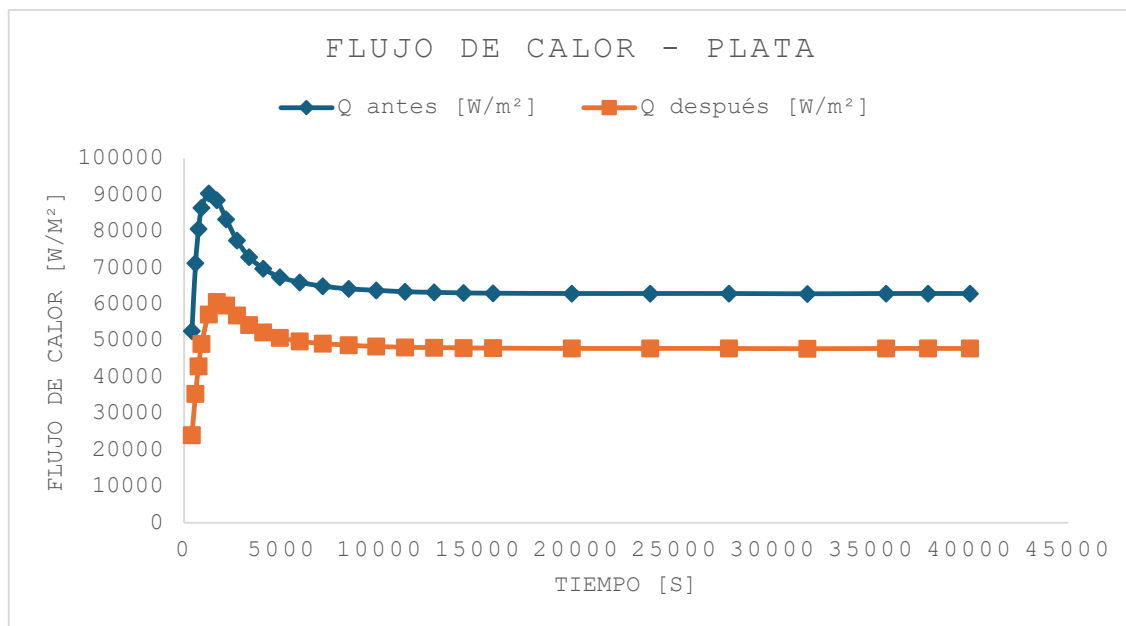
### 3.4. Resultados De Flujo De Calor y Conductividad Térmica – Estado Transitorio

#### 3.4.1 Flujo de Calor Estado Transitorio

En esta sección se presenta los valores de flujo de calor en estado transitorio, el cual se realizó de manera análoga al análisis en estado estable, aplicando la ley de Fourier en las regiones adyacentes a la probeta. El flujo de calor se estimó antes de la probeta utilizando los puntos axiales  $x = 0.40 - 0.45$  [m], a partir de los cuales se obtuvo un flujo de calor promedio, y después de la probeta empleando los puntos  $x = 0.55 - 0.60$  [m]. Estos valores de flujo de calor promedio, calculados en función del tiempo se utilizaron posteriormente para la estimación de la conductividad térmica del material, considerando las temperaturas transitorias y la distancia axial correspondiente.

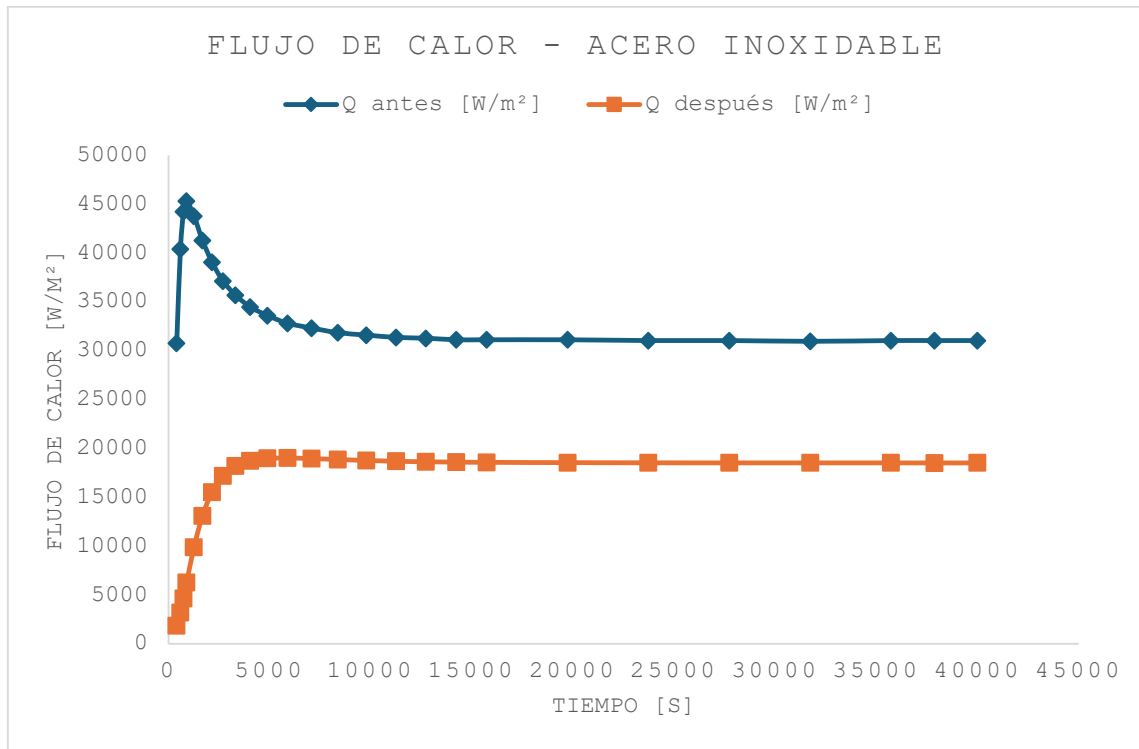
#### Figura 25

*Flujo De Calor Antes y Después de la probeta, Plata*



**Figura 26**

*Flujo De Calor Antes y Después de la probeta, Acero Inoxidable*



### 3.4.2 Conductividad Térmica Estado Transitorio

La estimación de la conductividad térmica en estado transitorio se obtuvo a partir de los valores promedio de flujo de calor calculados antes y después de la probeta, bajo la hipótesis de continuidad del flujo de calor en régimen transitorio. Utilizando el flujo de calor promedio y las temperaturas transitorias medidas, se determinó la conductividad térmica en función del tiempo, asociando cada instante a una temperatura promedio representativa del material. Este procedimiento permitió analizar la variación de la conductividad térmica con la temperatura, superando la limitación del estado estable, donde se obtiene un único valor promedio.

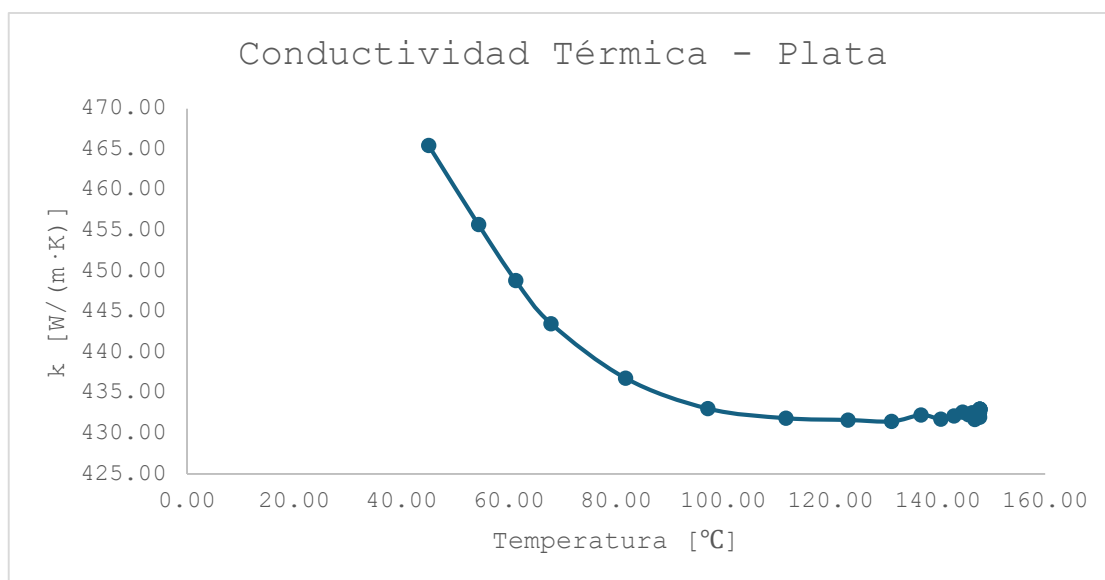
**Tabla 19***Conductividad en función de la temperatura, Plata*

Temperatura [°C]	k [W/(m·K)]
45.05	465.45
54.36	455.70
61.27	448.82
67.89	443.50
81.75	436.78
97.09	433.03
111.68	431.85
123.23	431.63
131.37	431.45
136.87	432.24
140.55	431.73
142.99	432.12
144.62	432.59
145.70	432.29
146.41	432.51
146.89	431.70
147.20	432.44
147.41	432.18
147.55	432.23
147.71	432.28
147.79	432.62

147.81	432.95
147.82	431.99
147.82	432.95
147.82	432.95
147.82	432.95

**Figura 27**

*Conductividad térmica, Plata*



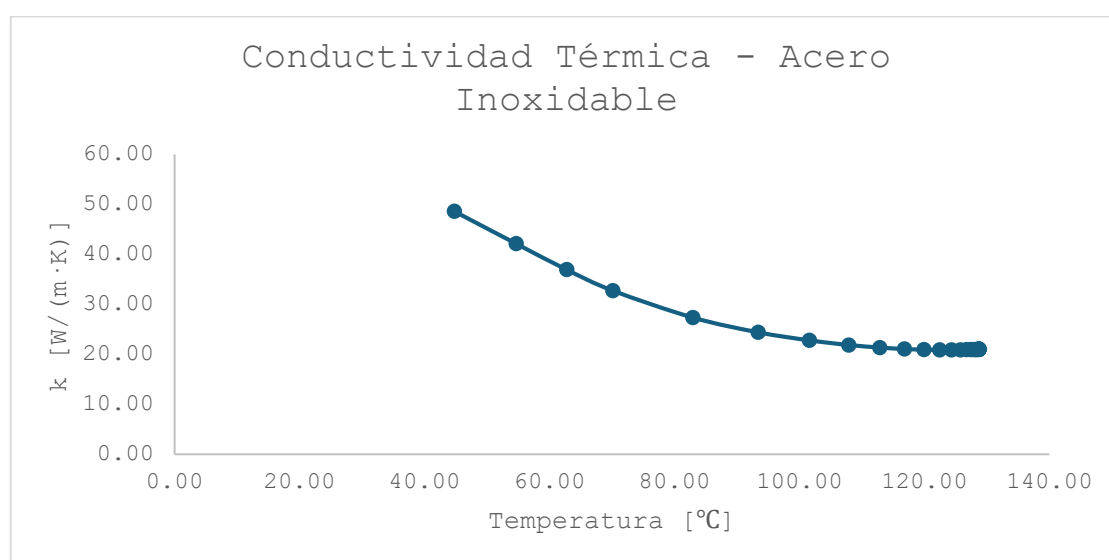
**Tabla 20***Conductividad en función de la temperatura, Acero Inoxidable*

Temperatura [°C]	k [W/(m·K)]
44.80	48.59
54.66	42.14
62.77	36.92
70.15	32.73
82.94	27.35
93.42	24.40
101.57	22.80
107.90	21.86
112.86	21.36
116.80	21.06
119.94	20.94
122.44	20.85
124.36	20.88
125.77	20.87
126.76	20.91
127.43	20.91
127.88	20.95
128.18	20.93
128.37	20.96
128.59	21.00
128.69	20.98

128.73	20.99
128.75	20.96
128.75	20.99
128.76	20.99
128.76	20.99

**Figura 28**

*Conductividad térmica, Acero Inoxidable*



Las curvas de conductividad térmica en función de la temperatura obtenidas en estado transitorio para la plata y el acero inoxidable muestran una tendencia convergente hacia valores cercanos a sus respectivas conductividades térmicas teóricas, sin embargo la cuantificación precisa del error resulta limitada, ya que para ello sería necesario disponer de la conductividad térmica real de cada material como función de la temperatura  $k(T)$ , información que no se encuentra completamente disponible para todo el rango térmico analizado. A pesar de esta limitación, los resultados obtenidos son útiles y relevantes, ya que permite aproximar la variación de la conductividad térmica con la temperatura y constituyen una base sólida para ampliar el conocimiento del comportamiento térmico de los materiales.

### 3.5. Comportamiento de la distribución de temperaturas al aplicarle ruido

Con el fin de representar de manera más realista las mediciones de temperaturas obtenidas mediante termocuplas, se incorporó ruido artificial a las señales de temperatura ideales utilizando MATLAB. Este procedimiento permite simular la incertidumbre a las mediciones experimentales, considerando una incertidumbre máxima de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , valor típico para las termocuplas industriales. Esto se realizó para estado estable y estado transitorio, donde posteriormente se realizó el cálculo de flujo de calor y estimación de conductividad térmica.

#### 3.5.1 Resultados Con Ruido, Estado Estable

**Tabla 21**

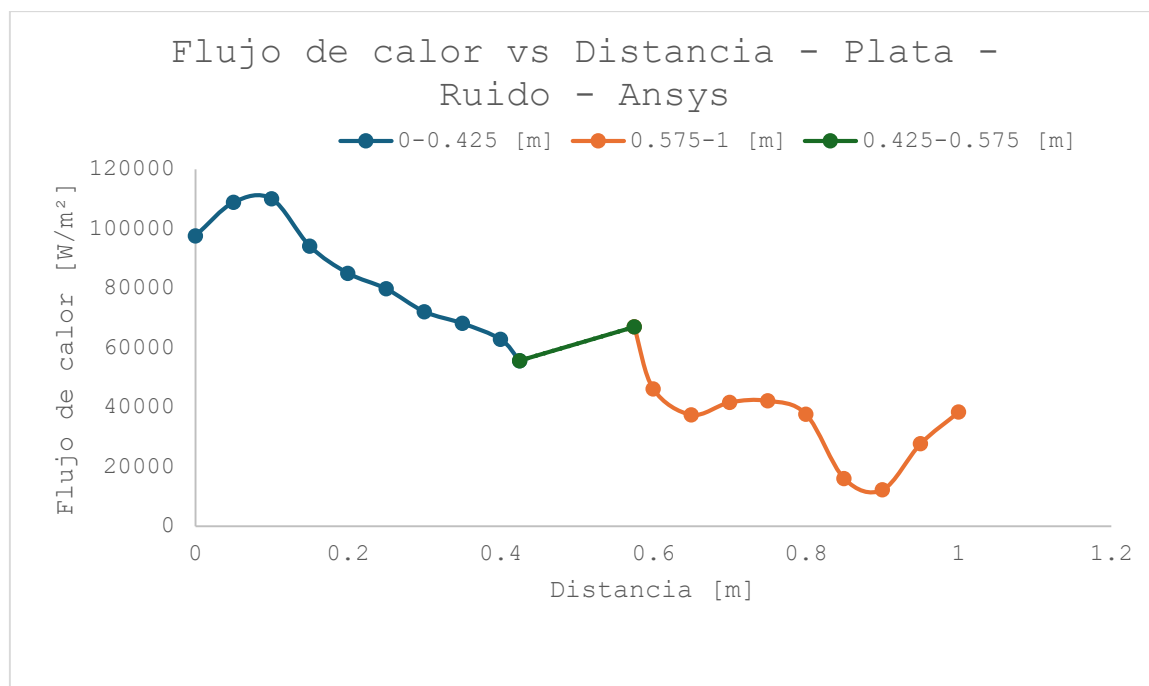
*Datos Extraídos con Ruido, Plata - ANSYS*

	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$Q''$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
0	249.35	97682.16
0.05	237.17	108909.35
0.1	222.19	110117.72
0.15	209.71	94223.36
0.2	198.69	85104.44
0.25	188.49	79891.75
0.3	178.77	72175.81
0.35	170.49	68242.90
0.4	161.75	62884.57
0.45	154.81	55712.50
0.55	142.21	67045.00
0.6	133.85	46253.13
0.65	130.68	37547.17

0.7	124.49	41700.23
0.75	120.28	42235.84
0.8	113.95	37721.61
0.85	110.87	16117.83
0.9	109.94	12313.78
0.95	107.80	27790.62
1	103.00	38450.43

**Figura 29**

*Flujo de calor Estado estable, Plata - ANSYS*



**Tabla 22***Datos de conductividad Estado Estable, Plata – ANSYS*

CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL
[W/(m·K)]
439.95
CONDUCTIVIDAD TEORICA [W/(m·K)]
425
ERROR
3.52%

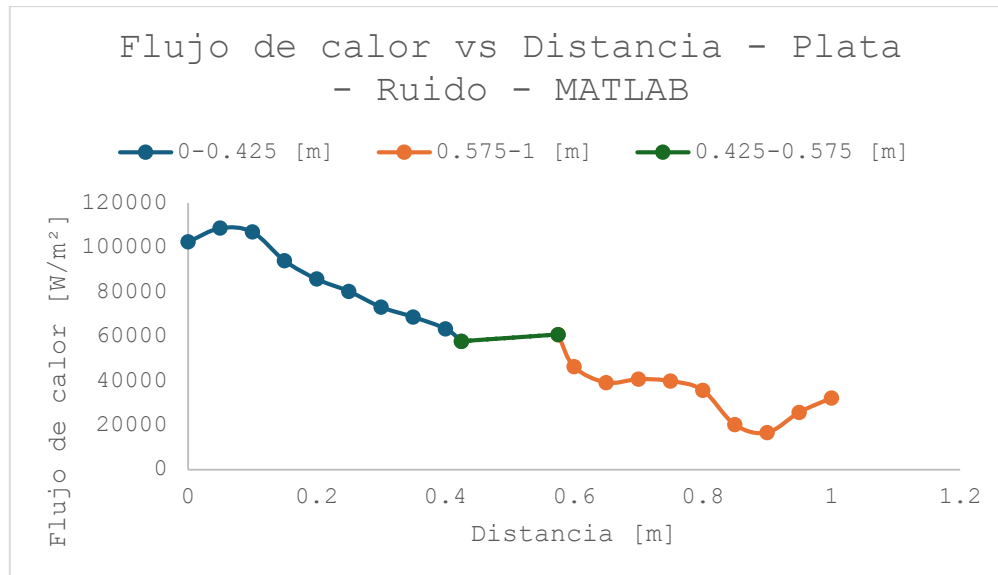
**Tabla 23***Datos Extraídos con Ruido, Plata - MATLAB*

	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
0	249.57	136214.89
0.05	236.78	198689.08
0.1	222.44	240091.53
0.15	210.08	203287.35
0.2	198.98	175731.83
0.25	188.68	154789.21
0.3	178.96	135684.37
0.35	170.43	122255.28
0.4	161.82	63812.73
0.45	154.61	8813.98
0.55	141.94	21763.87
0.6	134.35	38360.06
0.65	130.38	60345.69

0.7	124.57	58450.16
0.75	120.22	55410.98
0.8	114.61	50126.20
0.85	111.29	34473.17
0.9	109.54	31626.47
0.95	107.12	33122.60
1	103.10	31342.96

**Figura 30**

*Flujo de calor Estado estable, Plata - MATLAB*

**Tabla 24**

*Datos de conductividad Estado Estable, Plata – ANSYS*

CONDUCTIVIDAD	
EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	
468.43	
CONDUCTIVIDAD TEORICA	
[W/(m·K)]	
425	

ERROR

---

10.22%

La incorporación de ruido de medición para simular el comportamiento real de una termocupla tuvo un impacto diferenciado en la estimación de la conductividad térmica de la plata. En ANSYS, el error aumentó de 1.50% sin ruido a 3.52% con ruido, evidenciando una mayor sensibilidad del cálculo de la conductividad térmica a pequeñas variaciones. Por otro lado, en MATLAB, el error se incrementó de 2.21% sin ruido a 10.22% con ruido, lo que indica que el método es más susceptible al ruido aleatorio cuando se utilizan datos puntuales sin un filtrado o suavizado adicional.

### 3.5.2. Resultados Con Ruido, Estado Transitorio

**Tabla 25**

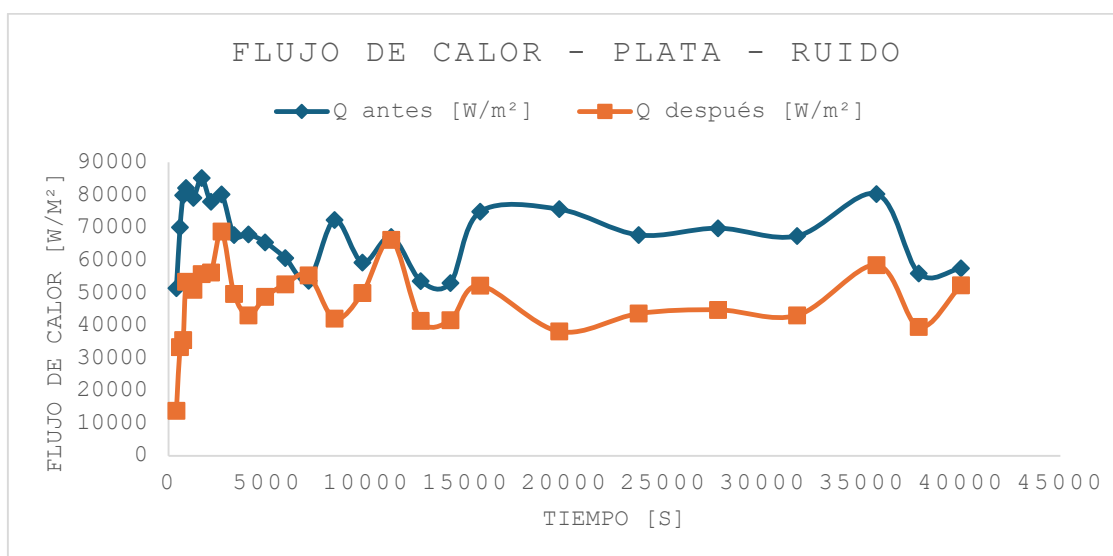
*Datos Extraídos con Ruido, Plata - ANSYS*

Tiempo [s]	Q antes [W/m <sup>2</sup> ]	Q después [W/m <sup>2</sup> ]
400	51461.132	13816.856
584.76	70091.592	33364.002
738.93	79969.024	35496.52
893.1	82175.326	53373.1
1253.9	79166.222	50900.534
1674.3	85206.084	55739
2148.8	77927.132	56229.022
2687.4	80229.674	68870.146
3307.1	67714.464	49708.762
4030.3	67943.836	43047.35
4884	65517.786	48750.372

5893.5	60674.508	52627.24
7066.5	53733.198	55386.12
8378.5	72322.756	42092.97
9784.7	59315.118	49918.886
11244	67191.56	66224.348
12728	53598.462	41378.388
14225	53053.904	41605.354
15727	74903.592	52225.438
19727	75654.264	38132.694
23727	67748.95	43656.87
27727	69850.19	44807.74
31727	67448.2	43131.56
35727	80362.004	58550.812
37864	55968.372	39576.294
40000	57489.766	52314.46

**Figura 31**

*Flujo de calor Estado Transitorio, Plata - ANSYS*



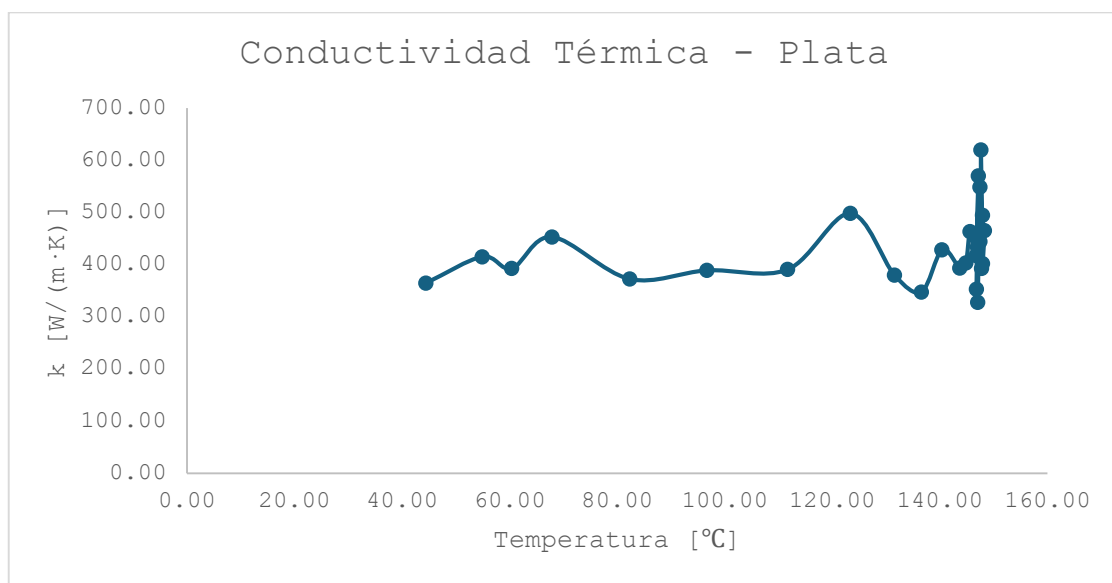
**Tabla 26***Datos De Conductividad y Temperatura, Plata - ANSYS*

Temperatura [°C]	k [W/(m·K)]
44.42	364.44
54.91	414.81
60.39	392.42
67.86	452.83
82.32	372.19
96.69	388.76
111.67	390.34
123.32	498.03
131.54	379.77
136.56	347.33
140.40	428.11
143.68	393.15
144.84	402.61
145.63	462.96
146.75	416.91
147.14	569.82
146.80	352.38
147.02	327.34
147.47	547.98
147.49	444.19
146.99	433.86

147.95	494.14
147.95	401.65
147.63	619.43
147.76	392.33
148.29	464.77

**Figura 32**

*Datos de conductividad Estado Transitorio, Plata*



En estado transitorio, la incorporación de ruido en las temperaturas medidas genera fluctuaciones visibles tanto en el flujo de calor  $Q''$  [ $W/m^2$ ] como en la conductividad térmica  $k$  [ $W/m^2 \cdot K$ ]. El flujo de calor antes y después de la probeta presenta oscilaciones a lo largo del tiempo, especialmente durante las primeras etapas del transitorio, lo que se asocia a la combinación de gradientes térmicos elevados y a la incertidumbre introducida por el ruido de medición; sin embargo, conforme el sistema evoluciona, las fluctuaciones se mantienen dentro de un rango acotado indicando una tendencia hacia la estabilización del régimen térmico. A pesar de esta dispersión, la conductividad térmica estimada oscila alrededor de valores cercanos a la conductividad teórica de la plata. Estos resultados resaltan la importancia de aplicar técnicas de

filtrado para reducir la variabilidad y mejorar la estabilidad de la estimación de propiedades térmicas bajo condiciones dinámicas.

### 3.6. Conductividad Térmica Aluminio 2024

Debido a que para los materiales analizados previamente en estado transitorio no fue posible realizar una comparación directa de la conductividad térmica en función del tiempo, se presenta el análisis correspondiente al Aluminio 2024, material para el cual se obtuvo la conductividad real en función de la temperatura por medio del programa IHT (Interactive Heat Transfer). Mediante este enfoque se obtuvo la conductividad térmica como función de la temperatura, con la metodología ya empleada anteriormente, considerando ruido de medición y la conductividad sin ruido.

**Tabla 27**

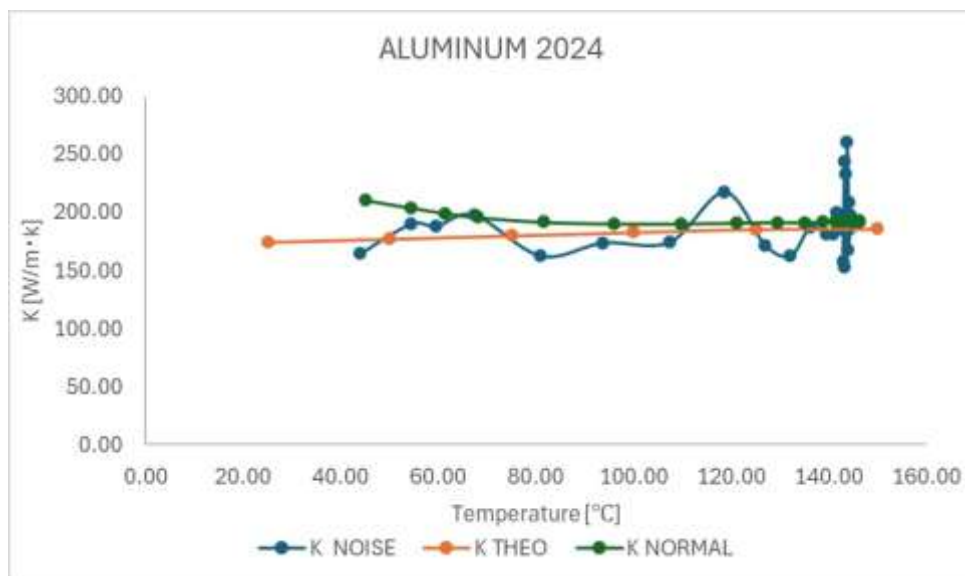
*Datos de conductividad térmica – Aluminio 2024*

K RUIDO		K REAL		K SIN RUIDO	
k	Temperatura	k	Temperatura	k	Temperatura
[W/(m·K)]	[°C]	[W/(m·K)]	[°C]	[W/(m·K)]	[°C]
164.53	43.95	174.30	25.00	210.77	44.98
189.86	54.28	177.10	50.00	204.09	54.37
188.13	59.55	180.00	75.00	199.41	61.41
197.86	67.27	182.90	100.00	195.77	68.13
162.39	80.95	185.80	125.00	191.70	81.60
173.79	93.69	186.00	150.00	190.27	95.97
174.23	107.28	186.00	175.00	190.39	109.74
217.55	118.54	186.00	200.00	190.99	121.12
171.64	126.87	186.00	225.00	191.52	129.34
162.50	132.08	186.00	250.00	191.47	134.96

187.29	136.09	191.92	138.74
181.24	139.50	192.28	141.25
180.99	140.73	192.37	142.93
200.35	141.57	192.57	144.04
185.75	142.74	192.44	144.77
243.95	143.14	192.48	145.27
158.42	142.82	192.30	145.59
152.87	143.04	192.66	145.80
233.26	143.50	192.42	145.95
198.04	143.53	192.63	146.12
193.44	143.03	192.63	146.19
209.03	144.00	192.48	146.22
185.69	144.00	192.70	146.22
260.46	143.68	192.55	146.23
168.08	143.81	192.55	146.23
198.13	144.34	192.55	146.23

**Figura 33**

*Curvas de conductividades Aluminio 2024*



Se observa en la Figura 33 que tanto la conductividad estimada sin ruido, como la conductividad estimada con ruido presentan inicialmente cierta dispersión, atribuida a la variabilidad del régimen transitorio y, en el segundo caso, a la incertidumbre introducida por el ruido de la medición. No obstante, a medida que aumenta la temperatura y el sistema se aproxima a condiciones más estables, ambas estimaciones convergen progresivamente hacia la conductividad real, evidenciando que las diferencias observadas se deben principalmente a efectos transitorios. Este comportamiento confirma que, pese a la presencia de ruido, el procedimiento empleado es capaz de reproducir la tendencia real de la conductividad térmica, mostrando convergencia y consistencia en la estimación de  $k$  para el Aluminio 2024.

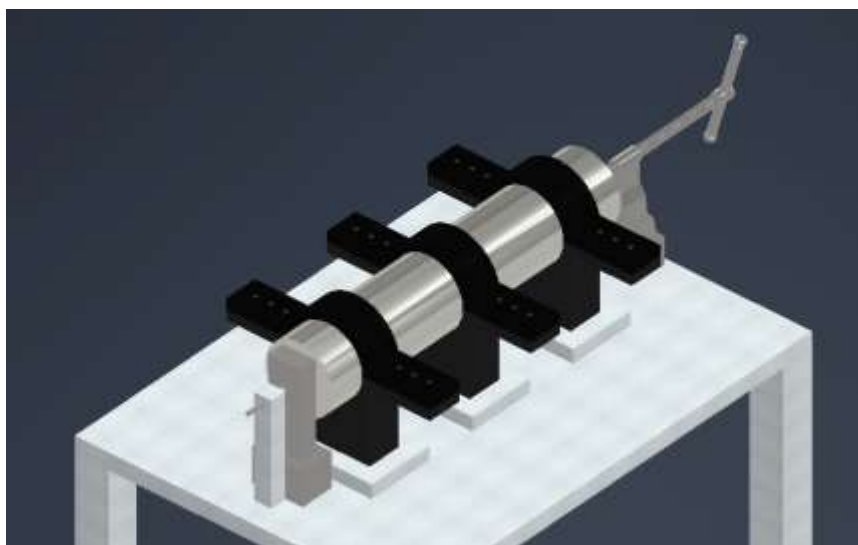
### 3.7. Planos de Construcción

El banco de pruebas está diseñado para la medición de la conductividad térmica en muestras cilíndricas mediante conducción de calor predominante. La probeta se encuentra rodeada por un aislante térmico de fibra de vidrio que a su vez está recubierta por una capa delgada protectora, con el fin de minimizar pérdidas de calor hacia el ambiente y evitar el desgaste del aislante.

El calentamiento se realiza mediante una resistencia tipo cartucho, ubicada axialmente, mientras que una prensa mecánica asegura un contacto térmico adecuado entre la resistencia y las varillas internas. El conjunto además se fija mediante abrazaderas, garantizando estabilidad durante las mediciones.

**Figura 34**

*Vista isométrica Banco de pruebas*



Nota: Los planos de los materiales se encuentran en Apéndice A

**Tabla 28**

*Costos del prototipo*

Ítem	Componente	Especificación técnica	Cant	Costo unitario (USD)	Subtotal (USD)
1	Controlador de temperatura PID	Controlador digital PID, entrada termocupla tipo K, salida SSR, control estable hasta 400 °C	1	35.71	35.71
2	Termocuplas tipo K	Termocupla tipo K con aislamiento de fibra de vidrio,	20	8.92	178.40

rango 0–400 °C, para  
fronteras

3	Resistencia tipo cartucho	DERNORD 120V 250W	1	10.99	10.99
4	Relay de estado sólido (SSR)	SSR 40 A con disipador térmico, compatible con controlador PID	1	15.99	15.99
5	Aislante térmico	Fibra de vidrio en rollo para aislamiento radial del cilindro	1	89.95	89.95
6	Varillas de cobre	Cobre electrolítico, Ø 0.50 in, longitud 0.45 m	2	25.45	50.90
7	Abrazaderas metálicas	Abrazaderas de acero para fijación y alineación del conjunto	3	7.99	23.97
8	Prensa mecánica	Prensa tipo tornillo para asegurar contacto térmico entre varillas y probeta	1	29.07	29.07
9	Soporte final	Soporte metálico fijo para alineación axial del banco	1	15.00	15.00
10	Cableado y accesorios	Conectores para termocupla, cables de potencia, fusibles y bornes	—	35.00	35.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$484.98</b>

El prototipo del banco de pruebas presenta un costo total de \$484.98, siendo los sistemas de medición y control térmico los que concentran la mayor inversión, en particular las termocuplas tipo K y el controlador PID, fundamentales para asegurar precisión y estabilidad térmica. Los componentes estructurales y de montaje representan una fracción menor de costo, lo que evidencia un diseño económicamente viable y funcional, adecuado para aplicaciones académicas y experimentales sin comprometer la confiabilidad de las mediciones.

## Capítulo 4

## 4.1. Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1.1. Conclusiones

- Se logró diseñar y seleccionar adecuadamente los elementos mínimos necesarios para el funcionamiento del banco de pruebas, garantizando condiciones térmicas controladas y repetibles. El uso de aislamiento térmico adecuado y sensores distribuidos permitió minimizar pérdidas de calor en los extremos y mejorar la precisión de las mediciones, manteniendo un diseño económicamente viable y funcional para aplicaciones académicas y experimentales
- La implementación del método de conducción de calor permitió estimar la conductividad térmica de los materiales analizados con errores reducidos para materiales de alta conductividad. En estado estable, la plata presentó errores de 1,50% sin ruido y 3,52% con ruido utilizando ANSYS, evidenciando la confiabilidad del método bajo condiciones controladas. El régimen transitorio permitió obtener la conductividad térmica como función de la temperatura, mostrando convergencia hacia valores teóricos.
- El modelo computacional desarrollado en ANSYS, reprodujo de manera coherente los perfiles de temperatura y flujo de calor observados experimental y numéricamente. En particular se evidenció que materiales de alta conductividad presentan gradientes térmicos menores, mientras que materiales de baja conductividad, como el acero inoxidable, muestran caídas de temperatura más pronunciadas y mayores pérdidas térmicas, lo que explica errores superiores en su estimación.
- El modelo de estimación implementado en MATLAB y Simulink®/Simscape® mostró concordancia con los valores teóricos en estado estable, con errores de 2,21% sin ruido. Sin embargo, al incorporar ruido de medición de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , el error aumentó hasta 10,22%, lo que indica la alta sensibilidad del cálculo de conductividad térmica al gradiente de temperatura y la necesidad de aplicar estrategias de filtrado para mejorar el método en condiciones experimentales reales.

#### 4.1.2. Recomendaciones

- Se recomienda incrementar el número de puntos de medición de temperatura y reforzar el aislamiento térmico en zonas extremas, para la estimación de conductividad térmica en materiales de baja conductividad como el acero inoxidable, con el fin de reducir las pérdidas laterales, y gradientes térmicos pronunciados.
- Se sugiere implementar técnicas de filtrado en las señales de temperatura obtenidas por las termocuplas, con el objetivo de mitigar el efecto del ruido de medición, tanto para estado estable y estado transitoria.
- Se recomienda disponer de conductividad térmica en función de la temperatura para otros materiales, con el fin de cuantificar con mayor precisión el error en régimen transitorio.
- Se sugiere integrar el banco de pruebas con un sistema de adquisición de datos en tiempo real, que permita automatizar la medición y el procesamiento de señales, mejorando repetibilidad de los ensayos y reduciendo la influencia del error en la estimación de propiedades térmicas.

## Referencias

- [1] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, River Street, Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] I. E. Agency, «Near-Zero Emissions Materials Production and Trade,» de *Energy Technology Perspectives 2024 Webinar*, Paris, 2024.
- [3] L. F. Zavala, F. J. Martinez, Z. Pineda y P. Cruz, «Desarrollo y validación de un aparato para determinar,» *Journal of Basic Sciences*, México, 2023.
- [4] A. Rojo de la Fuente, «Diseño, construcción y validación de un prototipo modificado de hot box de escala reducida para la evaluación de la conductividad térmica de diferentes materiales aislantes bajo condiciones controladas,» Universidad de Valladolid, 2024.
- [5] A. Gonzalez , «Quality Function Deployment: Una herramienta para establecer los requerimientos técnicos de un edificio en México,» Universidad Politecnica de Valencia, 2014.
- [6] M. Creus, D. Paz, A. Galella y R. Enrich, «DISEÑO CONCEPTUAL DE UN DISPOSITIVO DE BAJO COSTO PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES SECOS EN RÉGIMEN ESTACIONARIO,» Cátedra de Matemática Nº 2 y Laboratorio de Investigación Proyectual. FAU – UNLP, 2015.
- [7] Organizacion de Naciones Unidas ONU, «Objetivos de desarrollo sostenible,» 10 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.
- [8] L. L. Cortes, «Necesidades de medición de conductividad térmica para el cumplimiento de normas de eficiencia energetica en edificaciones,» Centro Nacional de Metrología, Mexico, 2009.
- [9] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, D.F, Mexico: McGraw Hill, 2007.
- [10] M. Mendoza, M. J. M. Piñas, M. Horn y M. Gomez, «CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH USADOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN,» Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Peru, 201.

- [11] J. Sanchez, «Simulación estacionaria y transitoria de la temperatura en depósitos formados por materiales de distinta conductividad,» Universidad Politecnica de Cartagena, Cartagena, 2017.
- [12] E. Espinel y J. C. Hernandez, «BANCO DE PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA COMO HERRAMIENTA PEDAGOGICA PARA LA ENSEÑANZA DE TRANSFERENCIA DE CALOR,» UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER, Ocaña, 2015.
- [13] L. Acuña, C. Salinas, V. Sepulveda, D. Vasco y R. Ananias, «DETERMINACIÓN INVERSA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN MADERA DE *Pinus radiata*,» Universidad de Santiago de Chile, Chile, 2018.
- [14] A. Vasco, «Aspectos Computacionales de Conducción de calor,» Universidad Nacional de Colombia, Medellin, 2017.
- [15] J. Q. N. L. S. Z. Kuibin Zhou, «Validity evaluation on temperature correction methods by thermocouples with different bead diameters and application of corrected temperature,» International Journal of Thermal Sciences, 2018.
- [16] A. A. M. G. A.V.S. Oliveira, «Thermocouple response time estimation and temperature signal correction for an accurate heat flux calculation in inverse heat conduction problems,» Universite de Lorraine, France, 2022.
- [17] M. E. Pizzo, «Characterization of a Method for Inverse Heat Conduction Using Real and Simulated Thermocouple Data,» Old Dominion University , USA, 2017.
- [18] A. Carrillo, K. I. Gonzalez y O. Mendoza, Introduccion al metodo de diferencias finitas y su implementacion computacional, Mexico: Facultad de ciencias, UNAM, 2015.
- [19] D. Quiroga Arcila y J. Vargas Encinales, «EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN AISLANTES,» Fundación universidad de América, Bogotá D.C., 2018.
- [20] M. A. P. M. M. J. H. M. M. J. G. L. M. M. M. Mendoza, «Thermal conductivity of sandwich compounds used in the construction industry,» Universidad Nacional de Ingeniería, Peru, 2021.
- [21] M. Palomo Cano, «AISLANTES TÉRMICOS: CRITERIOS DE EVALUACIÓN POR REQUISITOS ENERGÉTICOS,» Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 2017.

- [22] A. Yábar Vidán, «Caracterización Térmica de Intercambiadores de Calor Bifásicos en Condiciones Extremas,» Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2019.
- [23] J. C. Barragan Izurieta, «Diseño y construcción de un transmisor de temperatura para termocuplas tipo k,» Escuela politecnica nacional, 2003.
- [24] E. L. H. M. y. R. A. A. Oliver, «EVALUACIÓN MEDIANTE DIFERENCIA FINITA DE TRANSFERENCIA DE CALOR QUE OCURREN EN EL PROCESO DE REDUCCIÓN DE ALUMINIO,» Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías. , La Guajira, 2015.
- [25] R. Barea del Cerro, «Conductividad termica en materiales cerámicos bifásicos,» Universidad autonoma de madrid, Madrid, 2004.

## Apéndice A

### ECUACIONES NODALES (CONTINUACIÓN)

$\sigma$ : Stefan Boltzmann constant  $\sigma$ : Stefan Boltzmann constant  $\sigma$ : Stefan Boltzmann constant

$\sigma$ : Stefan Boltzmann constant  $\sigma$ : Stefan Boltzmann constant Zona

$\sigma$ : Stefan Boltzmann constant Zona

Zona (0,j)

$$j = \frac{r_{tot}}{\Delta r}$$

$$q'_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)} + q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)} + q'_{radiación} = 0$$

$$\frac{k_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)}(T_{n+1,m} - T_{n,m})}{\frac{\Delta x}{2}} \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) +$$

$$\frac{k_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)}(T_{n,m-1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \frac{\Delta x}{2} +$$

$$h(T_{\infty} - T_{n,m}) * 2\pi \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right) * \frac{\Delta x}{2} +$$

$$h_r(T_{n,m} - T_{\infty}) \cdot 2\pi \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right) * \frac{\Delta x}{2} = 0$$

Zona (n, m) de n: 1 hasta i y m: 1 hasta j

$$i = \frac{L}{\Delta x}$$

$$j_2 = \frac{r_{tot}}{\Delta r} - 1$$

$$q'_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n-1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)} = 0$$

$$\frac{k_{(n+1,m) \rightarrow (n,m)}(T_{n+1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) +$$

$$\frac{k_{(n-1,m) \rightarrow (n,m)}(T_{n-1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) +$$

$$\frac{k_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)}(T_{n,m+1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x +$$

$$\frac{k_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)}(T_{n,m-1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x = 0$$

Zona (n,j) de n: 1 hasta i

$$i = \frac{L}{\Delta x}$$

$$j = \frac{r_{tot}}{\Delta r}$$

$$\begin{aligned} & \frac{k_{(n+1,m \rightarrow n,m)}(T_{n+1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) + \\ & \frac{k_{(n-1,m \rightarrow n,m)}(T_{n-1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) + \\ & \frac{k_{(n,m-1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m-1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x + \\ & h(T_{\infty} - T_{n,m}) \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x + \\ & h_r(T_{n,m} - T_{\infty}) \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x = 0 \end{aligned}$$

Donde

$$h_r = \sigma(T_{n,m} + T_{\infty})(T_{n,m}^2 - T_{\infty}^2)$$

$\sigma$ : Stefan Boltzmann constant

Zona (i,m) de m: 1 hasta j

$$i = \frac{L}{\Delta x} + 1$$

$$j = \frac{r_{tot}}{\Delta r} - 1$$

$$\begin{aligned} & q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)}^{conveccion} + q'_{(n-1,m) \rightarrow (n,m)}^{conduccion} + q'_{(n,m+1) \rightarrow (n,m)}^{conduccion} + q'_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)}^{conduccion} + q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)}^{radiación} = 0 \\ & h(T_{\infty} - T_{n,m}) * 2\pi \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right) * \frac{\Delta x}{2} + \\ & \frac{k_{(n-1,m \rightarrow n,m)}(T_{n-1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) + \\ & \frac{k_{(n,m+1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m+1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \frac{\Delta x}{2} + \\ & \frac{k_{(n,m-1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m-1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \frac{\Delta x}{2} + \\ & h_r(T_{n,m} - T_{\infty}) \cdot 2\pi \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right) * \frac{\Delta x}{2} = 0 \end{aligned}$$

Donde

$$h_r = \sigma(T_{n,m} + T_{\infty})(T_{n,m}^2 - T_{\infty}^2)$$

$\sigma$ : Stefan Boltzmann constant

Zona (i,j)

$$i = \frac{L}{\Delta x} + 1$$

$$j = \frac{r_{tot}}{\Delta r}$$

$$q'_{(n-1,m) \rightarrow (n,m)} + q'_{(n,m-1) \rightarrow (n,m)} + q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)} + q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)} + q'_{(\infty) \rightarrow (n,m)} = 0$$

$$\frac{k_{(n-1,m \rightarrow n,m)}(T_{n-1,m} - T_{n,m})}{\Delta x} \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) +$$

$$\frac{k_{(n,m-1 \rightarrow n,m)}(T_{n,m-1} - T_{n,m})}{\Delta r} \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x +$$

$$h(T_{\infty} - T_{n,m}) \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x +$$

$$h(T_{\infty} - T_{n,m}) \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) +$$

$$h_r(T_{n,m} - T_{\infty}) \cdot 2\pi \left( m + \frac{\Delta r}{2} \right) * \Delta x +$$

$$h_r(T_{n,m} - T_{\infty}) \cdot \pi \left( \left( m * \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( m * \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right) = 0$$

Donde

$$h_r = \sigma(T_{n,m} + T_{\infty})(T_{n,m}^2 - T_{\infty}^2)$$

$\sigma$ : Stefan Boltzmann constant

## GRÁFICAS Y TABLAS DE RESULTADOS

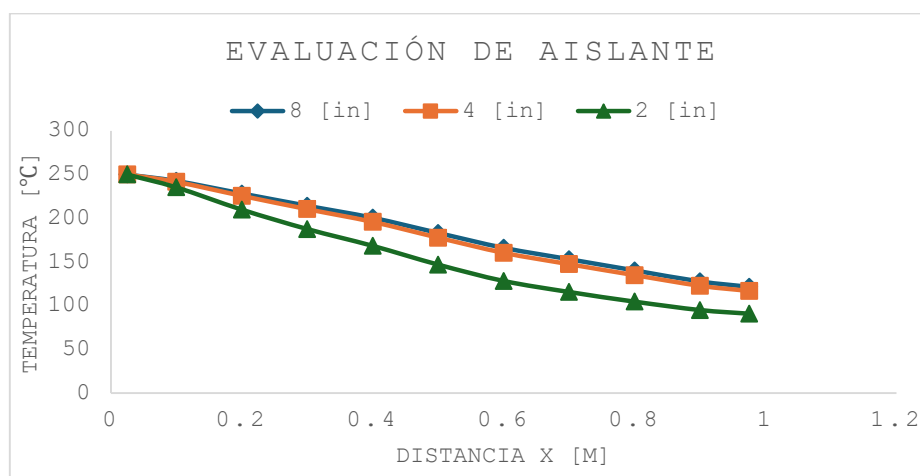
**Tabla 29**

*Evaluación de Aislante (material: Plata)*

Evaluación de Aislante					
Aislante D=8 [in]		Aislante D=4 [in]		Aislante D=2 [in]	
x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]
0.025	250	0.025	250	0.025	250
0.1	242.66	0.1	241.64	0.1	235.36
0.2	228.32	0.2	225.69	0.2	209.87
0.3	214.30	0.3	210.45	0.3	187.70
0.4	200.57	0.4	195.86	0.4	168.46
0.5	183.22	0.5	177.83	0.5	146.99
0.6	166.19	0.6	160.50	0.6	128.32
0.7	153.19	0.7	147.52	0.7	115.68
0.8	140.38	0.8	134.97	0.8	104.65
0.9	127.75	0.9	122.80	0.9	95.03
0.975	121.55	0.975	116.90	0.975	90.84

**Figura 35**

*Comparación de Aislantes de diferente espesor (material: Plata)*

**Tabla 30**

*Evaluación de Aislante (material: Acero Inoxidable)*

Evaluación de Aislante					
Aislante D=8 [in]		Aislante D=4 [in]		Aislante D=2 [in]	
x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]
0.025	250.00	0.025	250.00	0.025	250.00
0.1	223.52	0.1	213.16	0.1	174.47
0.2	179.20	0.2	158.12	0.2	99.00
0.3	141.52	0.3	116.23	0.3	60.52
0.4	108.82	0.4	83.29	0.4	39.26
0.5	105.30	0.5	80.00	0.5	37.47
0.6	102.19	0.6	77.36	0.6	36.32
0.7	79.75	0.7	60.44	0.7	31.55
0.8	59.62	0.8	46.86	0.8	29.11
0.9	40.92	0.9	35.29	0.9	27.75
0.975	31.92	0.975	29.93	0.975	27.27

Figura 36

## Comparación de Aislantes de diferente espesor (material: Acero Inoxidable)

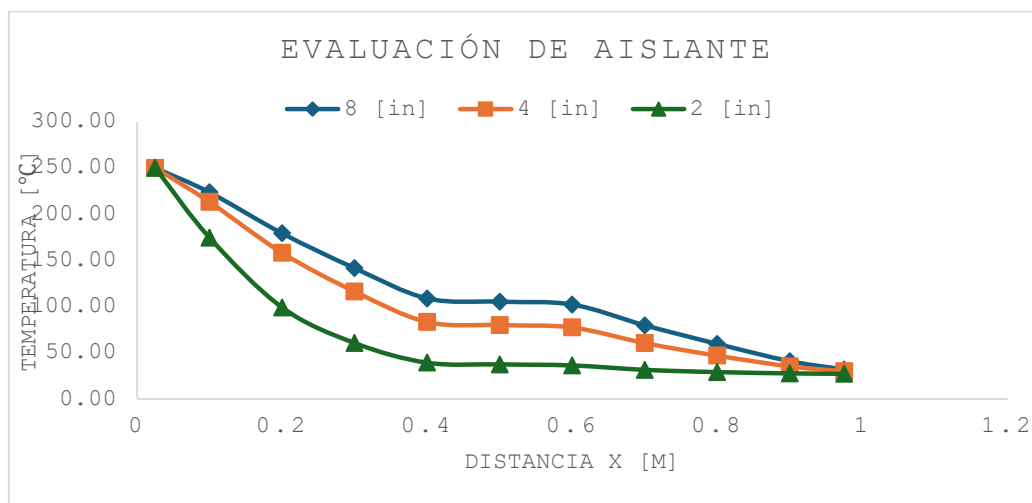


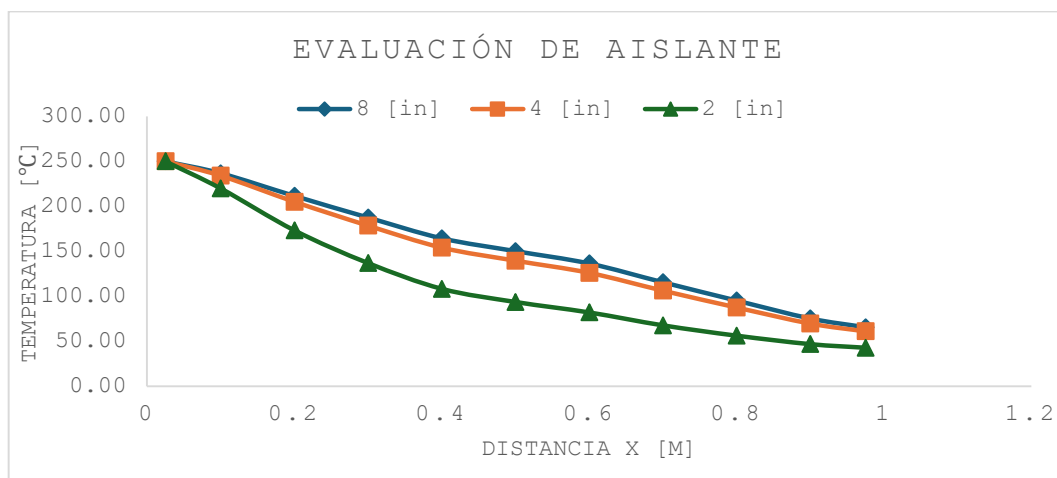
Tabla 31

## Evaluación de Aislante (material: Latón)

Evaluación de Aislante					
Aislante D=8 [in]		Aislante D=4 [in]		Aislante D=2 [in]	
x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]
0.025	250.00	0.025	250.00	0.025	250.00
0.1	236.79	0.1	234.09	0.1	219.93
0.2	211.63	0.2	205.11	0.2	173.31
0.3	187.57	0.3	178.58	0.3	136.96
0.4	164.47	0.4	154.12	0.4	108.35
0.5	150.26	0.5	139.63	0.5	93.73
0.6	136.52	0.6	126.13	0.6	82.11
0.7	115.64	0.7	106.32	0.7	67.77
0.8	95.30	0.8	87.60	0.8	56.29
0.9	75.36	0.9	69.71	0.9	46.86
0.975	65.60	0.975	61.09	0.975	42.85

**Figura 37**

*Comparación de Aislantes de diferente espesor (material: Latón)*

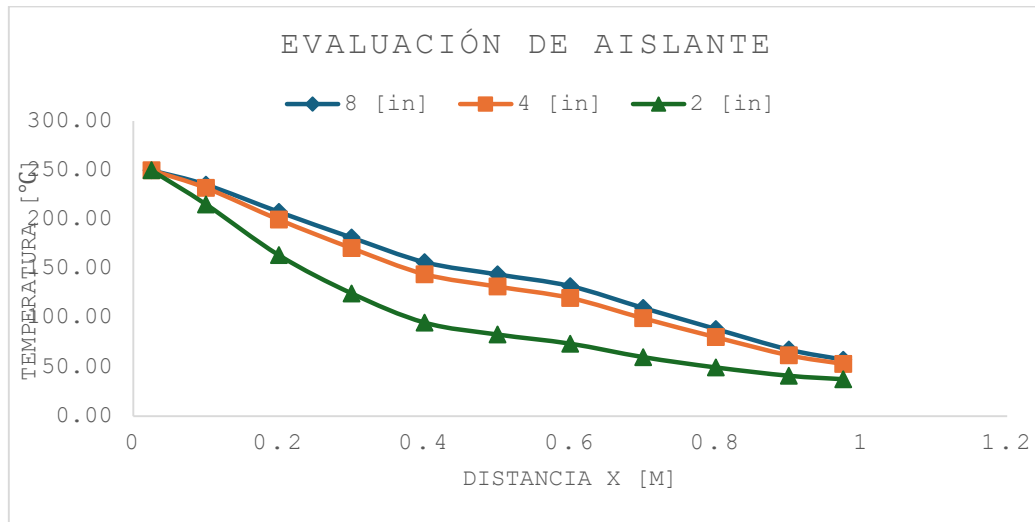
**Tabla 32**

*Evaluación de Aislante (material: Hierro Fundido)*

Evaluación de Aislante					
Aislante D=8 [in]		Aislante D=4 [in]		Aislante D=2 [in]	
x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]	x [m]	T [°C]
0.025	250.00	0.025	250.00	0.025	250.00
0.1	235.34	0.1	232.01	0.1	215.33
0.2	207.70	0.2	199.80	0.2	163.63
0.3	181.51	0.3	170.75	0.3	124.77
0.4	156.56	0.4	144.34	0.4	95.09
0.5	144.14	0.5	131.74	0.5	83.01
0.6	132.21	0.6	120.15	0.6	73.66
0.7	110.07	0.7	99.52	0.7	60.02
0.8	88.60	0.8	80.22	0.8	49.48
0.9	67.63	0.9	61.89	0.9	41.05
0.975	57.37	0.975	53.08	0.975	37.50

**Figura 38**

*Comparación de Aislantes de diferente espesor (material: Hierro Fundido)*



Flujo de Calor Estado Estable

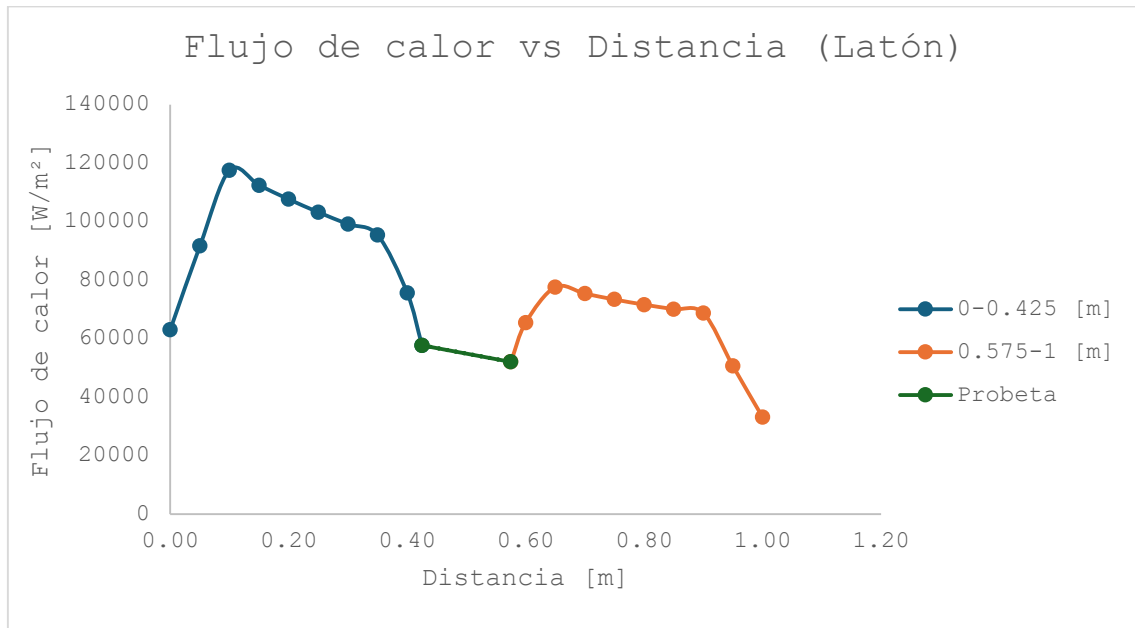
**Tabla 33**

*Resultado de flujo de calor (Latón-MATLAB)*

MATLAB			
k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0.00	250.00	63060.46
401	0.05	242.14	91661.38
401	0.10	227.14	117578.41
401	0.15	212.82	112409.52
401	0.20	199.11	107624.39
401	0.25	185.98	103200.56
401	0.30	173.37	99121.59
401	0.35	161.26	95377.85
401	0.40	149.59	75633.01
401	0.45	142.40	57676.63
401	0.55	132.36	52026.54
401	0.60	125.88	65424.35
401	0.65	116.05	77627.59
401	0.70	106.52	75369.55
401	0.75	97.25	73366.96
401	0.80	88.22	71607.37
401	0.85	79.40	70075.95
401	0.90	70.75	68721.38
401	0.95	62.26	50619.43
401	1.00	58.12	33161.10

**Figura 39**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Latón-MATLAB)*

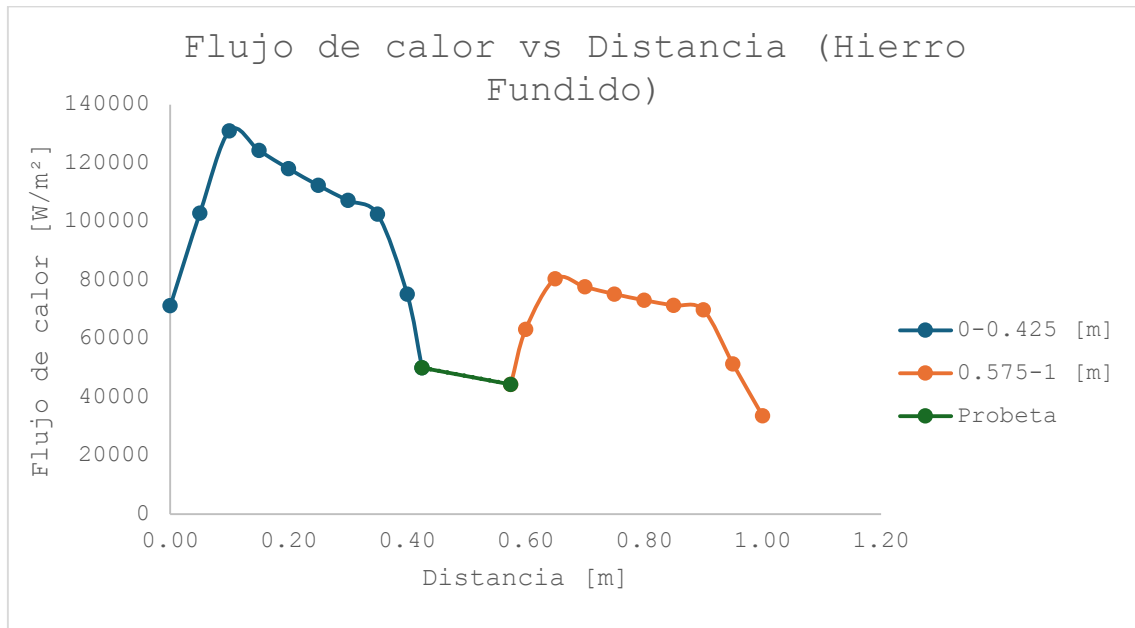
**Tabla 34**

*Resultado de flujo de calor (Hierro Fundido-MATLAB)*

MATLAB			
k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250	71191.94
401	0.05	241.1232	102884.57
401	0.1	224.343	131039.98
401	0.15	208.4449	124261.48
401	0.2	193.3551	118050.79
401	0.25	179.0058	112368.62
401	0.3	165.333	107188.90
401	0.35	152.2754	102496.00
401	0.4	139.7729	75145.80
401	0.45	133.5358	50021.54
401	0.55	125.6006	44314.51
401	0.6	120.0751	63126.62
401	0.65	109.8583	80451.03
401	0.7	100.0125	77658.86
401	0.75	90.492	75219.98
401	0.8	81.2544	73115.13
401	0.85	72.2588	71326.27
401	0.9	63.4673	69796.86
401	0.95	54.8531	51359.28
401	1	50.6595	33632.67

**Figura 40**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Hierro Fundido-MATLAB)*

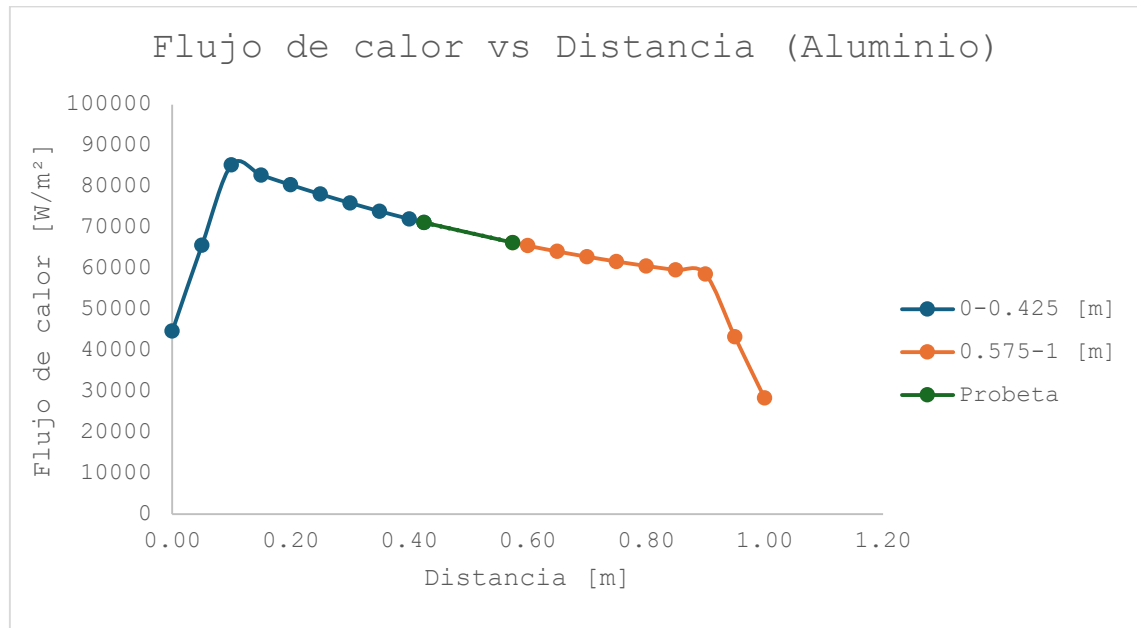
**Tabla 35**

*Resultado de flujo de calor (Aluminio-MATLAB)*

MATLAB			
k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250.00	44680.222
401	0.05	244.43	65641.294
401	0.10	233.63	85306.334
401	0.15	223.16	82782.44
401	0.2	212.99	80390.876
401	0.25	203.11	78124.825
401	0.3	193.50	75980.678
401	0.35	184.16	73955.628
401	0.4	175.06	72083.359
401	0.45	166.18	71194.342
401	0.55	149.05	66286.904
401	0.6	140.79	65539.841
401	0.65	132.71	64131.529
401	0.7	124.79	62857.953
401	0.75	117.03	61682.221
401	0.8	109.41	60601.125
401	0.85	101.92	59605.442
401	0.9	94.55	58654.27
401	0.95	87.29	43273.915
401	1	83.75	28366.74

**Figura 41**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Aluminio-MATLAB)*

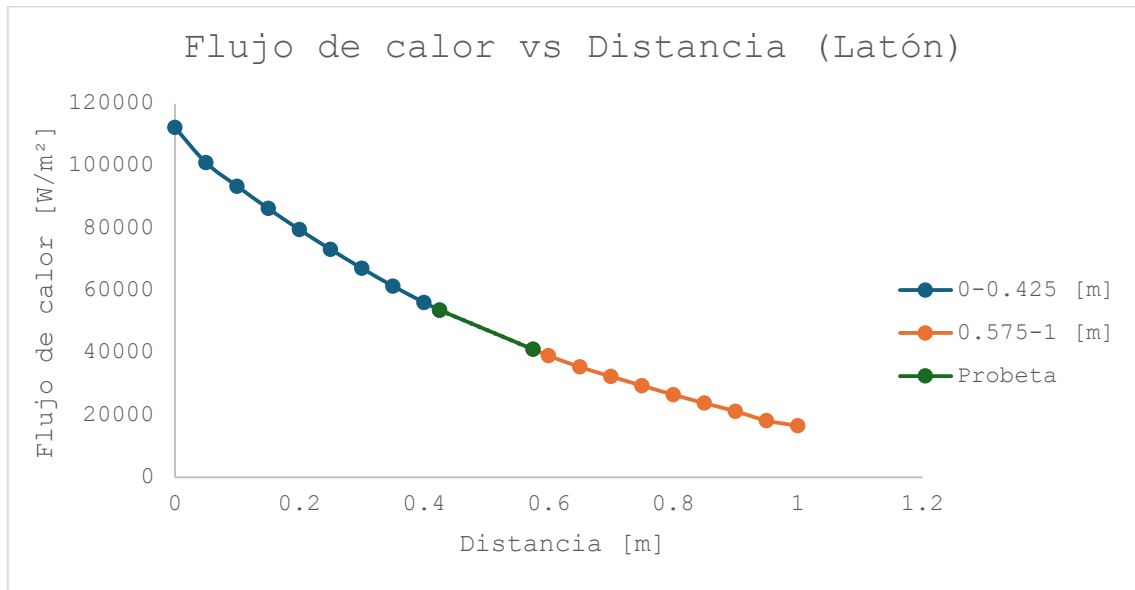
**Tabla 36**

*Resultado de flujo de calor (Latón-ANSYS)*

ANSYS			
k	Distancia	Temperatura	Q"
[W/m <sup>2</sup> ·K]	[m]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250	104901.6
401	0.05	236.92	101011.9
401	0.1	224.81	93473.1
401	0.15	213.61	86295.2
401	0.2	203.29	79518.3
401	0.25	193.78	73182.5
401	0.3	185.04	67127.4
401	0.35	177.04	61393.1
401	0.4	169.73	56140
401	0.45	163.04	53653.8
401	0.55	122.78	41062.4
401	0.6	117.66	39017.3
401	0.65	113.05	35408.3
401	0.7	108.83	32360.7
401	0.75	104.98	29393.3
401	0.8	101.5	26506.1
401	0.85	98.37	23787.32
401	0.9	95.568	21164.78
401	0.95	93.092	18177.33
401	1	91.035	16497.14

**Figura 42**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Latón-ANSYS)*

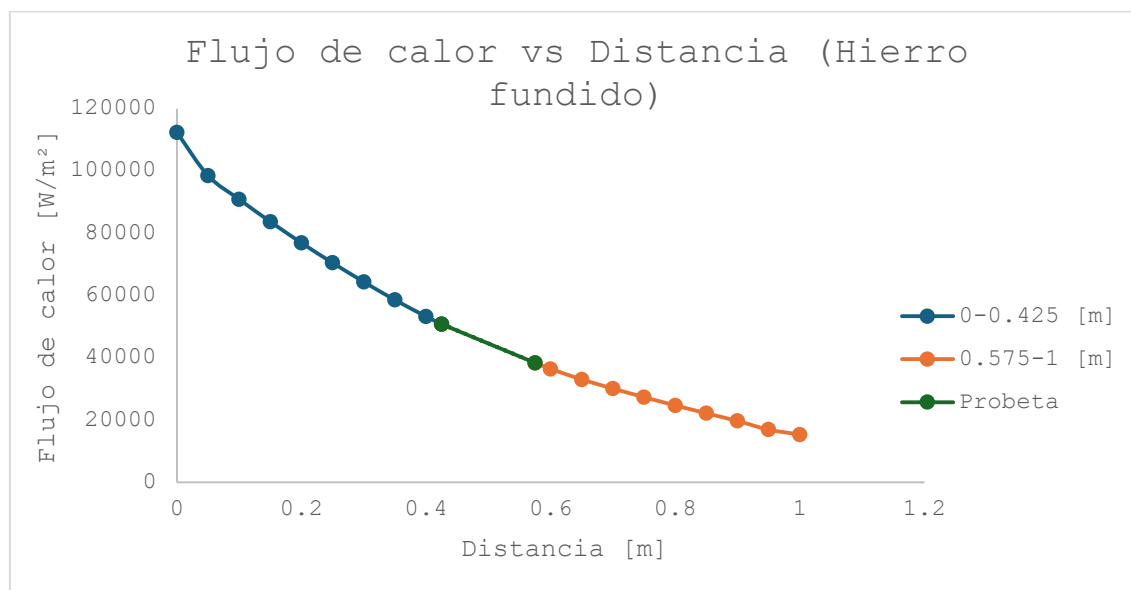
**Tabla 37**

*Resultado de flujo de calor (Hierro Fundido-ANSYS)*

ANSYS			
k	Distancia	Temperatura	Q"
[W/m <sup>2</sup> ·K]	[m]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250	102415.4
401	0.05	237.23	98485.6
401	0.1	225.44	90866.6
401	0.15	214.57	83688.7
401	0.2	204.57	76871.7
401	0.25	195.4	70455.7
401	0.3	187	64360.5
401	0.35	179.35	58546
401	0.4	172.4	53252.8
401	0.45	166.07	50766.6
401	0.55	116.35	38335.6
401	0.6	111.57	36410.8
401	0.65	107.27	33002.3
401	0.7	103.34	30091.04
401	0.75	99.766	27316.12
401	0.8	96.528	24673.53
401	0.85	93.613	22135.2
401	0.9	91.008	19673.06
401	0.95	88.707	16886.11
401	1	86.797	15318.2

**Figura 43**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Hierro Fundido-ANSYS)*

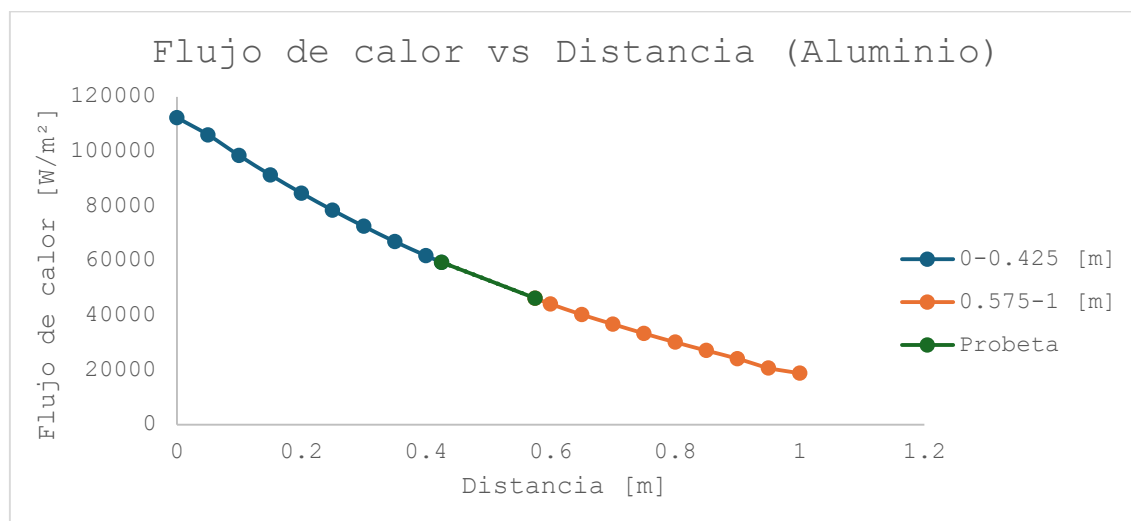
**Tabla 38**

*Resultado de flujo de calor (Aluminio-ANSYS)*

ANSYS			
k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250	109954.2
401	0.05	236.29	106064.5
401	0.1	223.55	98485.6
401	0.15	211.73	91387.9
401	0.2	200.76	84731.3
401	0.25	190.6	78475.7
401	0.3	181.19	72581
401	0.35	172.5	66967
401	0.4	164.49	61834.2
401	0.45	157.08	59428.2
401	0.55	135.37	46275.4
401	0.6	129.6	44150.1
401	0.65	124.36	40260.4
401	0.7	119.56	36771.7
401	0.75	115.19	33363.2
401	0.8	111.24	30155.2
401	0.85	107.67	27107.6
401	0.9	104.48	24140.2
401	0.95	101.65	20747.74
401	1	99.306	18798.88

**Figura 44**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Aluminio-ANSYS)*

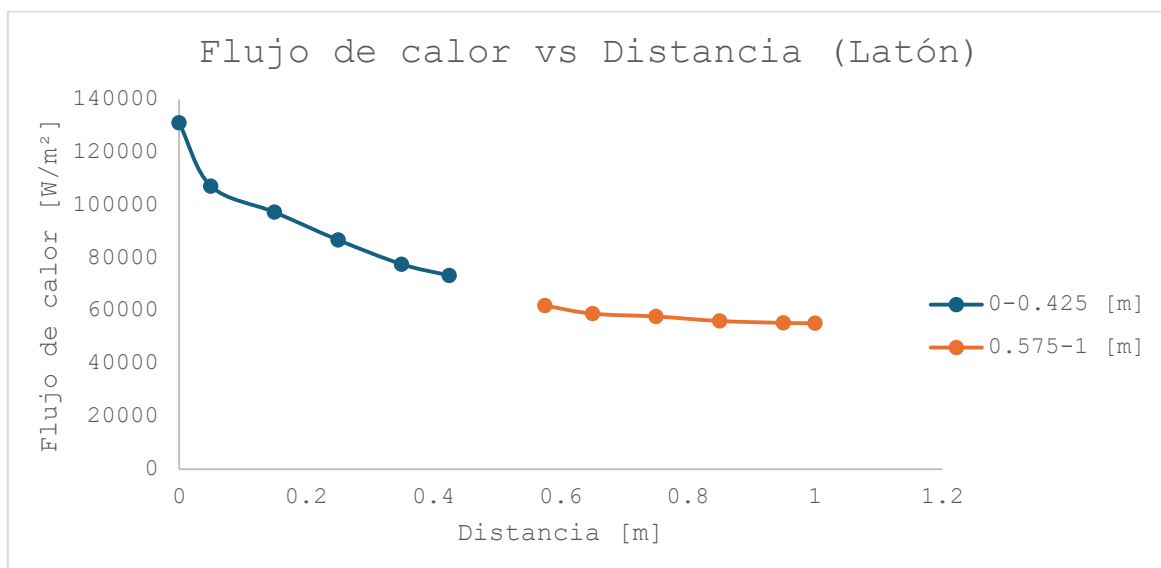
**Tabla 39**

*Resultado de flujo de calor (Latón-SIMSCAPE)*

SIMSCAPE			
k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250	115728.60
401	0.05	235.57	107206.01
401	0.15	209.898	97342.75
401	0.25	187.02	86838.56
401	0.35	166.587	77655.66
401	0.45	148.289	73374.98
401	0.55	92.057	61970.54
401	0.65	76.603	58934.97
401	0.75	61.906	57864.30
401	0.85	47.743	56158.05
401	0.95	33.897	55452.95
401	1	27.00	55313.94

**Figura 45**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Latón-Simscape)*

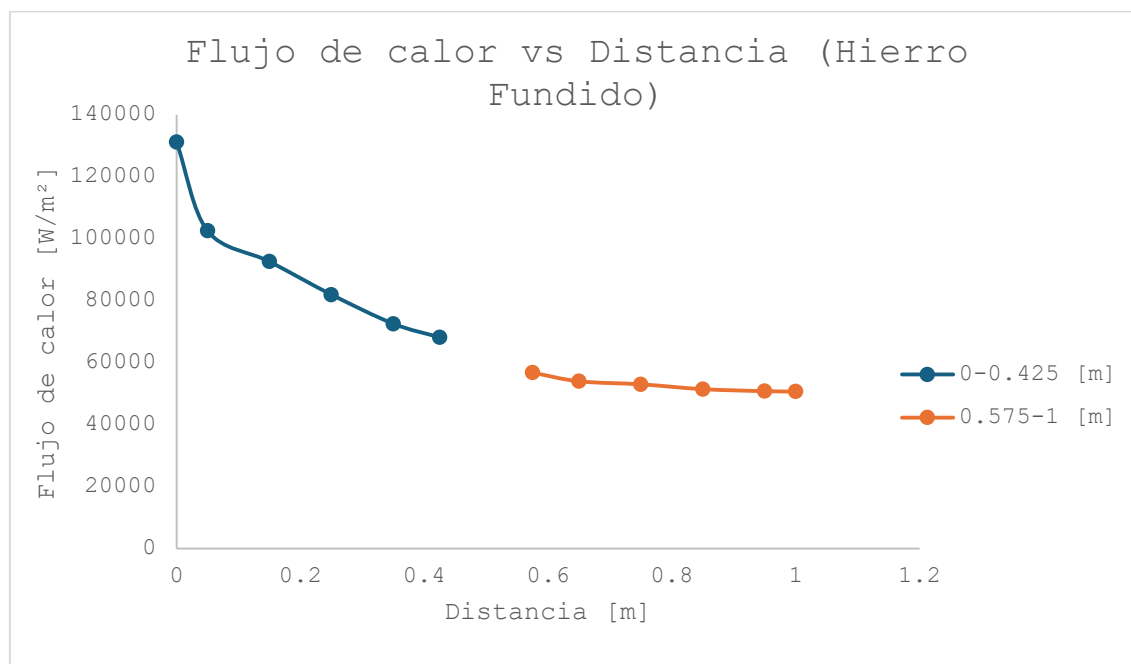
**Tabla 40**

*Resultado de flujo de calor (Hierro Fundido-SIMSCAPE)*

SIMSCAPE			
k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250	111085.02
401	0.05	236.149	102540.51
401	0.15	211.6432	92611.55
401	0.25	189.9587	81962.80
401	0.35	170.764	72559.75
401	0.45	153.7693	68148.75
401	0.55	86.5794	56753.13
401	0.65	72.4265	53970.99
401	0.75	58.9674	52991.75
401	0.85	45.9967	51430.46
401	0.95	33.3163	50784.51
401	1	27	50656.73

**Figura 46**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Hierro Fundido-Simscape)*

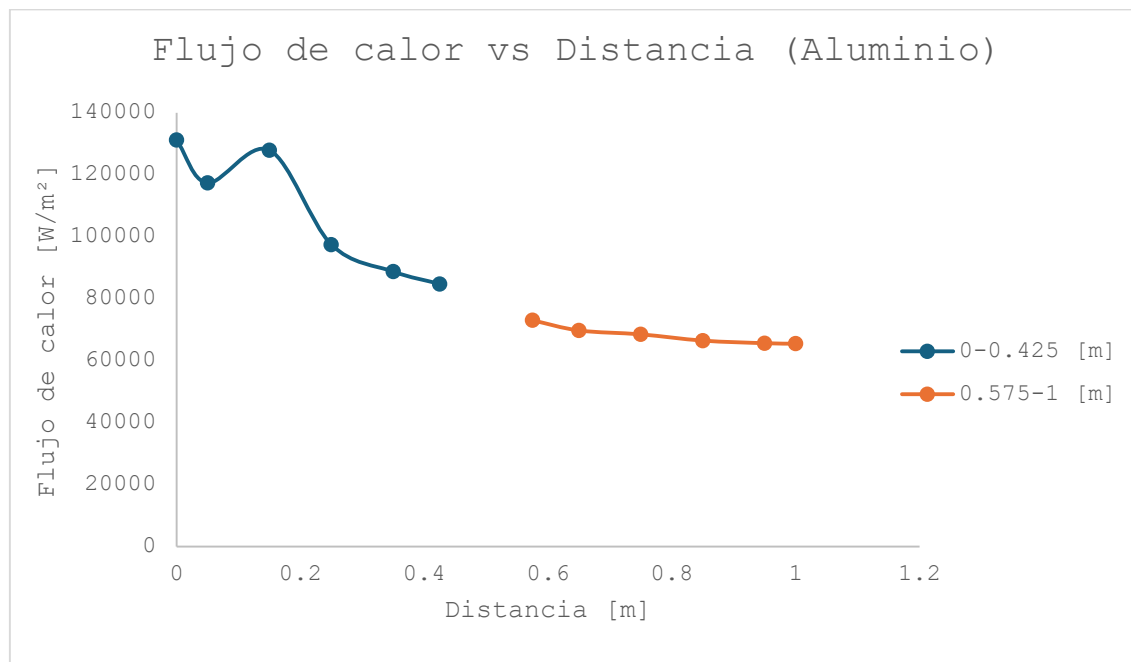
**Tabla 41**

*Resultado de flujo de calor (Aluminio-SIMSCAPE)*

SIMSCAPE			
k [W/m <sup>2</sup> ·K]	Distancia [m]	Temperatura [°C]	Q" [W/m <sup>2</sup> ]
401	0	250.00	44680.22
401	0.05	244.43	117364.68
401	0.15	206.098	127930.83
401	0.25	180.623	97449.02
401	0.35	157.495	88745.31
401	0.45	136.361	84747.34
401	0.55	103.9	72998.04
401	0.65	85.696	69737.91
401	0.75	68.305	68470.75
401	0.85	51.546	66453.72
401	0.95	35.161	65619.64
401	1	27.00	65451.22

**Figura 47**

*Flujo de calor Antes y Después de la probeta (Aluminio-Simscape)*



Conductividades térmicas Estado Estable

**Tabla 42**

*Conductividad Térmica-Ansys*

LATÓN	HIERRO FUNDIDO	ALUMINIO
CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]
117.63	89.60	243.44
CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]
111	83	237.5
ERROR	ERROR	ERROR
5.97%	7.96%	2.50%

**Tabla 43**

*Conductividad Térmica-MATLAB*

LATÓN	HIERRO FUNDIDO	ALUMINIO
CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]
121.33	111.20	200.55
CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]
111	83	237.5

ERROR	ERROR	ERROR
9.31%	33.98%	15.56%

**Tabla 44***Conductividad Térmica-SIMSCAPE*

LATÓN	HIERRO FUNDIDO	ALUMINIO
CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL [W/(m·K)]
120.35	92.95	242.98
CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]	CONDUCTIVIDAD TEÓRICA [W/(m·K)]
111	83	237.5
ERROR	ERROR	ERROR
8.42%	11.98%	2.31%

## Simulación Estado Transitorio

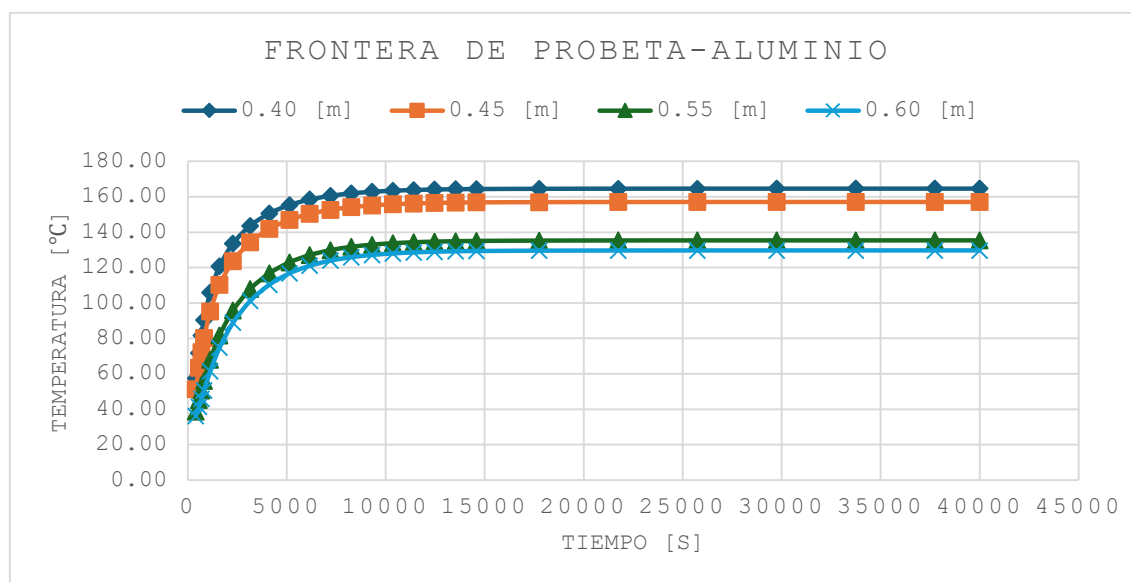
**Tabla 45***Temperatura Antes y Después de la probeta, Aluminio*

	0.40 [m]	0.45 [m]	0.55 [m]	0.60 [m]
Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
400	57.43	51.32	38.64	36.11
570.38	71.77	63.50	45.24	41.46
695.21	81.68	72.29	50.54	45.89
820.04	90.40	80.33	55.93	50.54
1134.5	105.89	95.32	67.88	61.45
1605.1	120.66	110.21	81.72	74.76
2286	133.60	123.66	95.83	88.84
3154.7	143.62	134.33	107.90	101.16
4123.8	150.63	141.87	116.80	110.35
5136.7	155.34	146.97	122.95	116.74
6170	158.46	150.37	127.10	121.06
7213.7	160.53	152.63	129.87	123.95
8262.8	161.91	154.13	131.72	125.88
9314.7	162.82	155.12	132.95	127.16
10368	163.42	155.78	133.76	128.01
11422	163.82	156.22	134.31	128.58
12477	164.08	156.51	134.67	128.96
13531	164.26	156.70	134.90	129.21
14586	164.37	156.83	135.06	129.37
17750	164.51	156.98	135.25	129.57
21750	164.57	157.04	135.33	129.65
25750	164.59	157.07	135.36	129.68
29750	164.60	157.07	135.37	129.69

33750	164.60	157.08	135.37	129.70
37750	164.60	157.08	135.38	129.70
40000	164.60	157.08	135.38	129.70

**Figura 48**

*Curvas de Temperatura Antes y Después de la probeta, Aluminio*

**Tabla 46**

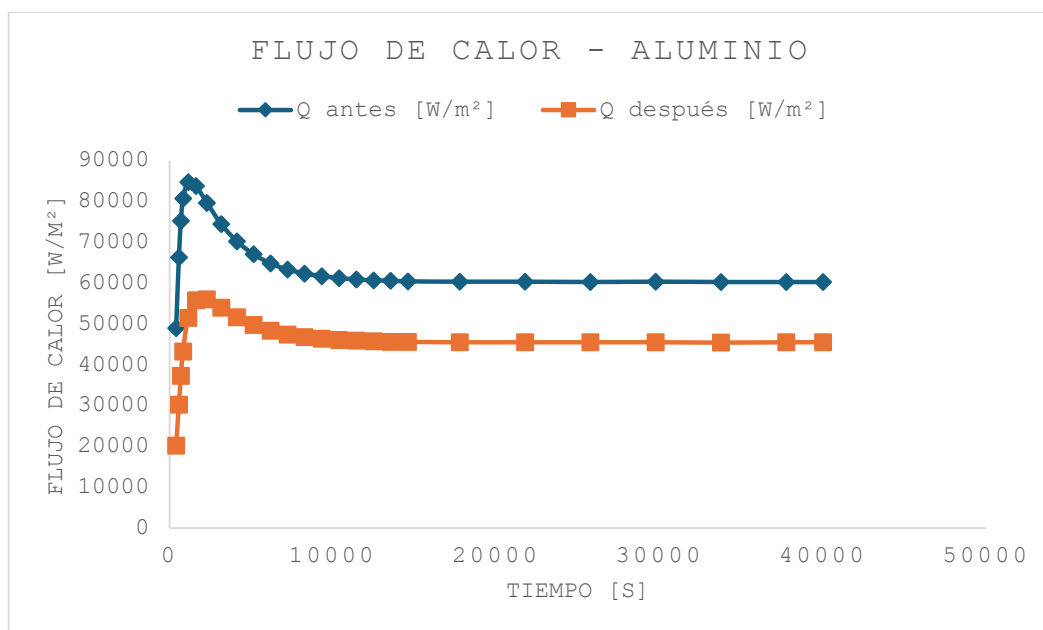
*Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Aluminio*

Tiempo [s]	Q antes [W/m <sup>2</sup> ]	Q después [W/m <sup>2</sup> ]
400	49002.2	20258.52
570.38	66397.58	30323.62
695.21	75315.82	37325.08
820.04	80809.52	43275.92
1134.5	84763.38	51544.54
1605.1	83809	55835.24
2286	79718.8	56059.8
3154.7	74505.8	54054.8
4123.8	70255.2	51729
5136.7	67127.4	49804.2
6170	64881.8	48440.8
7213.7	63358	47478.4
8262.8	62395.6	46836.8
9314.7	61754	46435.8
10368	61272.8	46115
11422	60952	45954.6
12477	60711.4	45794.2
13531	60631.2	45633.8

14586	60470.8	45633.8
17750	60390.6	45553.6
21750	60390.6	45553.6
25750	60310.4	45553.6
29750	60390.6	45553.6
33750	60310.4	45473.4
37750	60310.4	45553.6
40000	60310.4	45553.6

**Figura 49**

*Curvas de Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Aluminio*

**Tabla 47**

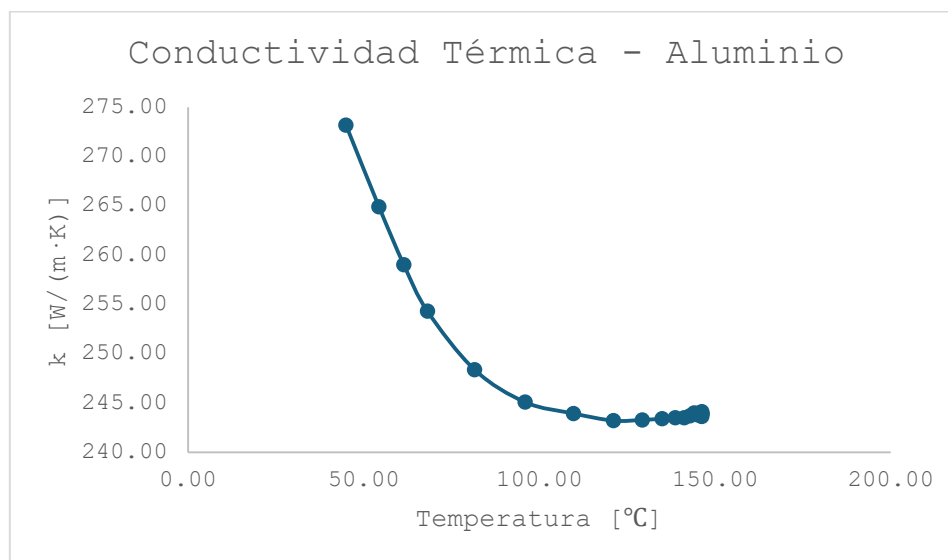
*Conductividad Térmica Transitorio, Aluminio*

Temperatura [°C]	k [W/(m·K)]
44.98	273.17
54.37	264.89
61.41	259.03
68.13	254.32
81.60	248.37
95.97	245.08
109.74	243.93
121.12	243.21
129.34	243.29
134.96	243.40
138.74	243.50
141.25	243.49

142.93	243.71
144.04	244.00
144.77	243.84
145.27	243.97
145.59	243.83
145.80	243.73
145.95	243.69
146.12	243.77
146.19	244.00
146.22	243.81
146.22	244.11
146.23	243.63
146.23	243.93
146.23	243.93

**Figura 50**

*Curva de Conductividad Térmica Transitorio, Aluminio*

**Tabla 48**

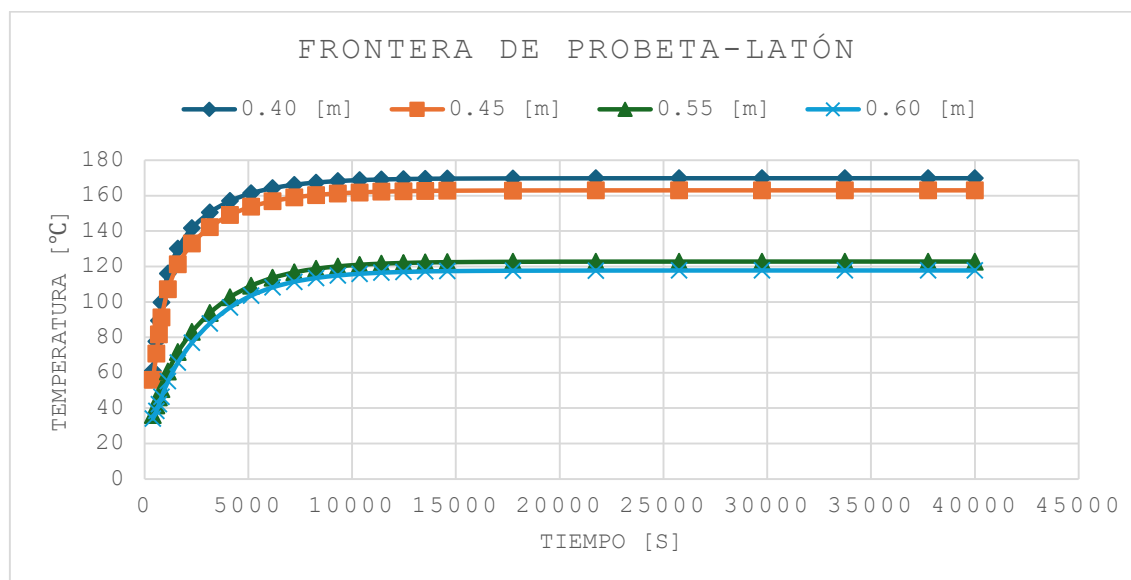
*Temperatura Antes y Después de la probeta, Latón*

	0.40 [m]	0.45 [m]	0.55 [m]	0.60 [m]
Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
400	61.042	55.968	36.074	34.092
570.38	77.677	70.79	41.502	38.477
695.21	89.437	81.615	46.073	42.285
820.04	99.658	91.262	50.773	46.328
1134.5	116.07	107.21	60.672	55.313
1605.1	130.11	121.19	71.634	65.733
2286	141.64	132.96	83.055	76.985
3154.7	150.61	142.32	93.846	87.876

4123.8	157.03	149.14	102.66	96.898
5136.7	161.37	153.8	109.12	103.56
6170	164.24	156.91	113.6	108.2
7213.7	166.14	158.98	116.65	111.37
8262.8	167.4	160.34	118.7	113.5
9314.7	168.23	161.25	120.07	114.92
10368	168.78	161.85	120.98	115.87
11422	169.14	162.24	121.59	116.5
12477	169.38	162.51	121.99	116.92
13531	169.54	162.68	122.26	117.2
14586	169.64	162.8	122.44	117.39
17750	169.77	162.93	122.65	117.61
21750	169.82	162.99	122.74	117.7
25750	169.84	163.01	122.77	117.74
29750	169.84	163.02	122.78	117.75
33750	169.85	163.02	122.79	117.75
37750	169.85	163.02	122.79	117.75
40000	169.85	163.02	122.79	117.75

**Figura 51**

*Curvas de Temperatura Antes y Después de la probeta, Latón*

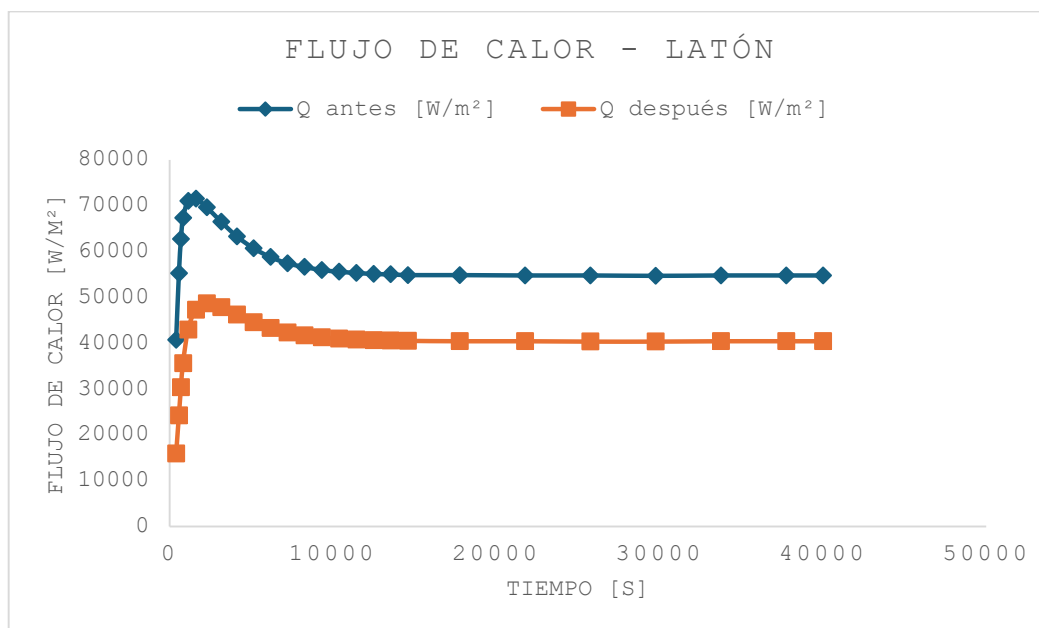


**Tabla 49***Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Latón*

Tiempo [s]	Q antes [W/m <sup>2</sup> ]	Q después [W/m <sup>2</sup> ]
400	40693.48	15895.64
570.38	55233.74	24260.5
695.21	62732.44	30379.76
820.04	67335.92	35648.9
1134.5	71057.2	42979.18
1605.1	71538.4	47326.02
2286	69613.6	48681.4
3154.7	66485.8	47879.4
4123.8	63277.8	46211.24
5136.7	60711.4	44591.2
6170	58786.6	43308
7213.7	57423.2	42345.6
8262.8	56621.2	41704
9314.7	55979.6	41303
10368	55578.6	40982.2
11422	55338	40821.8
12477	55097.4	40661.4
13531	55017.2	40581.2
14586	54856.8	40501
17750	54856.8	40420.8
21750	54776.6	40420.8
25750	54776.6	40340.6
29750	54696.4	40340.6
33750	54776.6	40420.8
37750	54776.6	40420.8
40000	54776.6	40420.8

**Figura 52**

*Curvas de Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Latón*

**Tabla 50**

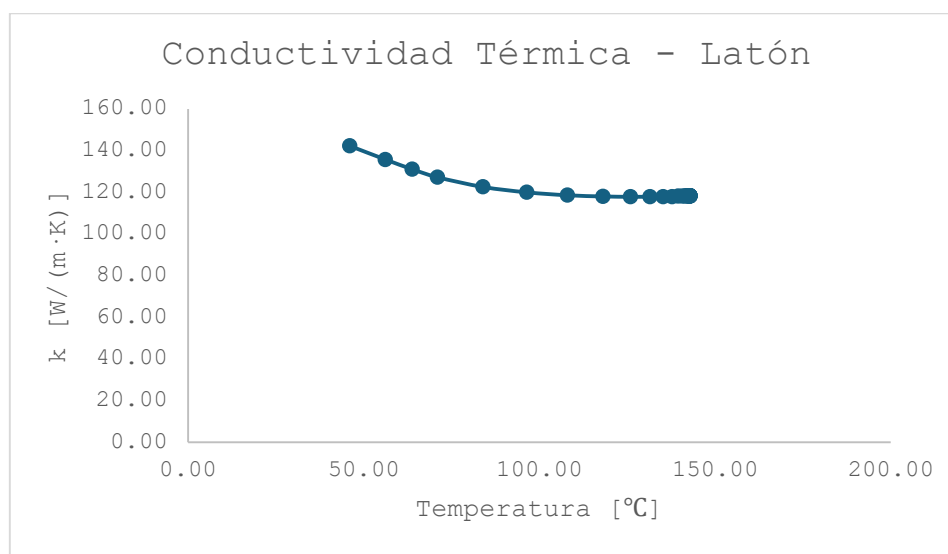
*Conductividad Térmica Transitorio, Latón*

Temperatura [°C]	k [W/(m·K)]
46.02	142.23
56.15	135.71
63.84	130.99
71.02	127.18
83.94	122.52
96.41	119.93
108.01	118.52
118.08	117.97
125.90	117.78
131.46	117.84
135.26	117.86
137.82	117.85
139.52	118.07
140.66	118.12
141.42	118.13
141.92	118.28
142.25	118.16
142.47	118.26
142.62	118.13
142.79	118.27
142.87	118.26
142.89	118.19

142.90	118.09
142.91	118.32
142.91	118.32
142.91	118.32

**Figura 53**

*Curva de Conductividad Térmica Transitorio, Latón*

**Tabla 51**

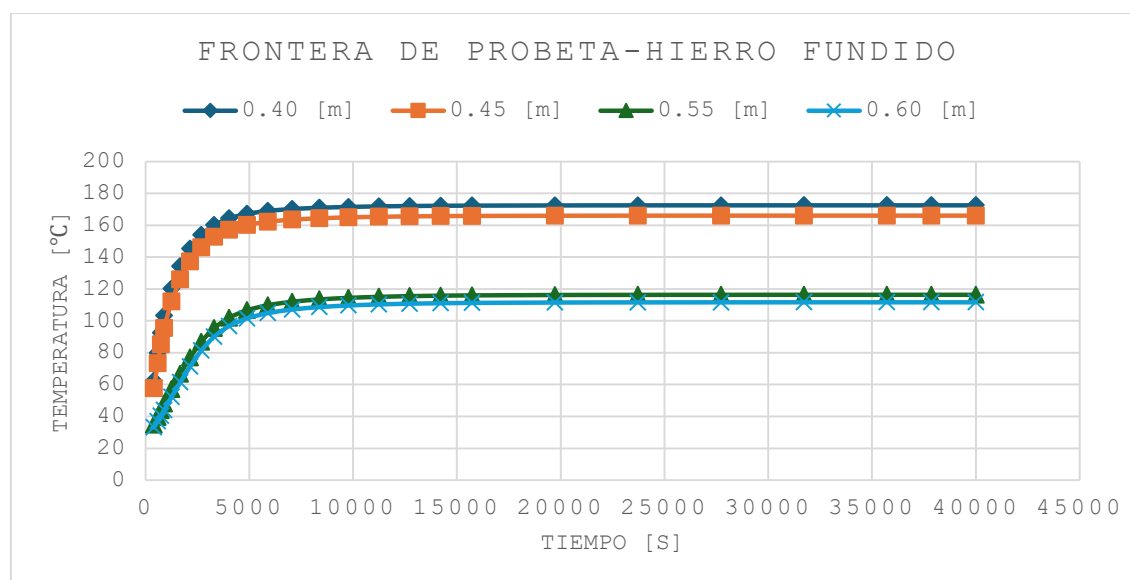
*Temperatura Antes y Después de la probeta, Hierro Fundido*

	0.40 [m]	0.45 [m]	0.55 [m]	0.60 [m]
Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
400	62.31	57.601	34.827	33.112
584.76	79.82	73.44	39.622	36.979
738.93	92.365	85.131	43.758	40.42
893.1	103.23	95.482	48.045	44.099
1253.9	120.21	112.04	57.003	52.203
1674.3	134.21	125.97	66.777	61.443
2148.8	145.37	137.28	76.954	71.403
2687.4	153.96	146.17	86.877	81.351
3307.1	160.14	152.69	95.422	90.049
4030.3	164.34	157.18	101.96	96.754
4884	167.13	160.18	106.61	101.56
5893.5	168.96	162.17	109.82	104.87
7066.5	170.17	163.49	111.99	107.12
8378.5	170.97	164.36	113.45	108.64
9784.7	171.49	164.93	114.43	109.65
11244	171.84	165.31	115.07	110.32
12728	172.07	165.56	115.51	110.77

14225	172.22	165.73	115.79	111.06
15727	172.32	165.84	115.98	111.26
19727	172.44	165.97	116.21	111.5
23727	172.49	166.02	116.31	111.6
27727	172.5	166.04	116.34	111.63
31727	172.51	166.05	116.35	111.65
35727	172.51	166.05	116.36	111.65
37864	172.51	166.05	116.36	111.65
40000	172.51	166.05	116.36	111.65

**Figura 54**

*Curvas de Temperatura Antes y Después de la probeta, Hierro Fundido*



**Tabla 52**

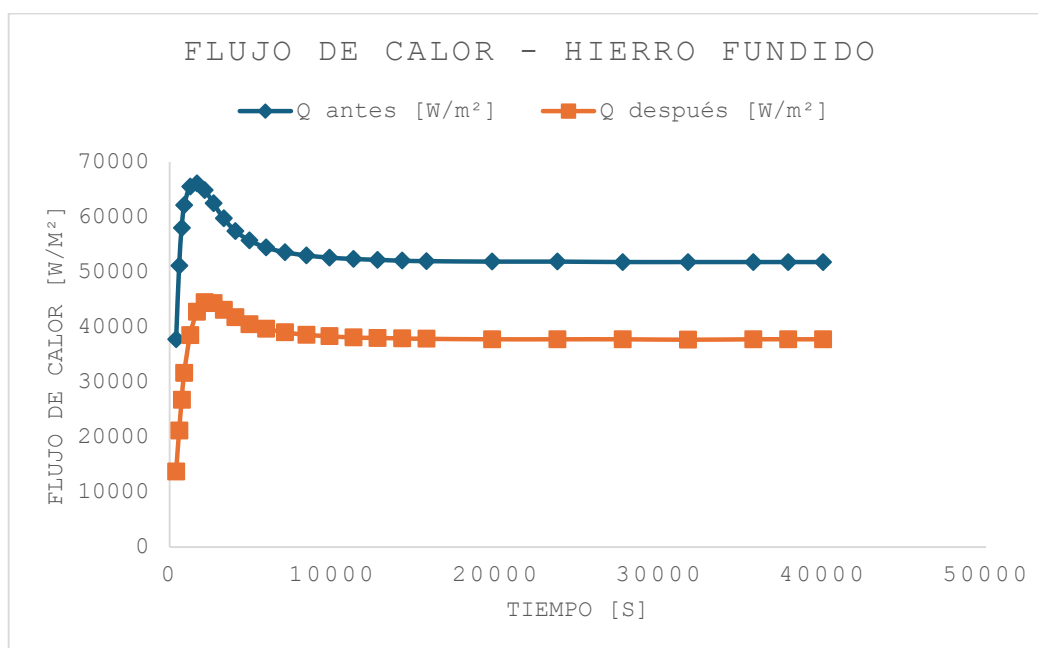
*Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Hierro Fundido*

Tiempo [s]	Q antes [W/m <sup>2</sup> ]	Q después [W/m <sup>2</sup> ]
<b>400</b>	37766.18	13754.3
<b>584.76</b>	51167.6	21196.86
<b>738.93</b>	58016.68	26770.76
<b>893.1</b>	62138.96	31646.92
<b>1253.9</b>	65523.4	38496
<b>1674.3</b>	66084.8	42778.68
<b>2148.8</b>	64881.8	44519.02
<b>2687.4</b>	62475.8	44318.52
<b>3307.1</b>	59749	43091.46
<b>4030.3</b>	57423.2	41752.12
<b>4884</b>	55739	40501
<b>5893.5</b>	54455.8	39699

<b>7066.5</b>	53573.6	39057.4
<b>8378.5</b>	53012.2	38576.2
<b>9784.7</b>	52611.2	38335.6
<b>11244</b>	52370.6	38095
<b>12728</b>	52210.2	38014.8
<b>14225</b>	52049.8	37934.6
<b>15727</b>	51969.6	37854.4
<b>19727</b>	51889.4	37774.2
<b>23727</b>	51889.4	37774.2
<b>27727</b>	51809.2	37774.2
<b>31727</b>	51809.2	37694
<b>35727</b>	51809.2	37774.2
<b>37864</b>	51809.2	37774.2
<b>40000</b>	51809.2	37774.2

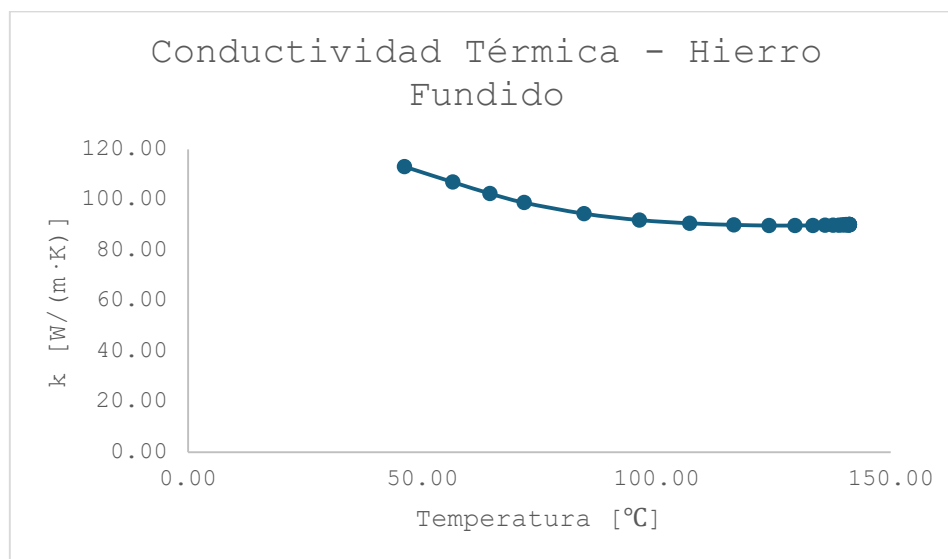
**Figura 55**

*Curvas de Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Hierro Fundido*



**Tabla 53***Conductividad Térmica Transitorio, Hierro Fundido*

Temperatura [°C]	k [W/(m·K)]
46.21	113.11
56.53	106.99
64.44	102.47
71.76	98.85
84.52	94.50
96.37	91.96
107.12	90.67
116.52	90.06
124.06	89.79
129.57	89.80
133.40	89.83
136.00	89.93
137.74	89.93
138.91	89.95
139.68	90.05
140.19	90.03
140.54	90.13
140.76	90.09
140.91	90.08
141.09	90.10
141.17	90.19
141.19	90.12
141.20	90.04
141.21	90.14
141.21	90.14
141.21	90.14

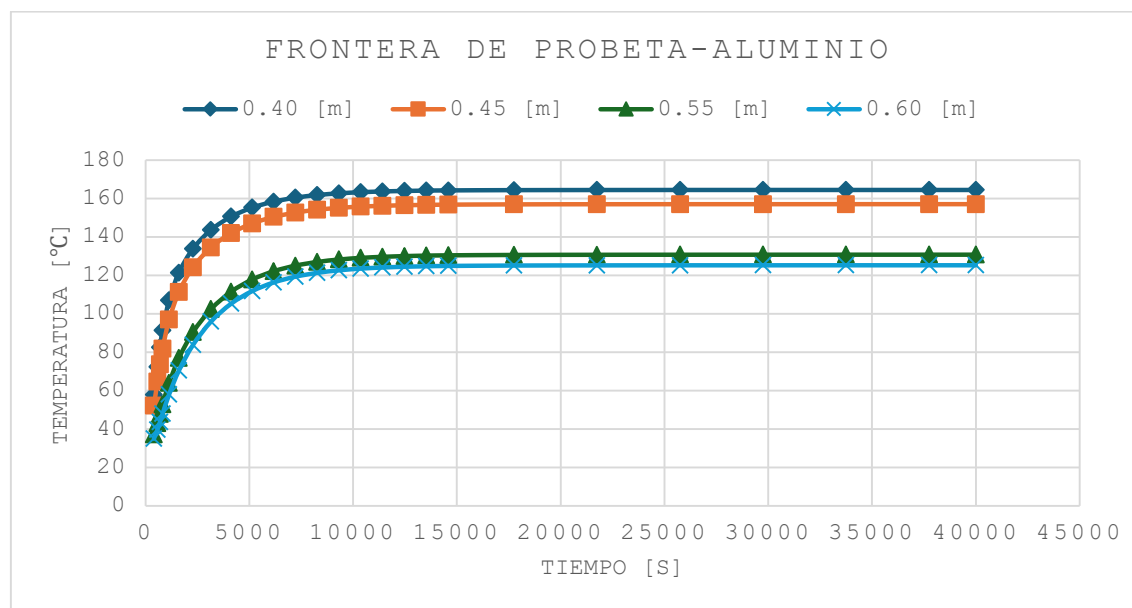
**Figura 56***Curva de Conductividad Térmica Transitorio, Hierro Fundido***Tabla 54***Temperatura Antes y Después de la probeta, Aluminio 2024*

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
400	57.764	52.07	37.093	34.902
570.38	72.268	64.536	42.92	39.608
695.21	82.413	73.609	47.748	43.622
820.04	91.344	81.862	52.73	47.893
1134.5	106.9	96.867	63.897	58.02
1605.1	121.34	111.3	76.884	70.396
2286	133.84	124.19	90.398	83.767
3154.7	143.62	134.52	102.38	95.911
4123.8	150.54	141.94	111.46	105.23
5136.7	155.22	147	117.78	111.77
6170	158.33	150.37	122.1	116.25
7213.7	160.38	152.61	125	119.25
8262.8	161.75	154.1	126.92	121.25
9314.7	162.65	155.08	128.2	122.58
10368	163.25	155.74	129.05	123.47
11422	163.64	156.17	129.61	124.05
12477	163.9	156.46	129.98	124.44
13531	164.08	156.64	130.23	124.7
14586	164.19	156.77	130.39	124.87
17750	164.33	156.92	130.59	125.07
21750	164.39	156.98	130.67	125.16
25750	164.41	157.01	130.7	125.19
29750	164.42	157.01	130.71	125.2

33750	164.42	157.02	130.72	125.21
37750	164.42	157.02	130.72	125.21
40000	164.42	157.02	130.72	125.21

**Figura 57**

*Curvas de Temperatura Antes y Después de la probeta, Aluminio 2024*

**Tabla 55**

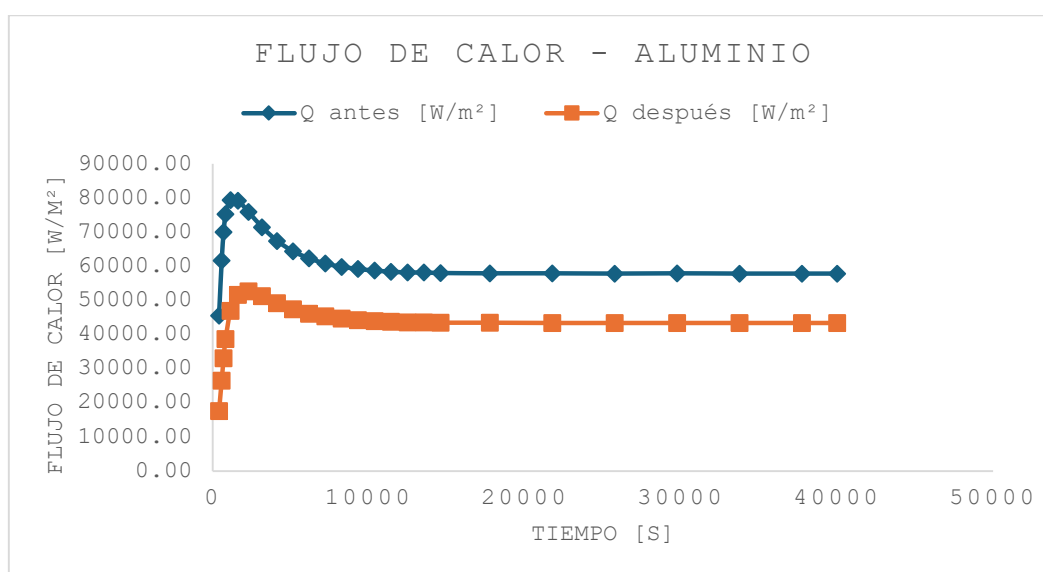
*Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Aluminio 2024*

Tiempo [s]	Q antes [W/m <sup>2</sup> ]	Q después [W/m <sup>2</sup> ]
400	45540.72	17592.63
570.38	61667.18	26564.68
695.21	70076.23	33063.21
820.04	75337.26	38723.48
1134.5	79460.01	46945.27
1605.1	79274.27	51689.01
2286	75991.04	52679.94
3154.7	71507.69	51263.09
4123.8	67476.09	49273.78
5136.7	64427.97	47469.47
6170	62347.19	46162.89
7213.7	60831.27	45345.56
8262.8	59873.59	44696.17
9314.7	59235.62	44289.82
10368	58758.24	43966.51
11422	58440.19	43803.65
12477	58202.08	43642.58

<b>13531</b>	58199.85	43561.46
<b>14586</b>	58041.92	43481.17
<b>17750</b>	57961.91	43479.33
<b>21750</b>	57961.17	43399.79
<b>25750</b>	57882.64	43399.51
<b>29750</b>	57960.80	43399.42
<b>33750</b>	57882.52	43399.33
<b>37750</b>	57882.52	43399.33
<b>40000</b>	57882.52	43399.33

**Figura 58**

*Curvas de Flujo de Calor Antes y Después de la probeta, Aluminio 2024*



**Tabla 56**

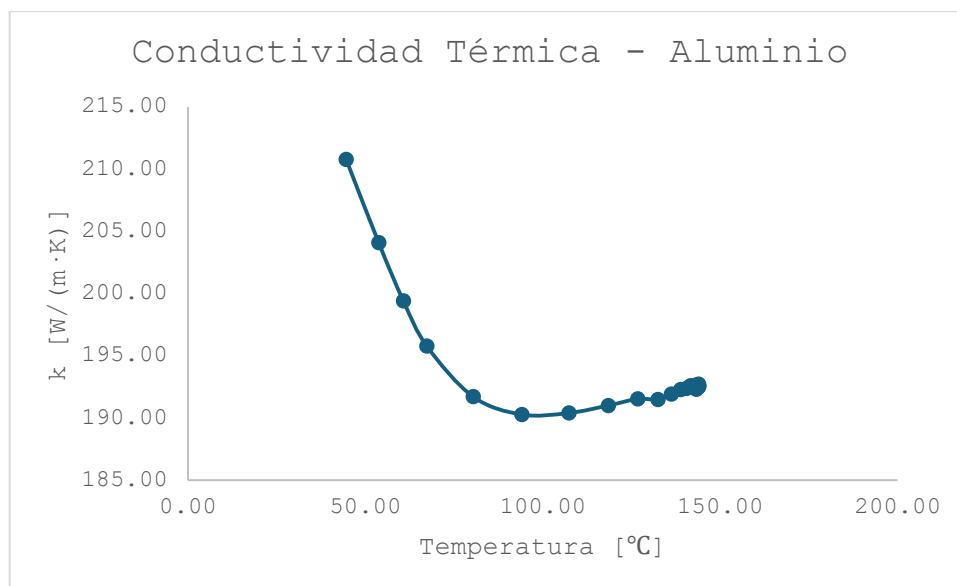
*Conductividad Térmica Transitorio, Aluminio 2024*

Temperatura [°C]	k [W/(m·K)]
44.58	210.77
53.73	204.09
60.68	199.41
67.30	195.77
80.38	191.70
94.09	190.27
107.29	190.39
118.45	190.99
126.70	191.52
132.39	191.47
136.24	191.92
138.81	192.28
140.51	192.37
141.64	192.57

142.40	192.44
142.89	192.48
143.22	192.30
143.44	192.66
143.58	192.42
143.76	192.63
143.83	192.63
143.86	192.48
143.86	192.70
143.87	192.55
143.87	192.55
143.87	192.55

**Figura 59**

*Curva de Conductividad Térmica Transitorio, Aluminio 2024*



## Apéndice B

```

%% =====
% SIMULACIÓN INTERACTIVA DE CONDUCTIVIDAD Y
TEMPERATURA (x-r)
% CON Δx, Δr FIJOS
% =====

clear; clc; close all;

%% -----
% Geometría y parámetros base
% -----
L_tot = 1.00;           % [m]
in_to_m = 0.0254;
r_tot = 2 * in_to_m;   % [m]
r_mat = 0.25 * in_to_m; % [m]

%% -----
% Propiedades fijas
% -----
k_probeta = 237;
k_aislante = 0.035;
h = 10;
Tinf = 27;

%% -----
% Tabla de materiales y k(T)
% -----
%SE UTILIZO SOLO LAS CONDUCTIVIDAD A 250 GRADOS
data.materials = {
    'Latón', [120 115 110 105 111 95];
    'Hierro Fundido', [0.080 0.085 0.090 83
0.105];
    'Acero inoxidable', [14.0 15.0 16.0 17.0
15.1 18.0];
    'Aluminio', [235 230 225 220 237.5
210];
    'Plata', [395 390 385 380 429 370];
};
T_values = [50 100 150 200 250 300];

%% -----
% Interfaz gráfica
% -----
f = figure('Name','Simulación Interactiva
Conductividad y Temperatura',...
'NumberTitle','off','Position',[200
100 950 600]);

% --- Crear AXES ---
ax = axes('Parent',f,'Units','normalized','Position',[
0.06 0.10 0.88 0.68]);
colorbar; colormap(hot);
xlabel(ax,'x [m]'); ylabel(ax,'r [m]');
set(ax,'YDir','normal','FontSize',11);

% --- Controles ---
uicontrol('Style','text','Units','normalized',...
'Position',[0.03 0.90 0.12
0.04],'String','Material:',...

'HorizontalAlignment','left','FontWeight','bold')
;

popupMaterial =
uicontrol('Style','popupmenu','Units','normalized'
',...

'String',data.materials(:,1),'Position',[0.14
0.90 0.22 0.05]);

uicontrol('Style','text','Units','normalized',...
'Position',[0.40 0.90 0.18
0.04],'String','Temperatura base (°C):',...

'HorizontalAlignment','left','FontWeight','bold')
;

popupTemp =
uicontrol('Style','popupmenu','Units','normalized'
',...

'String',string(T_values),'Position',[0.57 0.90
0.12 0.05]);

uicontrol('Style','text','Units','normalized',...
'Position',[0.03 0.82 0.12
0.04],'String','Δx [m]:',...

'HorizontalAlignment','left','FontWeight','bold')
;

editDX =
uicontrol('Style','edit','Units','normalized',...
'Position',[0.14 0.82 0.10
0.05],'String','0.1');

uicontrol('Style','text','Units','normalized',...
'Position',[0.28 0.82 0.12
0.04],'String','Δr [m]:',...

'HorizontalAlignment','left','FontWeight','bold')
;

editDR =
uicontrol('Style','edit','Units','normalized',...
'Position',[0.40 0.82 0.10
0.05],'String','0.05');

uicontrol('Style','pushbutton','String','Actualiz
ar gráfico','FontWeight','bold',...
'Units','normalized','Position',[0.75
0.89 0.18 0.06],...
'Callback',@(~,~) solicitar_deltas(...

popupMaterial,popupTemp,editDX,editDR,...

data,T_values,L_tot,r_tot,r_mat,...

k_probeta,k_aislante,h,Tinf,ax));

%% =====
% FUNCIÓN: solicitar Δx y Δr
% =====
function
solicitar_deltas(popupMaterial,popupTemp,editDX,e
ditDR,...

data,T_values,L_tot,r_tot,r_mat,...

k_probeta,k_aislante,h,Tinf,ax)

    dx = str2double(editDX.String);
    dr = str2double(editDR.String);

    if isnan(dx) || dx <= 0, errordlg('Δx no
válido'); return; end
    if isnan(dr) || dr <= 0, errordlg('Δr no
válido'); return; end

% -----

```

```

% VALIDACIONES CORRECTAS
% SOLO se exige divisibilidad de r_tot
% -----
tol = 1e-10;

% Δx debe dividir L_tot
if abs(L_tot/dx - round(L_tot/dx)) > tol
    error('Δx NO divide exactamente
L_tot'); return;
end

% Δr debe dividir r_tot
if abs(r_tot/dr - round(r_tot/dr)) > tol
    error('Δr NO divide exactamente
r_tot'); return;
end

% -----
% GENERACIÓN DE MALLA
% -----
n_last = round(L_tot/dx);
m_last = round(r_tot/dr);
Nx = n_last + 1;
Nr = m_last + 1;

x_faces = [0, (dx/2):dx:(L_tot-dx/2), L_tot];
x_nodes = 0.5*(x_faces(1:end-
1)+x_faces(2:end));
r_nodes = linspace(0, r_tot, Nr);

id = @(n,m) (m)*Nx + (n+1);

% -----
% PARÁMETROS DEL MATERIAL
% -----
matIndex = popupMaterial.Value;
T_index = popupTemp.Value;

material_name = data.materials{matIndex,1};
k_vector = data.materials{matIndex,2};

T00 = T_values(T_index);
k_cobre = k_vector(T_index);

% -----
% RUN SOLVER
% -----
[T_field] = solve_heat_zonas(...
L_tot,r_tot,r_mat,dx,dr,Nx,Nr,x_nodes,r_nodes,...
k_cobre,k_probeta,k_aislante,h,Tinf,T00,id);
% =====
% TABLA UNIFICADA: CENTRO (r=0) + SUPERFICIE
(r=r_tot)
% =====

NodoID = 0;
Region = {};
n_list = [];
m_list = [];
x_list = [];
r_list = [];
T_list = [];

m_centro = 0;
m_superficie = Nr - 1;

for n = 0:(Nx-1)
    % ----- CENTRO (r = 0) -----
    NodoID = NodoID + 1;
    Region{end+1,1} = 'Centro';

    n_list(end+1,1) = n;

    m_list(end+1,1) = m_centro;
    x_list(end+1,1) = x_nodes(n+1);
    r_list(end+1,1) = r_nodes(m_centro+1);
    T_list(end+1,1) = T_field(m_centro+1,n+1);

    % ----- SUPERFICIE (r = r_tot) -----
    NodoID = NodoID + 1;
    Region{end+1,1} = 'Superficie';

    n_list(end+1,1) = n;
    m_list(end+1,1) = m_superficie;
    x_list(end+1,1) = x_nodes(n+1);
    r_list(end+1,1) = r_nodes(m_superficie+1);
    T_list(end+1,1) = T_field(m_superficie+1,n+1);

end

Tabla_Centro_Superficie = table( ...
(1:NodoID)', ...
Region, ...
n_list, ...
m_list, ...
x_list, ...
r_list, ...
T_list, ...
'VariableNames',
{'NodoID','Region','n','m','x_m','r_m','T_C'} ...
);

assignin('base','Tabla_Centro_Superficie',Tabla_C
entro_Superficie);

% -----
% GRÁFICA
% -----
axes(ax); cla(ax);
pcolor(ax,x_nodes,r_nodes,T_field);
shading interp; colormap(hot); colorbar;

xlabel('x [m]'); ylabel('r [m]');
title(sprintf(['Distribución de
Temperatura\n',...
'%s | T00=%.0f°C | k=%.2f |
Δx=%.3f | Δr=%.3f'],...
material_name,T00,k_cobre,dx,dr));

set(ax,'YDir','normal');

% -----
% TEXTO DE NODOS (temperatura + coordenadas)
% -----
hold on;
for m = 1:length(r_nodes)
    for n = 1:length(x_nodes)
        text(x_nodes(n), r_nodes(m), ...
sprintf('%1f\n(%d,%d)',
T_field(m,n), n-1, m-1), ...
'HorizontalAlignment','center',
...
'FontSize',7,'FontWeight','bold','Color','k');
    end
end
hold off;
end

% =====
% SOLVER GENERAL POR ZONAS
% =====
function [T_field] = solve_heat_zonas(...
L_tot,r_tot,r_mat,dx,dr,Nx,Nr,x_nodes,r_nodes,...
k_cu,k_probeta,k_aisl,h,Tinf,T00,id)

```

```

n_last = Nx-1;
m_last = Nr-1;

j_metal = round(r_mat/dr);
j1 = j_metal + 1;
j2 = m_last - 1;
j_top = m_last;

A = spalloc(Nx*Nr, Nx*Nr, 7*Nx*Nr);
b = zeros(Nx*Nr,1);

sigma = 5.67e-8;
T00_K = T00 + 273.15;
Tinf_K = Tinf + 273.15;
Tfilm = (T00_K + Tinf_K)/2;
h_rad = 4*sigma*Tfilm^3;

Aax = @(m) pi*((m*dr+dr/2)^2 - max(m*dr-
dr/2,0)^2);
Aax0 = pi*(dr/2)^2;
ArN = @(m,dxloc) 2*pi*(m*dr+dr/2)*dxloc;

for m = 0:m_last
    for n = 0:n_last

        row = id(n,m);

        % --- BC PROBETA CALIENTE ---
        if n==0 && m<=j_metal
            A(row,row)=1;          b(row)=T00;
        end

        % CONDUCTIVIDADES
        kP =
obtener_k(n,m,x_nodes,r_nodes,r_mat,k_cu,k_probeta
a,k_aisl);

        if n+1<n_last, kE =
0.5*(kP+obtener_k(n+1,m,x_nodes,r_nodes,r_mat,k_c
u,k_probeta,k_aisl));
        else, kE=0; end

        if n-1>=0, kW = 0.5*(kP+obtener_k(n-
1,m,x_nodes,r_nodes,r_mat,k_cu,k_probeta,k_aisl))
;
        else, kW=0; end

        if m+1<m_last, kN =
0.5*(kP+obtener_k(n,m+1,x_nodes,r_nodes,r_mat,k_c
u,k_probeta,k_aisl));
        else, kN=0; end

        if m-1>=0, kS = 0.5*(kP+obtener_k(n,m-
1,x_nodes,r_nodes,r_mat,k_cu,k_probeta,k_aisl));
        else, kS=0; end

        % DISTANCIAS
        if n==0 || n==n_last-1, dx_e = dx/2;
    else dx_e = dx; end
        if n==1 || n==n_last, dx_w = dx/2;
    else dx_w = dx; end

        % =====
        % ECUACIONES POR ZONA
        % =====
        % --- ZONA (0,0) ---
        if (n==0 && m==0)
            aE = (kE/dx_e)*Aax0;
            aN = (kN/dr)*ArN(0,dx/2);
            aP = aE + aN;
            A(row,row)=-aP;
            A(row,id(n+1,m))=aE;
        end

        A(row,id(n,m+1))=aN;
        b(row)=0;
        continue;
    end

    % --- BORDE INFERIOR ---
    if (m==0 && n>=1 && n<=n_last-1)
        aW = (kW/dx_w)*Aax0;
        aE = (kE/dx_e)*Aax0;
        aN = (kN/dr)*ArN(0,dx);
        aP = aW+aE+aN;

        A(row,row)=-aP;
        A(row,id(n-1,m))=aW;
        A(row,id(n+1,m))=aE;
        A(row,id(n,m+1))=aN;
        b(row)=0;
        continue;
    end

    % --- ESQUINA INFERIOR DERECHA ---
    if (m==0 && n==n_last)
        aW = (kW/dx_w)*Aax0;
        aN = (kN/dr)*ArN(0,dx);
        aConv = h*Aax0;
        aRad = h_rad*Aax0;
        aP = aW+aN+aConv+aRad;

        A(row,row)=-aP;
        A(row,id(n-1,m))=aW;
        A(row,id(n,m+1))=aN;

        b(row)=- (aConv+aRad)*Tinf;
        continue;
    end

    % --- ZONAS 4 A 10 ---
    %=====
    % ZONA 4
    if (n==0 && m>=1 && m<=j_metal)
        aE = (kE/dx_e)*Aax(m);
        aN = (kN/dr)*ArN(m,dx/2);
        aS = (kS/dr)*ArN(m,dx/2);
        aP = aE+aN+aS;

        A(row,row)=-aP;
        A(row,id(n+1,m))=aE;
        A(row,id(n,m+1))=aN;
        A(row,id(n,m-1))=aS;
        b(row)=0;
        continue;
    end

    % ZONA 5
    if (n==0 && m>=j1 && m<=j2)
        aE = (kE/dx_e)*Aax(m);
        aN = (kN/dr)*ArN(m,dx/2);
        aS = (kS/dr)*ArN(m,dx/2);

        aP = aE+aN+aS;
        A(row,row)=-aP;

        A(row,id(n+1,m))=aE;
        A(row,id(n,m+1))=aN;
        A(row,id(n,m-1))=aS;

        b(row)=0;
        continue;
    end

    % ZONA 6
    if (n==0 && m==j_top)
        aE = (kE/dx_e)*Aax(m);
        aS = (kS/dr)*ArN(m,dx/2);

```

```

aConv = h*ArN(m,dx/2);
aRad = h_rad*ArN(m,dx/2);

aP = aE+aS+aConv+aRad;

A(row,row)=-aP;
A(row,id(n+1,m))=aE;
A(row,id(n,m-1))=aS;

b(row)=- (aConv+aRad)*Tinf;
continue;
end

% ZONA 7 (interior)
if (n>=1 && n<=n_last-1 && m>=1 &&
m<=j2)
    aE = (kE/dx_e)*Aax(m);
    aW = (kW/dx_w)*Aax(m);
    aN = (kN/dr)*ArN(m,dx);
    aS = (kS/dr)*ArN(m,dx);
    aP = aE+aW+aN+aS;

    A(row,row)=-aP;
    A(row,id(n+1,m))=aE;
    A(row,id(n-1,m))=aW;
    A(row,id(n,m+1))=aN;
    A(row,id(n,m-1))=aS;

    b(row)=0;
    continue;
end

% ZONA 8
if (m==j_top && n>=1 && n<=n_last-1)
    aE = (kE/dx_e)*Aax(m);
    aW = (kW/dx_w)*Aax(m);
    aS = (kS/dr)*ArN(m,dx);

    aConv = h*ArN(m,dx);
    aRad = h_rad*ArN(m,dx);

    aP = aE+aW+aS+aConv+aRad;

    A(row,row)=-aP;
    A(row,id(n+1,m))=aE;
    A(row,id(n-1,m))=aW;
    A(row,id(n,m-1))=aS;

    b(row)=- (aConv+aRad)*Tinf;
    continue;
end

% ZONA 9
if (n==n_last && m>=1 && m<=j2)
    aW = (kW/dx_w)*Aax(m);
    aN = (kN/dr)*ArN(m,dx/2);
    aS = (kS/dr)*ArN(m,dx/2);

    aConv = h*ArN(m,dx/2);
    aRad = h_rad*ArN(m,dx/2);

    aP = aW+aN+aS+aConv+aRad;

    A(row,row)=-aP;
    A(row,id(n-1,m))=aW;
    A(row,id(n,m+1))=aN;
    A(row,id(n,m-1))=aS;

    b(row)=- (aConv+aRad)*Tinf;
    continue;
end

% ZONA 10
if (n==n_last && m==j_top)
    aW = (kW/dx_w)*Aax(m);
    aS = (kS/dr)*ArN(m,dx/2);

    aConv_E = h*Aax(m);
    aConv_N = h*ArN(m,dx/2);

    aRad_E = h_rad*Aax(m);
    aRad_N = h_rad*ArN(m,dx/2);

    aP =
aW+aS+aConv_E+aConv_N+aRad_E+aRad_N;

    A(row,row)=-aP;
    A(row,id(n-1,m))=aW;
    A(row,id(n,m-1))=aS;

    b(row)=-
(aConv_E+aConv_N+aRad_E+aRad_N)*Tinf;
    continue;
end

end

T = A\b;
T_field = reshape(T,[Nx,Nr]);
end

%% =====
% FUNCIÓN k(n,m)
%=====
function k_eff =
obtener_k(n,m,x_nodes,r_nodes,r_mat,k_cu,k_al,k_a
isl)
    r = r_nodes(m+1);
    x = x_nodes(n+1);

    if r <= r_mat
        if x <= 0.45
            k_eff = k_cu;
        elseif x <= 0.55
            k_eff = k_al;
        else
            k_eff = k_cu;
        end
    else
        k_eff = k_aisl;
    end
end
end

```

## **Apéndice C**