



**Banco de pruebas de conductividad térmica en metales a la resistencia de contacto**

**Cristian Yesid Bocanegra Triana**

**20451929481**

**Daniela Alejandra Oliveros Murillo**

**20452029974**

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ibagué, Colombia

Junio, 2023.



**Banco de pruebas de conductividad térmica en metales a la resistencia de contacto**

**Cristian Yesid Bocanegra Triana**

**Daniela Alejandra Oliveros Murillo**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Mecánico**

Asesor (a):

Ing.Msc. Juan Carlos Rico Bermúdez

Línea de Investigación:

Transferencia de Calor

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ibagué, Colombia

Junio, 2023.



## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

El trabajo de grado titulado “Banco de pruebas de conductividad térmica en metales a la resistencia de contacto”, cumple con los requisitos para optar al título de Profesional en Ingeniería Mecánica

---

Firma del Tutor

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Ibagué. Junio de 2023.

**DEDICATORIA**

**Daniela Alejandra Oliveros Murillo**

A Dios primeramente por permitirme terminar todo este proceso con mucha paciencia y sabiduría. Igualmente, a mi madre Matilde Murillo, mi tía Mónica Murillo y mi tío Ariel Murillo por apoyarme con todo su cariño durante todo este camino, ustedes han sido siempre una parte esencial que impulsa mis sueños y esperanzas, gracias por estar a mi lado en días y noches difíciles durante mis tiempos de estudio. Han sido mi mejor guía de resiliencia y hoy que finalizo mi estudio, les dedico este logro obtenido. Orgullosa de tener una familia que estén apoyándome en todos los momentos importantes de mi vida, espero sean muchos logros más a su lado además de su perseverancia y constancia sin ustedes no hubiera sido posible este objetivo.

**Cristian Yesid Bocanegra Triana**

Dedico de todo corazón mi tesis a Dios, ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera, mi madre Ana Milena Triana Alape y a mi papa Lisímaco Bocanegra Martínez, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para ser de mí, una mejor persona. A mis hermanos Lesly Yurany Bocanegra Triana y Sebastián Bocanegra Triana que por sus palabras y compañía. A mi tía María Ludivia Bocanegra Martínez y Mi tía Deisy Bocanegra Martínez que con su apoyo y palabras me acompañaron en este camino, por su amor y brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente, y a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por permitirnos culminar nuestra etapa universitaria. Asimismo, nos gustaría expresar nuestra inmensa gratitud a todos los maestros que a lo largo de esta carrera nos brindaron todos los conocimientos posibles para formarnos como ingenieros. Igualmente, a nuestro asesor de tesis Juan Carlos Rico por su orientación y proporcionar recursos para el desarrollo del trabajo de grado, además de su apoyo constante y experiencia que fueron de gran ayuda para lograr este objetivo. También queremos agradecer a nuestra coordinadora de ingeniería mecánica Sandy Angelina Mosquera por brindarnos su apoyo y tiempo a lo largo de este proceso.

## Contenido

Tabla de tablas .....	10
Tabla de figuras .....	11
<b>Resumen</b> .....	13
<b>Abstract</b> .....	14
<b>1. Introducción</b> .....	15
<b>2. Antecedentes</b> .....	17
Historia y terminología.....	17
Modelos de banco de pruebas en el mercado .....	18
<b>3. Objetivos</b> .....	22
Objetivo general .....	22
<b>Objetivos específicos</b> .....	22
<b>4. Justificación</b> .....	22
<b>5. Marco teórico</b> .....	23
<i>Mecánica continua</i> .....	23
<i>Volúmenes de control</i> .....	23
<i>Conducción de calor lineal</i> .....	25
<i>Conductividad</i> .....	26
<i>La conducción de calor</i> .....	26
<i>Conducción</i> .....	27
<i>Flujos externos sobre tubos o cilindros</i> .....	29
Concepto o Definición de la Resistencia Térmica.....	31
<b>6. Diseño metodológico</b> .....	34
<i>Descripción general del módulo</i> .....	34
<b>7. Diseño del módulo</b> .....	35
Consideraciones de diseño generales: .....	36
<i>Modulo caliente</i> .....	37
<i>Descripción general: diseño del elemento térmico y cálculo</i> .....	37
<i>Calculo transferencia de calor</i> .....	42
<i>Interfaz</i> :.....	49



<i>Módulo frío</i> .....	54
<i>Sistema de control</i> .....	59
<i>Sistema de tratamiento de las señales</i> .....	59
<b>8. Resultados y análisis de resultados</b> .....	61
<i>Resistencia eléctrica tubular</i> .....	61
<b>9. Conclusiones</b> .....	65
<b>10. Recomendaciones</b> .....	65
<b>Referencias</b> .....	66
<b>11. Anexos</b> .....	68
<i>Anexo 1. Condiciones iniciales resistencia térmica, transferencia de calor por     conducción.</i> .....	68
<i>Anexo 2. Condiciones iniciales de diseño de la interfaz.</i> .....	69
<i>Anexo 3. Condiciones iniciales sistema de enfriamiento.</i> .....	70
<i>Anexo 4. Diseño de control</i> .....	70
<i>Anexo 5. Planos del módulo banco de pruebas térmicas.</i> .....	75
<b>Anexo 6. Guía de usuario</b> .....	82

## Tabla de tablas

Tabla 1. Conductividad térmica de diferentes materiales. Fuente: (simscale, 2023).....	29
Tabla 2. Parámetros de diseño de resistencia eléctrica calefactora. Fuente: Propia.....	37
Tabla 3. Propiedades térmicas de algunos materiales comunes en el mercado. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia. ....	40
Tabla 4. Propiedades térmicas de algunos materiales comerciales. Fuente: (Cengel, Boles, & Kanoglu, 2019). Elaboración: Propia. ....	41
Tabla 5. Destalles de ABS. Fuente: (Tecnic, 2023) .....	42
Tabla 6. Conductividades térmicas de diversos materiales en W/(K·m). Fuente: Propia. ....	47
Tabla 7. Condiciones de entrada propuestas. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia.....	47
Tabla 8. Resultados obtenidos. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia .....	48
Tabla 9. Condiciones de entrada propuestas. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia.....	48
Tabla 10. Resultados obtenidos. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia ...	48
Tabla 11. Pines del shield display LCD. Fuente: Propia.....	72
Tabla 12. Condiciones de operación del equipo de conducción lineal. Fuente: Propia. ....	84

## Tabla de figuras

Figura 1. Diagrama en la dirección que se transfiere el calor: Fuente: (greenspec, 2023)...	15
Figura 2. Equipo de medición de la temperatura y calibración TE1/EV. Fuente: (Veneta, 2023).....	18
Figura 3. Equipo para procesos termodinámicos básicos. Fuente: (Veneta, 2023).....	19
Figura 4. Equipo de conducción lineal. Fuente: (Veneta, 2023).....	20
Figura 5. Convección de radiación libre y forzada. Fuente: (Veneta, 2023).....	21
Figura 6. Mecánica euleriana. Fuente: (web.me.iastate, 2023).....	24
Figura 7. Conductividad térmica del gas. Fuente: (simscale, 2023).....	28
Figura 8. Flujo de calor por un cuerpo. Fuente: (AreaCiencias, 2021, s.f.).....	33
Figura 9. Esquema general de los subsistemas y conjuntos de la sección de transferencia de temperatura. Fuente: Propia.....	36
Figura 10. Resistencia eléctrica. Fuente: (S.R.L, 2023).....	39
Figura 11.. Configuración y diagramación de una resistencia eléctrica. Fuente: (synheat, 2023).....	41
Figura 12. Sección transversal del módulo caliente. Fuente: Propia.....	43
Figura 13. Interfaz de prueba. Fuente: Propia. ....	49
Figura 14. Diagrama del efecto en la implementación de pasta térmica. Fuente: (intel, 2013).....	50
Figura 15. Ley de Fourier de la conducción de calor. Fuente: (Mendoza, 2020).....	51
Figura 16. Vista de la sección transversal Interfaz. Fuente: Propia. ....	52
Figura 17. Resultados de iteración del gradiente de temperatura. Fuente: Propia. ....	53
Figura 18. Resultados de iteración del gradiente de temperatura con los módulos de calor y frío. Fuente: Propia. ....	54
Figura 19. Resultados de la iteración del flujo del agua. Fuente: Propia. ....	55
Figura 20. Circuito hidráulico implementado para el sistema de enfriamiento. Fuente: Propia.....	56
Figura 21. Esquema del módulo de enfriamiento por capaz. Fuente: Propia.....	58
Figura 22. Vista de la sección transversal del módulo de enfriamiento. Fuente: Propia.....	58
Figura 23. Configuración de los termopares en la interfaz. Fuente: (edibon, 2010).....	60

Figura 24. Demostración de comportamiento lineal de equipo de conducción lineal. Fuente: Propia.....	62
Figura 25. Radiación neta de la interfaz. Fuente: Propia.....	63
Figura 26. Radiación emitida de la probeta. Fuente: Propia. ....	63
Figura 27. Radiación reflejada de la interfaz. Fuente: Propia. ....	64
Figura 28. Radiación absorbida de la interfaz. Fuente: Propia.....	64
Figura 29. Configuración del módulo relé hacia la resistencia tubular de calefacción. Fuente: (Lozano, 2020).....	70
Figura 30. Módulo de calor. Fuente Propia. ....	75
Figura 31. Módulo interfaz. Fuente: Propia. ....	76
Figura 32. Carcaza. Fuente: Propia. ....	77
Figura 33. Pieza de la interfaz. Fuente: Propia. ....	78
Figura 34. Módulo de enfriamiento. Fuente: Propia. ....	79
Figura 35. Tapas de la fuente de enfriamiento. Fuente: Propia.....	80
Figura 36. Vista render banco de pruebas de temperatura. Fuente: Propia. ....	81
Figura 37. Conexión tubería con motobomba y módulo de enfriamiento. Fuente: Propia. .	84
Figura 38. Conexión hidráulica de motobomba. Fuente: Propia.....	85
Figura 39. Diagrama de conexión eléctrica de la motobomba. Fuente: Propia.....	86
Figura 40: Conexión de los sensores. Fuente propia.....	86
Figura 41. Diagrama de conexión del control relé desde Arduino hasta la resistencia térmica. Fuente: Propia.....	87

## **Resumen**

Varios tipos de experimentos en laboratorio, se requiere una integración de la tecnología basada en sensores para el aprendizaje de las ciencias con el fin de mejorar la calidad de la enseñanza de las ciencias, especialmente para mejorar la calidad de la medición física. Un experimento convencional de física es dependiente del tiempo realizado en las escuelas, los estudiantes comúnmente ingresan los datos manualmente con la ayuda de un cronómetro. Sin embargo, los fenómenos de transferencia de calor por conducción no se pueden explorar a menos que se tenga el dispositivo para identificar los cambios de calor dependientes del tiempo durante la investigación. De este modo, se propone para la universidad Antonio Nariño Sede Ibagué, un novedoso kit de laboratorio educativo que investiga la transferencia de calor. Los cambios de temperatura de una interfaz se pueden analizar mientras se calienta de un lado y se enfría del otro lado. El resultado muestra las buenas tendencias de los cambios de temperatura dependientes del tiempo debido a los fenómenos de conducción. Se explorarán los efectos del área de la sección transversal. Es así como este equipo, es un módulo que está provisto de una barra metálica cilíndrica para la realización de una serie de experimentos de conducción lineal de calor. Está provisto de una serie de tomas para la conexión de una serie de sensores de temperatura tipo "T". Para mantener el gradiente de temperatura constante, en un lateral de los módulos se ha insertado un sistema de refrigeración por circulación de agua. Finalmente se construyó el dispositivo, además de una guía y manual de uso que orienta la realización de la experiencia práctica de los estudiantes.

**Palabras clave: Banco de pruebas, transferencia de calor, materiales conductores de calor.**

## **Abstract**

Various types of laboratory experiments, integration of sensor-based technology for science learning is required to improve the quality of science education, especially to improve the quality of physical measurement. The use of sensor technology integrated with Arduino™ programming can handle the problem of real-time data recording.

A conventional time-dependent physics experiment conducted in schools, students commonly enter data manually with the help of a stopwatch. However, conduction heat transfer phenomena cannot be explored unless one has the device to identify the time-dependent heat changes during the investigation. Thus, a novel educational laboratory kit that investigates heat transfer is proposed. The time-dependent measurement employs an Arduino microcontroller based on temperature sensors.

The temperature changes of an interface can be analyzed while it is heated on one side and cooled on the other side. The result shows good trends of time-dependent temperature changes due to conduction phenomena. The effects of cross-sectional area will be explored. It is believed that this design is suitable for students and teachers to implement. The result shows the good trends of time-dependent temperature changes due to conduction phenomena. The effects of cross-sectional area will be explored.

This is how this equipment is a module that is provided with a cylindrical metal rod for performing a series of linear heat conduction experiments. It is provided with a series of sockets for the connection of a series of "T" type temperature sensors. To maintain the temperature gradient constant, a water circulation cooling system has been inserted on one side of the modules.

The instrumentation provided with the unit allows the measurement of the temperature and the electrical power delivered to the heating element. For the control of the delivered energy, it has a control circuit that allows the variation from 0 to 100 % of the maximum power of the heating element.

The module modules incorporate a water regulation valve, which allows the cooling water flow rate to be varied, and temperature sensors.

## 1. Introducción

Cualquier materia que se compone de átomos y moléculas tiene la capacidad de transferir calor. Los átomos están en diferentes tipos de movimiento en cualquier momento. El movimiento de las moléculas y los átomos es responsable del calor o energía térmica y toda materia tiene esta energía térmica. Cuanto mayor sea el movimiento de las moléculas, mayor será la energía térmica. Sin embargo, hablando de transferencia de calor, no es más que el proceso de transferencia de calor de un cuerpo de alta temperatura a uno de baja temperatura.

La transferencia de calor, cualquiera o todos los tipos de fenómenos, considerados como mecanismos, que transportan energía y entropía de un lugar a otro. Los mecanismos específicos suelen denominarse convección, radiación térmica y conducción. La conducción implica la transferencia de energía y entropía entre moléculas adyacentes, por lo general un proceso lento. La convección implica el movimiento de un fluido calentado, como el aire, por lo general un proceso bastante rápido. La radiación se refiere a la transmisión de energía como radiación electromagnética desde su emisión en una superficie calentada hasta su absorción en otra superficie, un proceso que no requiere ningún medio para transmitir la energía. (ACOFI, 2015)

Las propiedades que tiene la transferencia de calor son:

- La transferencia de calor es el intercambio de energía térmica entre objetos físicos.
- El calor fluirá naturalmente de un objeto más caliente a uno más frío (Segunda Ley de la Termodinámica)



*Figura 1. Diagrama en la dirección que se transfiere el calor: Fuente: (greenspec, 2023)*

- El equilibrio térmico ocurre cuando todos los objetos involucrados y su entorno alcanzan la misma temperatura.
- Básicamente, existen tres formas en que se puede transferir el calor: Conducción, convección y radiación

Los ingenieros trabajan con su conocimiento de la transferencia de calor para ayudar a que los edificios sean más eficientes/sostenibles y utilicen menos recursos para calefacción y refrigeración. También optimizan el uso o la disipación del calor en productos como teléfonos celulares, maquinaria pesada, automóviles y más.

Los ingenieros utilizan su amplio conocimiento de los sistemas mecánicos, químicos y biológicos cuando tienen en cuenta la transferencia de calor en sus productos. Por ejemplo, el diseño de motores de combustión interna, sistemas de aire acondicionado y calefacción, reactores químicos y biológicos e incluso la tecnología de la ropa, requiere una comprensión de la transferencia de calor. Los ingenieros también diseñan y prueban materiales aislantes para casas, edificios e incluso recipientes para bebidas, aplicando su comprensión de la transferencia de calor.

Los valores de conductividad térmica varían sustancialmente entre materiales y dependen en gran medida de la estructura de cada material específico. Algunos materiales tendrán diferentes valores de conductividad térmica según la dirección del viaje del calor.

La conductividad térmica en sólidos metálicos difiere una vez más de los ejemplos anteriores. Los metales tienen las conductividades térmicas más altas de todos los materiales, excepto el grafeno, y tienen la combinación única de poseer conductividad térmica y eléctrica. Ambos atributos son transferidos por las mismas moléculas, y la relación entre los dos se explica por la Ley de Wiedemann-Franz. Esta ley atestigua que a cierta temperatura la conductividad eléctrica será proporcional a la conductividad térmica, sin embargo, a medida que aumenta la temperatura, la conductividad térmica del material aumentará mientras que la conductividad eléctrica se reducirá.

La conductividad térmica es un componente crucial de la relación entre los materiales, y la capacidad de comprenderla nos permite lograr el mejor rendimiento de los materiales. Las pruebas y mediciones de conductividad térmica efectivas son críticas para



este esfuerzo. Los métodos de prueba de conductividad térmica se pueden clasificar como de estado estable o transitorio. Esta delimitación es una característica definitoria de cómo funciona cada método.

## 2. Antecedentes

### Historia y terminología

Sin ayuda externa, el calor siempre fluirá de los objetos calientes a los fríos, lo cual es una consecuencia directa de la segunda ley de la termodinámica.

A eso lo llamamos flujo de calor. A principios del siglo XIX, los científicos creían que todos los cuerpos contenían un fluido invisible llamado calórico (un fluido sin masa que se pensaba que fluía de los objetos calientes a los fríos). Al calórico se le asignaron propiedades, algunas de las cuales resultaron ser inconsistentes con la naturaleza (por ejemplo, tenía peso y no se podía crear ni destruir). Pero su característica más importante era que podía fluir de cuerpos calientes a cuerpos fríos. Esa fue una forma muy útil de pensar en el calor.

Thompson y Joule demostraron que esta teoría del calórico estaba equivocada. El calor no es una sustancia como se supone, sino un movimiento a nivel molecular (la llamada teoría cinética). Un buen ejemplo es frotarnos las manos. Ambas manos se calientan, aunque inicialmente estaban a la misma temperatura más fría. Ahora bien, si la causa del calor fuera un fluido, entonces habría fluido de un cuerpo (más caliente) con más energía a otro con menos energía (más frío). En cambio, las manos se calientan porque la energía cinética del movimiento (roce) se ha convertido en calor en un proceso llamado "fricción". (simscale, 2023)

El flujo de calor ocurre todo el tiempo desde cualquier entidad física hacia los objetos que la rodean. El calor fluye constantemente desde tu cuerpo hacia el aire que te rodea. El pequeño movimiento del aire impulsado por la flotabilidad (o convección) continuará en una habitación porque las paredes nunca pueden ser perfectamente isotérmicas como en teoría. El único dominio libre de flujo de calor tendría que ser isotérmico y completamente aislado de cualquier otro sistema que permita la transferencia de calor. Tal sistema es prácticamente imposible de crear.

El enfriamiento del sol es un proceso primario que experimentamos naturalmente. Otros procesos son el enfriamiento por conducción del centro de la Tierra y el enfriamiento por radiación de otras estrellas. (Lienhard & Lienhard, 2020)

Modelos de banco de pruebas en el mercado

Manera. TE1/EV

## DESCRIPCIÓN

Esta unidad ha sido diseñada para estudiar las técnicas de medición de temperatura y los modos de calibración de los sensores relevantes por medio de puntos fijos y de un termómetro provisto de certificado de calibración.



*Figura 2. Equipo de medición de la temperatura y calibración TE1/EV. Fuente: (Veneta, 2023)*

Consiste en un baño de agua caliente y de un baño de hielo para determinar puntos de referencia precisos (punto de ebullición y punto de fusión de agua) y variable Temperaturas.

Un conjunto de termómetros de diferentes tipos se fija en un soporte que se puede mover del baño caliente al baño de hielo. Los termómetros disponibles son:

- Referencia Pt100 termorresistencia con certificado de calibración
- Termorresistencia industrial Pt100
- Dos termopares tipo K
- Termistor PTC

- Termómetro de gas inerte
- Termómetro líquido

Procesos de expansión de un gas perfecto

Manera. TE5/EV

## DESCRIPCIÓN

Este equipo ha sido diseñado para estudiar procesos termodinámicos básicos con aire como fluido de trabajo; consiste en dos tanques transparentes interconectados que son respectivamente presurizados y puestos al vacío por un compresor; la presión y la temperatura dentro de ellos se miden durante las pruebas.



*Figura 3. Equipo para procesos termodinámicos básicos. Fuente: (Veneta, 2023)*

Un sensor de presión conectado con los tanques y dos internos Los sensores de temperatura permiten controlar las variaciones del aire Propiedades adentro estos Embalses continuamente.

Ambos tanques están hechos de plástico rígido transparente para aislar el aire dentro de ellos del ambiente y se pueden conectar con la bomba para su presurización / ajuste al vacío.

Todas las medidas (presión, temperaturas, nivel) se pueden ver en pantallas digitales y pueden almacenarse en un PC mediante el sistema de adquisición de datos (opcional) SI-TE5 / EV.

## CONDUCCIÓN DE CALOR LINEAL

Manera. TE6A/EV

## DESCRIPCIÓN

Este equipo ha sido diseñado para estudiar la ecuación de Fourier en un sistema unidimensional en condiciones de estado estacionario.



*Figura 4. Equipo de conducción lineal. Fuente: (Veneta, 2023)*

Eso Incluye Dos cilíndrico Secciones para calefacción y enfriamiento ese enlatar ser Junto Para cada Otro; además alguno Se pueden insertar secciones intercambiables. Calefacción enfriamiento y Las secciones intermedias se colocan coaxialmente dentro de los cilindros de material plástico para minimizar las pérdidas de calor y proteger Operadores De Escaldaduras.

Un conjunto de termopares instalados a intervalos regulares permite detectar la tendencia de la temperatura.

## CONVECCIÓN LIBRE Y FORZADA

Manera. TE6H/EV

### DESCRIPCIÓN

Esta unidad de sobremesa consiste en un ventilador centrífugo con conducto de descarga vertical en el que se pueden insertar tres tipos diferentes de superficies de calentamiento: superficie plana, superficie de pasadores cilíndricos y una superficie con aletas.



*Figura 5. Convección de radiación libre y forzada. Fuente: (Veneta, 2023)*

La temperatura del aire se mide antes y después de la superficie de calentamiento y en 5 puntos diferentes de la propia superficie de calentamiento. Un anemómetro permite medir la velocidad del aire en el conducto.

### **3. Objetivos**

Para alcanzar las metas y el desarrollo del proyecto se plantean los siguientes objetivos de trabajo.

#### **Objetivo general**

Diseñar y construir un banco de pruebas de conductividad térmica para metales como: latón y cobre en función a la resistencia de contacto, para la universidad Antonio Nariño sede Ibagué.

#### **Objetivos específicos**

- Consultar estados del arte sobre el diseño y construcción de dispositivos o bancos de laboratorio enfocados en el método de resistencia de contacto, permitiendo así analizar los diferentes diseños de bancos para identificar los inconvenientes que se presentan en el transcurso de su construcción.
- Establecer variables para el diseño y selección de componentes necesarios para la construcción del proyecto.
- Construir, poner a punto de prueba, elaborar guía de laboratorio y manual de uso donde se verán evidenciados los aprendizajes obtenidos experimentalmente de los conocimientos previos.

### **4. Justificación**

La universidad Antonio Nariño sede Ibagué cuenta con limitada dotación de equipos de laboratorio, esto hace que resulte de especial interés este proyecto debido a que se puede mejorar con la implementación de instrumentos necesarios, proporcionando más oportunidades para la realización de pruebas de laboratorio las cuales permitirán mejorar las capacidades de los estudiantes como futuros ingenieros. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se ha decidido construir un banco de pruebas de conductividad térmica para el campo de ingeniería mecánica, lo que constituye una gran oportunidad de desarrollo y aplicación de conocimientos necesarios para el título profesional. Originando criterios y nuevas ideas para que los estudiantes sean partícipes del diseño y desarrollo tecnológico en la universidad.

Generalmente los temas transmitidos en transferencia de calor se estudian de manera teórica, sin embargo, para un mejor entendimiento se recomienda complementar estos conocimientos con prácticas de laboratorio, de aquí la importancia en la realización de este banco de pruebas que buscará reforzar y permitir que los estudiantes entiendan de manera práctica los fenómenos y comportamientos que se presentan durante el ejercicio de la actividad en el laboratorio. Por lo antes mencionado este banco de pruebas busca facilitar el estudio de flujo de transferencia térmica, que será de gran utilidad para la formación de futuros proyectos de grado en donde se requieran realizar estudios relacionados con el diseño, construcción y selección de materiales o aislantes requeridos para esta rama de estudio, beneficiándose de los equipos que la universidad coloca a disposición de los estudiantes de los cuales uno de ellos es el presente banco de pruebas.

## **5. Marco teórico**

### *Mecánica continua*

La mayoría de los problemas de física se pueden dividir en el comportamiento de partículas o átomos individuales. Este enfoque puede ser útil, pero por lo general es demasiado difícil de manejar directamente. Para acelerar las cosas, tratamos de caracterizar nuestros problemas por los promedios del movimiento de partículas, donde las propiedades varían continuamente sobre el área o volumen de interés. A este enfoque lo llamamos Mecánica continua, y es la columna vertebral no solo de la transferencia de calor, sino también de la dinámica de fluidos, la electrodinámica, la dinámica estructural y muchos otros.

### *Volúmenes de control*

Para resolver problemas continuos, es muy útil tener un "bloque de construcción" general que podamos usar para formular soluciones de manera consistente. Un enfoque es rastrear lotes de partículas a medida que se mueven, lo que se conoce como mecánica lagrangiana. Otro método, más común, es fijar un volumen de control y analizar las partículas que lo atraviesan, llamado Mecánica Euleriana.

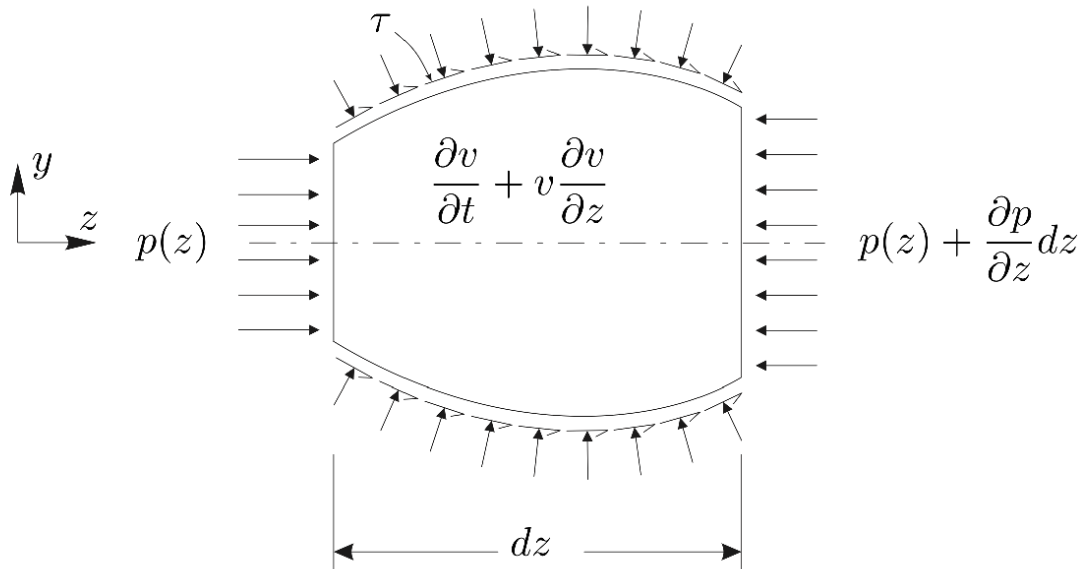


Figura 6. Mecánica euleriana. Fuente: (web.me.iastate, 2023)

*Ecuación de continuidad*

Se pueden definir propiedades como la temperatura, el impulso, la energía, la masa o el campo eléctrico para este volumen de control, y dos cosas hacen que esas propiedades cambien con el tiempo:

El material dentro del volumen cambia, como reacciones químicas o generación de calor.

Los materiales con diferentes propiedades entran o salen del volumen de control.

Si examinamos el caso de la energía (Q), podemos construir un modelo simple de este comportamiento afirmando:

$$\begin{aligned} & \text{Rate of change of CV Energy} + \text{Energy leaving the CV} \\ & = \text{Energy generation rate} \end{aligned}$$

Expresado para un volumen, podemos reordenar los términos y desarrollar la siguiente expresión

$$\frac{d}{dt} \int \int \int Q_{\text{Total Energy}} dv + \int \int \mathbf{q}'' \cdot d\mathbf{s} = \int \int \int Q_{\text{source}} \dot{\phantom{Q}} dv$$



Donde (j) es la tasa de cambio de energía en la superficie, o flujo. Esta expresión se conoce como la forma integral de la Ecuación de Continuidad. También podemos usar el teorema de la divergencia para obtener una ecuación diferencial, también conocida como forma de divergencia:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}'' = Q_{\text{source}}$$

### *Conducción de calor lineal*

Este modelo tiene una barra de latón macizo de sección circular, hecha en dos secciones con una sección central intercambiable. Se monta en una placa base con un esquema claro del diseño del experimento. La primera sección de latón incluye dos termopares y el calentador eléctrico (fuente de calor). La segunda sección de latón incluye una pequeña cámara refrigerada por agua (disipador de calor) y dos termopares más. Las secciones intermedias intercambiables (suministradas) son de diferentes metales:

- Latón: por lo que la barra se convierte en una longitud de latón
- Aluminio
- Acero inoxidable
- Cobre

Cada sección central tiene tres termopares para permitir el cálculo de la conductividad térmica de las muestras usando dos métodos diferentes:

- El método absoluto
- El método de barra de corte comparativo

El calentador eléctrico y los termopares se conectan a los enchufes de la Unidad base, que también suministra la alimentación de agua fría y el drenaje para el disipador de calor.

Se enciende el flujo de agua de enfriamiento y se ajusta la potencia del calentador hasta que el experimento alcanza el equilibrio, luego registran las temperaturas a medida que el calor se conduce a lo largo de la barra. El aislamiento alrededor de la barra reduce la pérdida de calor por convección y radiación, por lo que los resultados deberían estar cerca de la teoría solo para la conducción lineal simple.

### *Conductividad*

La conductividad refiere a la capacidad que ofrece un determinado elemento para dejar pasar a través de este a alguna otra cosa. La conductividad en este sentido guarda relación con el concepto de propiedades de los materiales, esto es, las diversas características que puede presentar un material determinado al exponerse a diversos fenómenos. Cualquier tipo de conductividad es importante para determinar la eficiencia que tendrán distintos elementos a la hora de utilizarse para un fin específico. Las más relevantes son la que guardan relación con la capacidad de un elemento de conducir electricidad o de conducir calor, circunstancia que se explica por su obvia aplicación en diversas actividades del hombre. (ENCICLOPEDIA, 2023)

### *La conducción de calor*

La conductividad térmica, de manera intrínseca, es la propiedad de los cuerpos capaces de conducir el calor. El proceso implica la transferencia de la energía cinética de molécula a molécula. La propiedad inversa a la conductividad térmica recibe el nombre resistencia térmica (la capacidad de un material para generar oposición al transporte del calor).

La conductividad térmica se puede llevar a cabo a través de la conducción, cuando se transmite el calor por contacto, pero sin transferencia de materia. Por convección, se transmite el calor a través del contacto por transferencia de la materia que está caliente, y por radiación cuando el calor se transmite mediante ondas electromagnéticas.

La conductividad eléctrica y la conductividad térmica se pueden presentar en un mismo cuerpo compuesto por electrones libres. Sin embargo, no es una propiedad común de los materiales.

Por ejemplo, en muchos dispositivos eléctricos se colocan capas de materiales cerámicos aislantes para separar la conducción de electricidad y su vez permitir la conducción de calor, de esta manera se pueden realizar ambas conducciones sin verse afectadas.

### Conducción

Ley de Fourier: Joseph Fourier (ver Figura 3) publicó su libro “Teoría Analítica del Calor” en 1822.

En este libro, formuló una teoría completa de la conducción del calor. Él declaró la ley empírica a saber. la Ley de Fourier que establece que el flujo de calor ( $q$  resultante de la conducción térmica es directamente proporcional a la magnitud del gradiente de temperatura. Si nombramos la constante de proporcionalidad, eso significa

$$q = -k \frac{dT}{dX}$$

La constante,  $k$ , se denomina conductividad térmica con las dimensiones:

$$\frac{EN}{mK}, o \frac{j}{msK}$$

El flujo de calor es una cantidad vectorial, la ecuación dice, que, si la temperatura disminuye con  $X$ ,  $q$  será positivo, es decir, fluirá en positivo  $X$ -dirección. Si  $T$  aumenta con  $X$ ,  $q$  será negativo; fluirá en negativo  $X$ -dirección. En cualquier caso,  $q$  fluirá de temperaturas más altas a temperaturas más bajas. La ecuación es la formulación unidimensional de la ley de Fourier. La forma tridimensional equivalente es:

$$\vec{q} = -k\nabla T$$

Dónde  $\nabla$  indica el gradiente.

En problemas de conducción de calor unidimensionales, no hay problema para determinar la dirección del flujo de calor. Por esta razón, a menudo es conveniente escribir la ley de Fourier en forma escalar simple:

$$q = k \frac{\Delta T}{L}$$

Dónde  $L$  es el espesor en la dirección del flujo de calor y  $\Delta T$  ambos se escriben como cantidades positivas. Se debe tener en cuenta que  $q$  siempre fluye de alta a baja temperatura.

La conductividad térmica de los gases se puede entender con la imaginación de las moléculas. Estas moléculas se mueven a través del movimiento térmico de una posición a otra como se puede ver en la siguiente imagen:

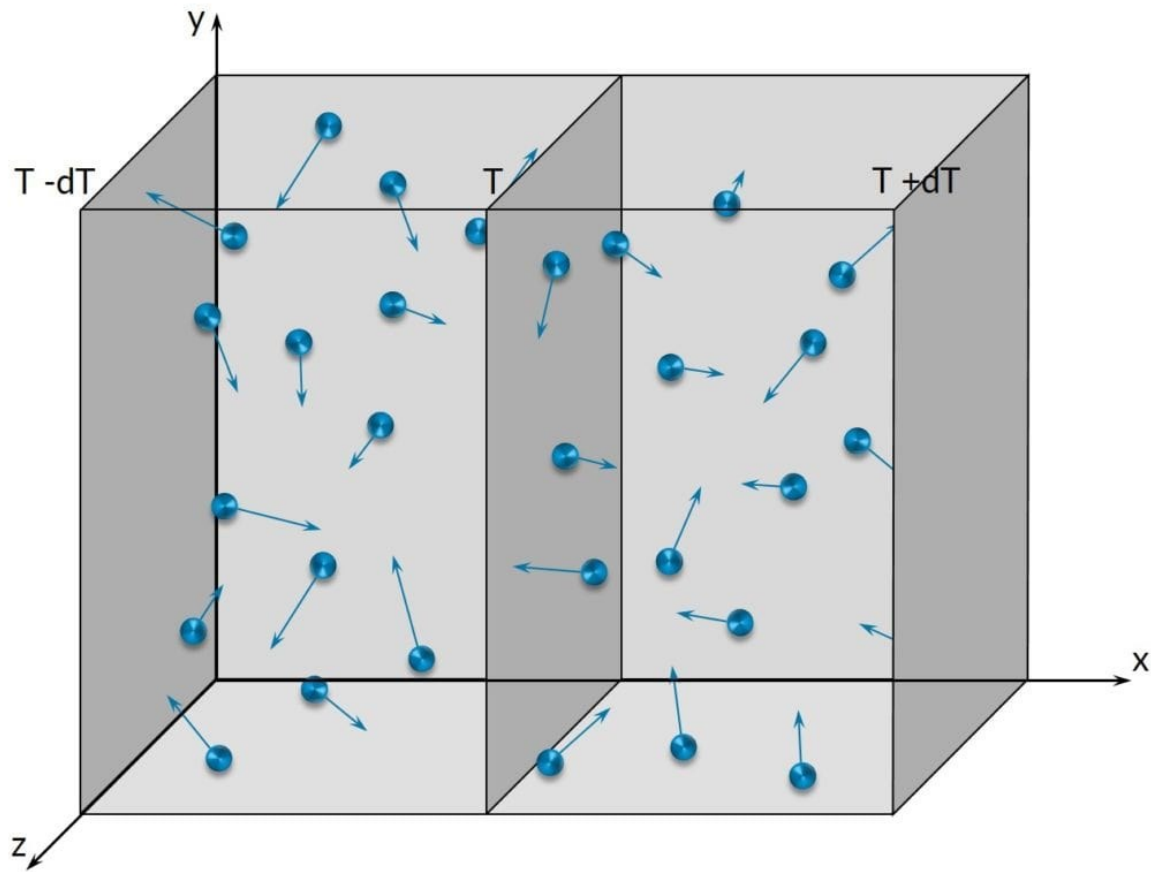


Figura 7. Conductividad térmica del gas. Fuente: (simscale, 2023)

La energía interna de las moléculas se transfiere por impacto con otras moléculas. Las áreas con bajas temperaturas serán ocupadas por moléculas de altas temperaturas y viceversa. La conductividad térmica se puede explicar con esta idea y derivarse con la teoría cinética de los gases:

$$T = \frac{2}{3} \frac{k}{N k_B}$$

La conductividad térmica transferida por los fonones también existe en los metales, pero es superada por la conductividad de los electrones.

La baja conductividad térmica de los materiales aislantes como el poliestireno o la lana de vidrio se basa en el principio de baja conductividad térmica del aire (o de cualquier otro gas). La siguiente tabla enumera algunos de los elementos/materiales comúnmente utilizados y sus conductividades térmicas:

<b>Material</b>	<b>Conductividad térmica EN/(m.K)</b>
Oxígeno	0.023
Vapor	0.0248
Poliestireno	0.032-0.050
Agua	0.5562
Vaso	0.76
Concreto	2.1
Acero de alta aleación	15
acero sin aleación	48-58
Hierro	80.2
Cobre puro	401
Diamante	2300

Tabla 1. Conductividad térmica de diferentes materiales. Fuente: (simscale, 2023)

#### *Flujos externos sobre tubos o cilindros*

Otro de los temas de mayor interés a tratar en este trabajo implica las consideraciones de flujo que existen sobre un fluido normal al eje de un cilindro circular.

En la industria se puede encontrar aplicaciones en donde intervienen tubos cilíndricos, comúnmente en los intercambiadores de calor en donde adicionalmente se encuentra tanto flujo externo y flujo interno.

La longitud característica para un cilindro es el diámetro externo  $D$ . Debido a esto el número de Reynolds está definido como:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

Donde es la velocidad uniforme del fluido con la cual se aproxima al cilindro. El Reynolds crítico para este tipo de caso es de aproximadamente  $2 \times 10^5$ , lo cual se considera que el Reynolds para flujo turbulento en este tipo de aplicación es de valores a partir de  $2 \times 10^5$ . Este tipo de cruce de flujos induce unos patrones con un grado alto de complejidad ya que el fluido se ramifica después de la zona de ataque y se forma una capa límite que envuelve al cilindro. El fluido se detiene al colisionar con el cilindro generando un aumento en la presión en un punto de estancamiento para luego disminuir en la dirección del flujo y creciendo su velocidad.

Para el cálculo de transferencia de calor por convección en este tipo de elementos igualmente hay que tener dentro de las consideraciones iniciales la temperatura media de película para las propiedades iniciales del proceso.

El número de Reynolds es un factor que permite la caracterización del movimiento del fluido, determinando a partir de este, si el flujo del fluido es turbulento o laminar. Por eso se debe calcular utilizando la respectiva correlación (12).

Para el cálculo del número de Nusselt existen correlaciones empíricas que permiten obtener condiciones promedio globales, de gran interés en estudio de ingeniería. Una de las más generales y de mayor extensión, que cubre además todo el rango de es la propuesta por Churchill y Bernstein.

Esta ecuación es adecuada siempre y cuando cumpla la relación

La cual es aplicable en este caso y que tiene la forma siguiente:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \left(1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right)^{4/5}$$

Donde todas las propiedades deben evaluarse a la temperatura de película.

La aplicación de este tipo de correlación para hallar el número de Nusselt no es la única existente y mucho menos de exactitud inigualable, pero abarca mayor rango de condiciones, por lo cual es recomendable su aplicación para este caso.

Al igual que para el caso de placas planas el factor  $\bar{h}$  dependen del número de Nusselt y puede hallarse de manera sencilla con la ecuación:

$$h = \frac{Nuk}{D}$$

Tomando el valor de D como el diámetro del cilindro.

Concepto o Definición de la Resistencia Térmica

Es una medida de la resistencia con que se opone un material (facilidad o no) a ser atravesado por el calor, por ejemplo, en una pared de una vivienda.

La resistencia térmica determina la propiedad de aislamiento térmico de un material.

Pero realmente el concepto y su medida se utiliza para analizar algunos problemas de transferencia de calor utilizando una analogía eléctrica y de esta forma conseguir que los sistemas complicados sean más fáciles de visualizar y analizar.

Si una resistencia eléctrica está relacionada con la conducción de electricidad, la resistencia térmica está relacionada con la conducción de calor.

Mucha Resistencia Eléctrica = Material Poco Conductor de la Electricidad o incluso Aislante Eléctrico.

Mucha Resistencia Térmica = Material Poco Conductor del Calor o incluso Aislante Térmico.

Los técnicos o ingenieros usan la resistencia térmica para calcular la transferencia de calor a través de los materiales.

Una capa de construcción con una alta resistencia térmica (por ejemplo, lana de roca) es un buen aislante; uno con una resistencia térmica baja (por ejemplo, de hormigón) es un mal aislante.

La resistencia térmica es inversa de la conductividad térmica.

Un material que tiene una alta conductividad térmica significa que es muy buen conductor del calor, a la inversa que si tiene mucha resistencia térmica, que significaría que es mal conductor del calor.

¿Cómo se Calcula?

Se basa en una analogía con la ley de Ohm que es:

$$R = V / I$$

Donde "V" es el voltaje o tensión que impulsa una corriente de magnitud "I" por un material que tiene una resistencia eléctrica "R".

La cantidad de corriente (I) que fluye para un voltaje (V) determinado es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (R) del circuito por el que fluye la corriente.

$I = V / R$  (es la misma fórmula de arriba expresada de otra manera)

Para un conductor eléctrico, la resistencia depende de las propiedades del material y de su tamaño.

Por ejemplo, el cobre tiene una resistencia eléctrica menor que la madera y los conductores cortos y gruesos tienen menos resistencia que los largos y delgados (ver Resistencia Eléctrica).

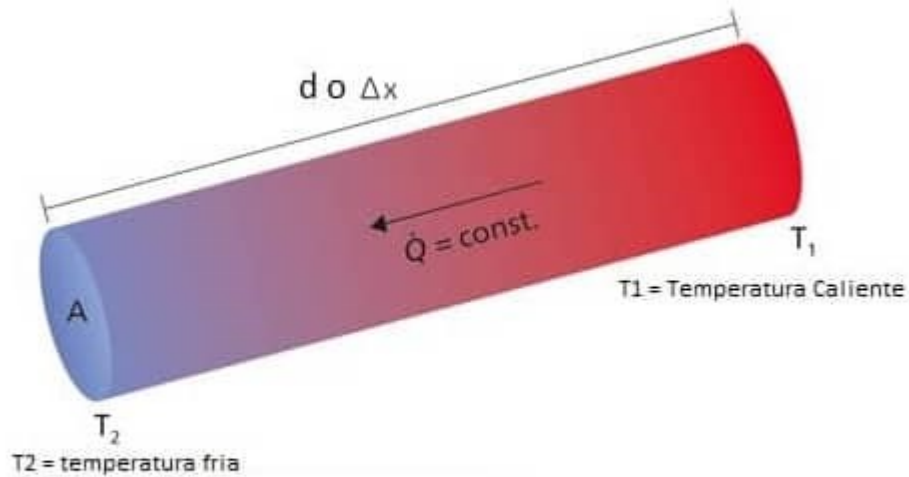
De la misma forma si aumentamos el grosor del material disminuye su resistencia térmica y si aumentamos su longitud aumenta su resistencia térmica.

Luego veremos esto con más detalle.

Para problemas de transferencia de calor en una dimensión en estado estable y sin generación de calor interno, el flujo de calor es proporcional a una diferencia de temperatura de acuerdo con esta ecuación:



## Flujo de Calor por un Cuerpo



$$Q = k * A * \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$Q$  = es la cantidad de calor transferido a través del material en julios / segundo o vatios (W)

$K$  o  $\lambda$  = Conductividad Térmica

$d$  o  $\Delta x$  = es la distancia entre los dos planos del material (las dos caras)

$A$  = es el área de la superficie de material en metros cuadrados

$\Delta T$  = Diferencia entre las temperatura en las dos caras del material (Temperatura del lado más caliente menos la del lado más frío ( $T_{\text{calor}} - T_{\text{frío}}$ ))

Figura 8. Flujo de calor por un cuerpo. Fuente: (AreaCiencias, 2021, s.f.)

## **6. Diseño metodológico**

### *Descripción general del módulo*

El módulo de conducción ha sido diseñado para demostrar los principios de transmisión de calor por conducción, permitiendo el estudio de la conducción lineal.

El módulo está provisto de una barra metálica cilíndrica para la realización de una serie de experimentos de transmisión lineal de calor. El modelo posee una serie de tomas para la conexión de una serie de sensores de temperatura incluidos con el equipo. Para mantener el gradiente de temperatura constante, en un lateral de los modelos, se ha insertado un sistema de refrigeración por circulación de agua.

La instrumentación provista con la unidad permite realizar la medición de la temperatura y la potencia eléctrica entregada al elemento calefactor. Para el control de la energía entregada cuenta con un circuito de control que permite la variación de 0 a 100% de la potencia máxima de resistencia.

El grupo experimental lineal se entrega con una interfaz que permite demostrar los efectos de área, la conductividad en el proceso de transmisión de calor.

El banco cuenta con un sistema hidráulico manual en el cual consta de tubería, motobomba y válvula manual.

Este equipo tiene un panel dónde se tiene unas perillas, para aumentar la temperatura, un par de display para poder leer la lectura de los sensores y la entrada de las termocuplas.

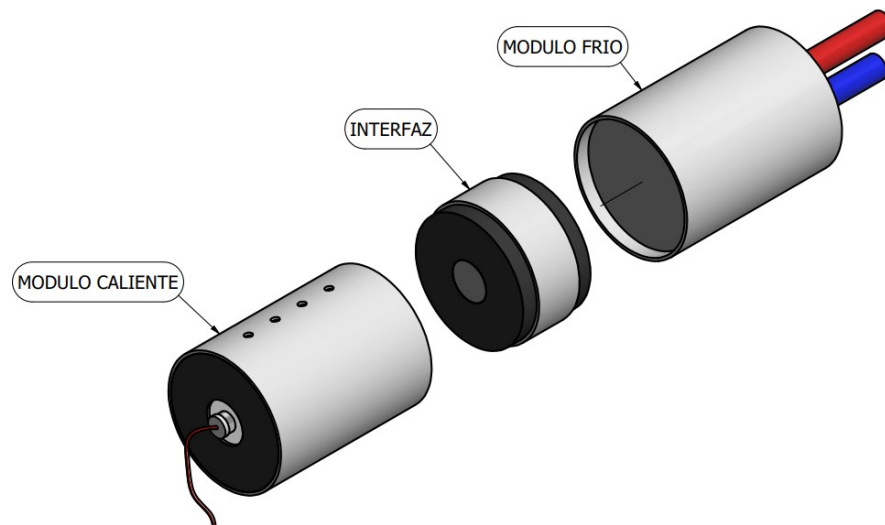
## 7. Diseño del módulo

Existen diferentes y tan variados prototipos de bancos de pruebas como proveedores y propuestas del mercado existen, sin embargo, se clasificó algunos en contexto de este estudio, de esa manera se tiene:

- El Módulo de Transferencia de Calor de Tres Ejes, de sobremesa ha sido diseñado para desarrollar prácticas y ejercicios de transferencia de calor estudiando la dirección en los tres ejes.
- Módulo de transferencia de calor por radiación, es un equipo de sobremesa para el estudio de los principios de conducción radial de calor y para permitir la medida de la conductividad en un disco macizo de latón.
- Módulo de transferencia de calor en estado no estacionario, es un equipo de sobremesa diseñado para desarrollar prácticas y ejercicios de transferencia de calor en estado no estacionario. Estudia la conducción transitoria con convección. Utilizando formas distintas (planchas rectangulares, esferas y cilindros), de diferentes materiales, se puede predecir la temperatura de otras formas y materiales.
- Módulo de transferencia de calor en superficie extendida, es un equipo de sobremesa diseñado para demostrar los perfiles de temperatura y las características de la transferencia de calor en una superficie extendida. Estudia los efectos de añadir aletas a un cuerpo para extender su superficie para conseguir un cambio en el índice de enfriamiento. Se usan aletas de diferentes materiales y formas de sección transversal para analizar los efectos del enfriamiento.
- Módulo de conducción de calor lineal, es un equipo de sobremesa para el estudio de los principios de conducción lineal de calor y para permitir la medida de la conductividad de diferentes conductores y aislantes sólidos.

Para el análisis ingenieril del conjunto, se realiza un diseño conceptual de cada sistema, el cual se muestra en la figura 1. El módulo caliente contiene una resistencia eléctrica, la cual ingresa calor al sistema. Por otra parte, el módulo frío posee un flujo de agua a temperatura ambiente, de modo que su objetivo es mantener una temperatura constante. La interfaz se posiciona entre los dos módulos mencionados anteriormente, y debido al gradiente de

temperatura entre ambos módulos, se genera un flujo de calor que dependerá, entre diferentes factores, del material, área transversal y espesor del material a evaluar.



*Figura 9. Esquema general de los subsistemas y conjuntos de la sección de transferencia de temperatura. Fuente: Propia.*

El módulo frío debe ir fijo a la estructura, mientras que el módulo caliente debe tener un grado de libertad en dirección longitudinal, de modo que permita que la interfaz embone entre el módulo frío y el módulo caliente. La interfaz posee un núcleo el cual se encargará de realizar la transferencia de calor entre los dos módulos, dicho núcleo puede variar según los requerimientos del experimento.

Consideraciones de diseño generales:

- Expresar la conducción por medio de pared plana
- El diseño debe ser modular
- Para resistencia de 150W y temperatura máxima de 150°C
- El banco de laboratorio está conformado por 3 subsistemas:
  - Modulo caliente
  - Modulo frio
  - Interfaz
  - Control
  - Sistema de potencia

### *Modulo caliente*

#### *Descripción general: diseño del elemento térmico y cálculo*

Para servir de elemento térmico, la cinta o alambre deben resistir el flujo de electricidad. Esta resistencia convierte la energía eléctrica en calor, el cual va asociado a la resistencia eléctrica del metal y se define como la resistencia de una unidad de longitud de la unidad de área transversal. La resistencia lineal de una longitud de cinta o alambre se puede calcular a partir de su resistencia eléctrica.

Donde:

$\rho$	resistencia eléctrica (microhm.cm)
R	resistencia del elemento a 20 °C (ohms)
d	diámetro del alambre (mm)
t	espesor de la cinta (mm)
b	anchura de la cinta (mm)
l	longitud del cable o la cinta (m)
a	área transversal del cable o la cinta (mm <sup>2</sup> )

Tabla 2. Parámetros de diseño de resistencia eléctrica calefactora. Fuente: Propia.

En el caso de alambre semicircular:

$$a = \frac{\pi d^2}{4}$$

En el caso de cinta

$$a = t(b - t) + (0,786t^2)$$

$$R = \frac{\rho l}{a} 0,01(\text{ohms})$$

Como elemento térmico, la cinta proporciona una gran área de superficie y, por tanto, una mayor eficacia de la radiación térmica en una dirección determinada, lo que la hace idónea para muchas aplicaciones industriales como los calentadores de banda de molde de inyección.

Una característica importante de estas aleaciones de resistencia eléctrica es su resistencia al calor y a la corrosión debidas a la formación de capas superficiales de óxido que retrasan las reacciones adicionales con el oxígeno del aire. En el momento de la selección de la aleación, se deben tener en cuenta la temperatura operativa, el material y la atmósfera con la que vaya a estar en contacto. Dado el gran número de tipos de aplicaciones, los diversos diseños del elemento y las diferentes condiciones operativas, las siguientes ecuaciones para el diseño del elemento se indican solo a título orientativo.

#### Resistencia eléctrica a temperatura operativa

Salvo en muy pocas excepciones, la resistencia de un metal cambia con la temperatura, algo que debe tenerse en cuenta en el diseño del elemento. Puesto que la resistencia de un elemento se calcula a la temperatura operativa, hay que hallar la resistencia del elemento a temperatura ambiente. Para obtener la resistencia de los elementos a temperatura ambiente, divida la resistencia a temperatura operativa por el factor de resistencia a la temperatura que se muestra a continuación:

$$R = \frac{R_t}{F} (\text{ohms})$$

Donde:

F = factor temperatura-resistencia

R<sub>t</sub> = resistencia del elemento a temperatura operativa (Ohms)

R = resistencia del elemento a 20°C (Ohms)

De esa manera y teniendo en cuenta los valores comerciales que existen se realiza el siguiente diseño, que cumple con el propósito de este estudio.

Teniendo en cuenta las condiciones de diseño, se requiere de una resistencia cuya potencia corresponde a 150 W. Para facilitar el montaje y la homogenización de la temperatura se utiliza una resistencia con funda metálica de diámetro 12mm, cuyo largo varía entre 100mm y 500mm. Considerando las dimensiones generales del banco, se opta por una resistencia de 100mm, figura 7 de referencia.



Figura 10. Resistencia eléctrica. Fuente: (S.R.L, 2023)

Para lograr una temperatura uniforme en todo el módulo caliente, se requiere de una camisa metálica. En la tabla 3 se muestra la conductividad de diferentes metales a temperatura ambiente 300K (27°C) y temperatura promedio de operación 400K (127°C), criterio que se utiliza para la selección de material.

<i><b>METAL</b></i>	<i>Punto de fusión [K]</i>	<i>Conductividad [W/m]</i>	
		300K	400K
<i>Aluminio</i>	933	237	240
<i>Aluminio AL 2024</i>	775	177	186

<i>Aluminio 195 FUN</i>	775	168	174
<i>Cobre</i>	1358	401	393
<i>Cobre AL bronce</i>	1293	52	52
<i>Cobre AL Latón</i>	1188	110	137
<i>Constantán</i>	1493	23	
<i>Oro</i>	1336	317	311
<i>Hierro</i>	1810	80,2	69,5
<i>Acero al carbón AISI 1010</i>	1910	63,9	58,7
<i>Acero inoxidable AISI 302</i>	1670	15,1	17,3
<i>Acero inoxidable AISI 304</i>	1670	14,9	16,6
<i>Platino</i>	2045	71,6	71,8
<i>Plata</i>	1235	429	425

Tabla 3. Propiedades térmicas de algunos materiales comunes en el mercado. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia.

En la Tabla 3 se evidencia que los materiales con mayor conductividad térmica son el Aluminio puro (240W/m @400K), el cobre (393W/m @400K) y el oro (311W/m @400K), sin embargo, teniendo en cuenta el costo de los materiales y su maquinabilidad, se escoge el ALUMINIO PURO o Aleado como material de la camisa.

La camisa tiene un diámetro interno de 12mm, y un diámetro externo de 50mm, con un largo de 100mm, además, posee perforaciones transversales para la inserción de las termocuplas. Para el montaje de las termocuplas, es importante tener en cuenta que las resistencias poseen una zona inactiva, como se muestra en la Figura 7.



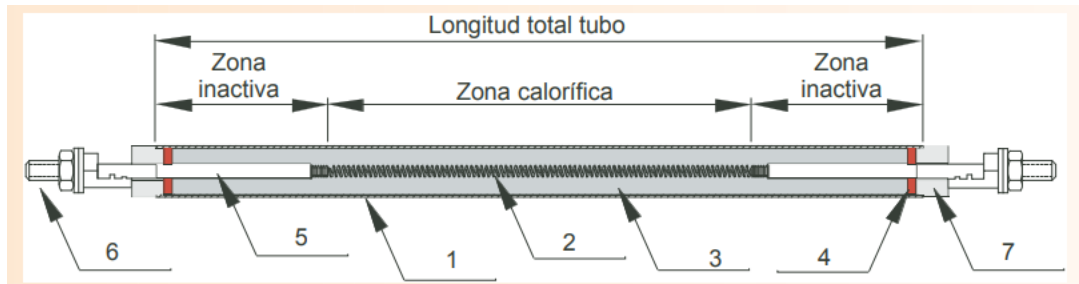


Figura 11.. Configuración y diagramación de una resistencia eléctrica. Fuente: (synheat, 2023).

Exterior a la camisa, se debe instalar un aislante térmico que reduzca las pérdidas de calor, en la Tabla 4 se muestran las propiedades térmicas de algunos materiales aislantes.

<i>MATERIAL</i>	<i>Densidad</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Conductividad</i> [W/m]
<i>Fibra de vidrio</i>	220	0,04
<i>Poliestireno expandido</i>	16	0,04
<i>Caucho expandido</i>	72	0,032
<i>Corcho</i>	120	0,039
<i>Baquelita</i>	1270	0,24
<i>Caucho silicona</i>	1100	0,24
<i>Caucho neopreno</i>	1300	0,23

Tabla 4. Propiedades térmicas de algunos materiales comerciales. Fuente: (Cengel, Boles, & Kanoglu, 2019). Elaboración: Propia.

Para la selección del material de la capa de aislante, es importante tener en cuenta que la temperatura que debe soportar es aproximadamente 150°C. Sería de intuición seleccionar materiales cuya conductividad es 0,04 W/m, sin embargo, dicho grupo está formado por materiales que no soportan temperaturas mayores a 100°C, exceptuando la fibra de vidrio.

Este material es un candidato para esta aplicación, sin embargo, se debe tener en cuenta que es un material abrasivo y de difícil manipulación y conformado en forma de cilindro. El otro candidato para dicha aplicación es el caucho de silicona, por su facilidad para el conformado en forma de cilindro, ya que este material es vertido en un molde, además ser un material comercial. Para la selección del material es necesario un cálculo de transferencia de calor, el cual se muestra a continuación. Es importante tener en cuenta que la temperatura de la cubierta del módulo caliente no debe superar los 60°C para evitar quemaduras en los operarios durante su manipulación.

Los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado. La resistencia al impacto de los plásticos ABS se ve incrementada al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno, pero disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y disminuye la temperatura de deformación por calor.

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
<b>Propiedades físicas</b>			
Densidad (método A)	1.05	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Módulo elástico en tensión	1900	MPa	ISO 527
Resistencia a la Flexión	55	MPa	ISO 178
Bola de dureza de indentación	77	MPa	ISO 2039
Resistencia tracción al límite elástico	33	MPa	ISO 527
<b>Propiedades térmicas</b>			
Temperatura de reblandecimiento VICAT	97	°C	ISO 308
Temperatura de deflexión al calor	86	°C	ISO 75
Inflamabilidad 1,6 mm	HB	-	UL 94

Tabla 5. Destalles de ABS. Fuente: (Tecnico, 2023)

Como material para la carcasa se propone plástico ABS o acero calibre 14.

### *Calculo transferencia de calor*

La sección transversal del módulo caliente se muestra en la figura 9, con sus medidas correspondientes. El sistema se entiende como un modelo de transferencia de calor para un cilindro horizontal. Existen dos flujos de calor significativos en el sistema, el flujo de calor que se presenta en el sistema ocurre debido a la diferencia de temperatura entre la resistencia (150°C máx.) y el material de prueba, y el flujo generado por las pérdidas por diferencia de

temperatura entre la resistencia y el ambiente. Inicialmente, se realiza el cálculo de flujo de calor con el ambiente.

La resistencia eléctrica tiene unas características determinadas por el fabricante así:

- Resistencia eléctrica tubular.
- Resistencia de repuesto para selladoras de bolsas plásticas y otros usos.
- Medida: 55 cms (22 pulgadas).
- Diámetro: 1/2 pulgada, 12,5 mm.
- Con terminales listos para instalar.
- También para otros usos.
- Voltaje: 110 voltios.

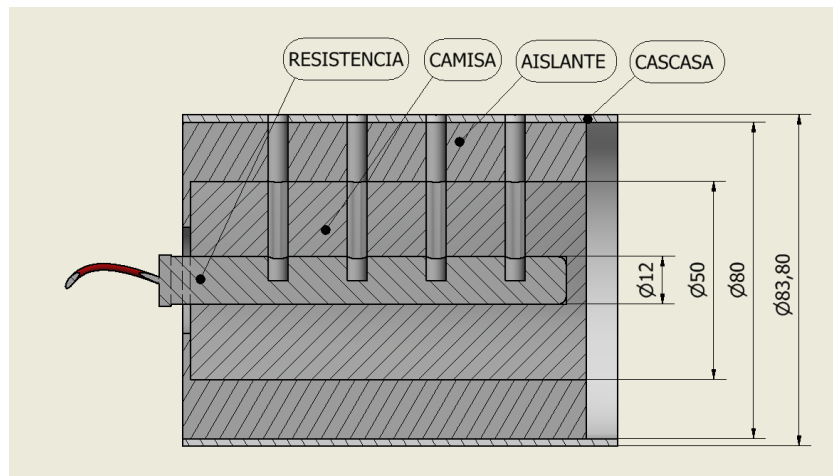


Figura 12. Sección transversal del módulo caliente. Fuente: Propia.

El flujo generado por las pérdidas se analiza suponiendo la temperatura ambiente estándar (25°C) y con la temperatura set de la resistencia eléctrica.

$$Q_{perdidas} = \frac{T_{set} - T_{ambiente}}{R_{total}}$$

La resistencia al calor total  $R_{total}$  se considera como la resistencia al calor en conjunto de las capas de materiales entre la resistencia y la carcasa y la resistencia por convección con el ambiente, de modo que:

$$R_{total} = R_{camisa} + R_{aislante} + R_{carcasa} + R_{conv}$$

### Resistencias por conducción

La resistencia para un sistema de capas cilíndricas es:

$$R_x = \frac{\ln\left(\frac{R_i}{R_o}\right)}{2\pi * L * K_x}$$

Analizando para cada caso:

Camisa

$$R_{camisa} = \frac{\ln\left(\frac{0.05}{0.012}\right)}{2\pi * 0.1 * k_{mat}}$$

La conductividad  $k_{mat}$  depende del material, inicialmente se propuso aluminio, y según la Tabla 1 es 240 W/m.

$$R_{camisa} = \frac{\ln\left(\frac{0.025}{0.006}\right)}{2\pi * 0.1 * 240}$$

Aislante

$$R_{camisa} = \frac{\ln\left(\frac{R_{ext:aislan}}{0.025}\right)}{2\pi * 0.1 * k_{aisl}}$$

En este caso, los valores del radio exterior del aislante  $R_{(ext:aislan)}$  y la conductividad térmica del material  $k_{aisl}$  se variarán según las opciones de diseño. Los resultados se muestran en el apartado después del final del procedimiento.

*Carcasa*

$$R_{carcasa} = \frac{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{ext:aislan}}\right)}{2\pi * L * K_{carcasa}}$$

Los valores del radio exterior  $R_{ext}$  y la conductividad del material de la carcasa también se dejan expresados como variable, ya que depende de la opción de diseño.

El calor que pasa por cada capa del material es el mismo en todo el sistema, es decir que el calor es equivalente según sus fronteras. Se debe conocer la temperatura de la carcasa, ya que esta no debe superar los 60°C.

$$Q_{perdidas} = \frac{T_{set} - T_{carcasa}}{R_{total}}$$

#### *Convección con el ambiente*

Finalmente, se tiene en cuenta el calor por convección en el exterior del cilindro, este corresponde a un modelo que se describe con la siguiente formula:

$$R_{atm} = \frac{1}{A * h_{atm}}$$

En este caso el área expuesta  $A$  depende del radio exterior de la carcasa y el coeficiente convectivo  $h_{atm}$  de las propiedades del aire y la temperatura exterior de la carcasa. Inicialmente se calcula el número de Nusselt, número Prandl y el número de Rayleigh, los cuales se definen de las siguientes maneras:

$$Nu = \frac{h L_c}{k}$$

$$Nu = 0,1 * Ra_L^{\frac{1}{3}}$$

$$D = 35 * \frac{L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}}$$

$$Gr_L = \frac{g * \beta(T_{carcasa} - T_{amb}) * L_c^3}{\nu^3}$$

$$Ra_L = Gr_L * Pr_L$$

Los conductores térmicos más excepcionales son los metales debido a su disposición electrónica interna. Estos iones vibran constantemente, lo que genera calor. La estructura molecular de los metales también incluye electrones libres. Estos electrones deslocalizados transportan grandes cantidades de energía a medida que se mueven a través de la red. A medida que estos electrones colisionan con la red troncada, excitan la estructura iónica y hacen que vibre más rápidamente. El aumento de la vibración de la red comienza a generar más calor. Debido al movimiento de los electrones libres presentes en el metal, el calor generado por la vibración iónica puede transferirse a través de la sustancia de manera más eficiente.

<b>Material</b>	<b>K</b>	<b>Material</b>	<b>κ</b>	<b>Material</b>	<b>κ</b>
<u>Acero</u>	47-58	<u>Corcho</u>	0,03-0,04	<u>Mercurio</u>	83,7
<u>Agua</u>	0,58	<u>Estaño</u>	64,0	<u>Mica</u>	0,35
<u>Aire</u>	0,02	<u>Fibra de vidrio</u>	0,03-0,07	<u>Níquel</u>	52,3
<u>Alcohol</u>	0,16	<u>Glicerina</u>	0,29	<u>Oro</u>	308,2
<u>Alpaca</u>	29,1	<u>Hierro</u>	80,2	<u>Parafina</u>	0,21
<u>Aluminio</u>	237	<u>Ladrillo</u>	0,80	<u>Plata</u>	406,1-418,7
<u>Amianto</u>	0,04	<u>Ladrillo refractario</u>	0,47-1,05	<u>Plomo</u>	35,0
<u>Bronce</u>	116-186	<u>Latón</u>	81-116	<u>Vidrio</u>	0,6-1,0

<u>Zinc</u>	106-140	<u>Litio</u>	78,38	<u>Cobre</u>	372,1-385,2
<u>Madera</u>	0,13	<u>Tierra húmeda</u>	0,8	<u>Diamante</u>	2300

Tabla 6. Conductividades térmicas de diversos materiales en W/(K·m). Fuente: Propia.

El aluminio posee una conductividad térmica muy elevada de 205 W/(m/K), que explica su capacidad para calentar los alimentos de manera rápida y uniforme.

Inicialmente se propone el caso 1: Aluminio como material para la camisa, caucho silicona como aislante térmico, y acero al carbón calibre 14 para la carcasa. En la tabla 5 se muestran las condiciones de entrada propuestas y en la Tabla 6 los resultados de temperatura obtenida por la iteración.

*Variable Propuesto Observaciones*

$T_{set}$	150 [°C]	Temp. Max resistencia
$T_{amb}$	25 [°C]	Temp Ambiente
$k_{camisa}$	240 [W/m]	Conductividad Aluminio
$k_{aisl}$	0,24 [W/m]	Conductividad Caucho Silicona
$k_{carcasa}$	63,9 [W/m]	Conductividad de Acero al carbón

Tabla 7. Condiciones de entrada propuestas. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia.

*Variable Resultado*

$T_{carcasa}$	52 [°C]
---------------	---------

$T_{ext:camisa}$	148 [°C]
$T_{ext:aisl}$	49 [°C]

Tabla 8. Resultados obtenidos. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia

*Variable Propuesto Observaciones*

$T_{set}$	150 [°C]	Temp. Max resistencia
$T_{amb}$	25 [°C]	Temp Ambiente
$k_{camisa}$	63,9 [W/m]	Conductividad Acero al carbón
$k_{aisl}$	0,24 [W/m]	Conductividad Caucho Silicona
$k_{carcasa}$	63,9 [W/m]	Conductividad de Acero al carbón

Tabla 9. Condiciones de entrada propuestas. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia

*Variable Resultado*

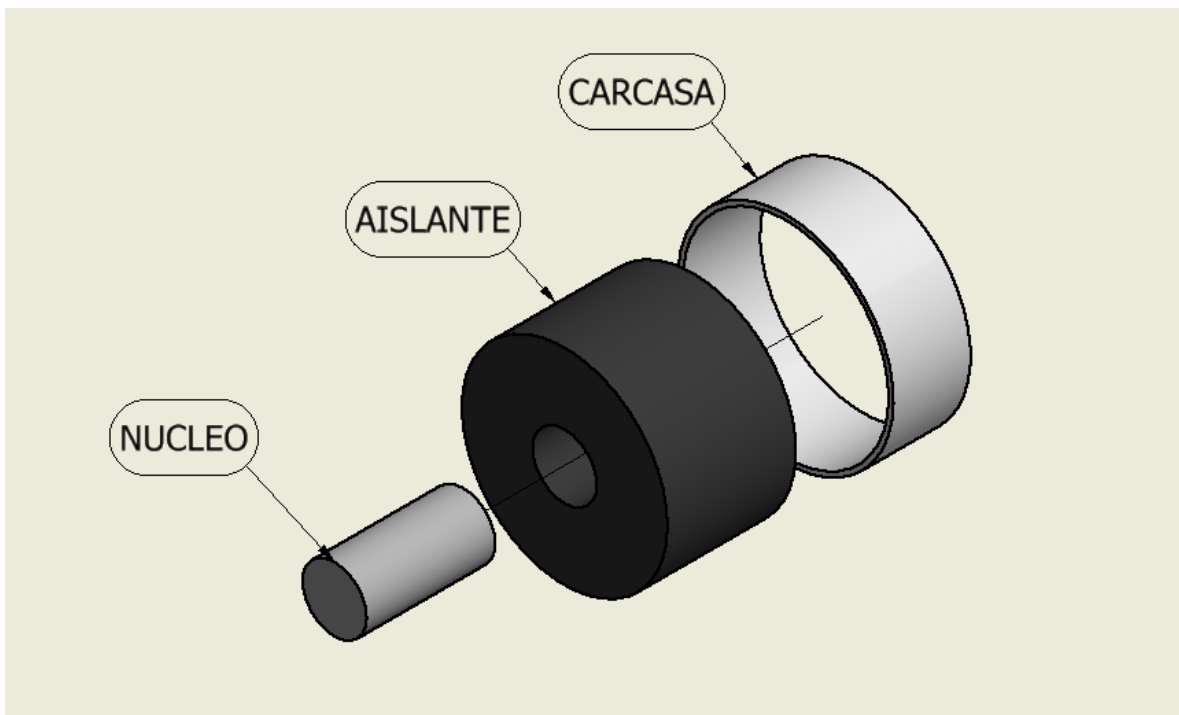
$T_{carcasa}$	43 [°C]
$T_{ext:camisa}$	136 [°C]
$T_{ext:aisl}$	44 [°C]

Tabla 10. Resultados obtenidos. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011). Elaboración: Propia  
Aunque la temperatura exterior de la carcasa es menor, la camisa tiene un gradiente de temperatura bastante grande, de modo que no es tan practico.



### *Interfaz:*

Este elemento NO tiene un diseño fijo, ya que este varía según el tipo de prueba, y condiciones que se deseen generar en el laboratorio. Es el encargado de mostrar las propiedades térmicas de diferentes materiales objetivo general de este banco de laboratorio. Sin embargo, se propone un diseño genérico, el cual se muestra en la Figura 5, el cual consiste en un núcleo que cambiara en dimensión y material, y esta recubierto de un aislante térmico, en este caso, caucho silicona. El caucho silicona a su vez, posee una carcasa con las dimensiones iguales a los otros dos módulos, y se propone una lamina de acero calibre 14.



*Figura 13. Interfaz de prueba. Fuente: Propia.*

Para realizar los cálculos correspondientes del sistema, es importante entender el fenómeno térmico que se produce en este elemento. La interfaz es contigua al módulo caliente por un extremo, y al módulo frío en el otro. Las condiciones de trabajo implican que la temperatura máxima del módulo caliente sea 150 °C, y en el módulo frío temperatura ambiente estándar de 25°C y estos elementos estén en contacto directo entre sí, se aconseja utilizar una pasta térmica, con la intención de eliminar burbujas de aire que se pueden generar por las imperfecciones de manufactura entre dos superficies y permiten aumentar el área de contacto

entre las superficies, como se muestra en la figura 11 Las pastas térmicas son económicas y fáciles de encontrar en el comercio, su utilidad principal es mejorar la transferencia de calor entre un procesador o CPU y su base disipadora. Es importante tener en cuenta que se debe aplicar una capa muy fina de la misma, ya que la conductividad térmica de las pastas térmicas genéricas tan solo es de 8 W/mK y en caso de pastas térmicas de metal liquido apenas superan los 70 W/mK.

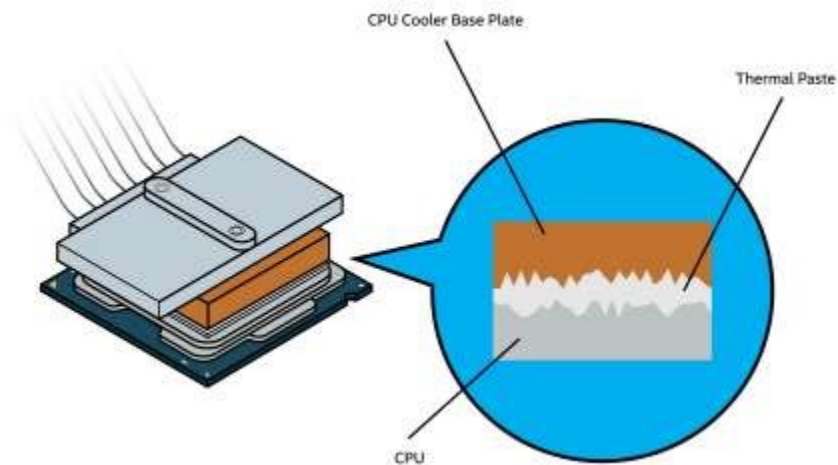


Figura 14. Diagrama del efecto en la implementación de pasta térmica. Fuente: (intel, 2013)

Teniendo en cuenta que las superficies están totalmente juntas, el fenómeno de transporte para la transferencia de calor en este caso es la conducción, dicho flujo de calor se expresa usando la Ley de Fourier de la conducción de calor de forma unidimensional, que se presenta como:

$$Q_{con} = -kA \frac{dT}{dx}$$

$k$ : conductividad del material

$A$ : Area de contacto

$\frac{dT}{dx}$ : Gradiente de temperatura

Dicha ecuación se puede representar en la gráfica mostrada en la figura 7.

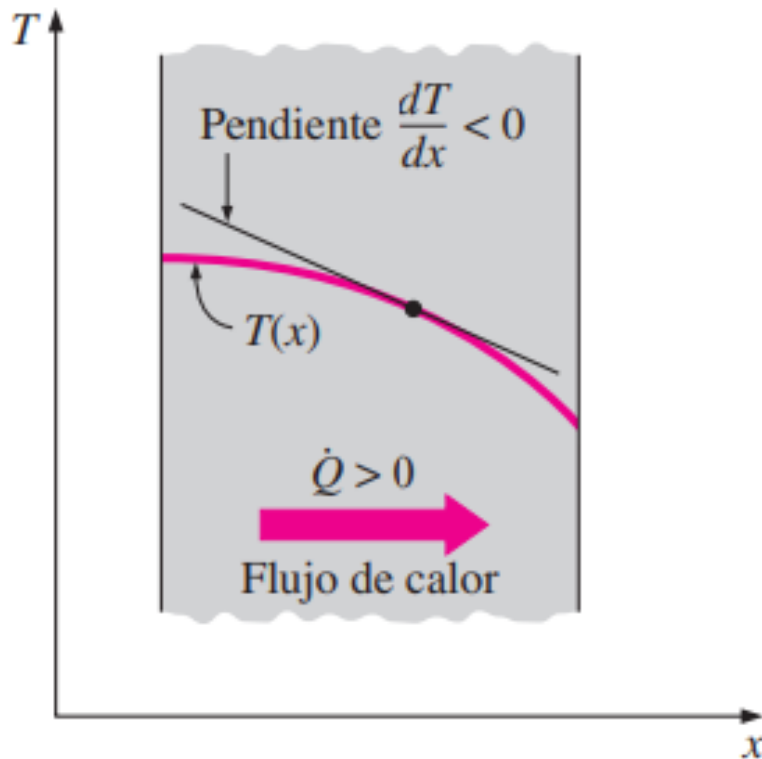


Figura 15. Ley de Fourier de la conducción de calor. Fuente: (Mendoza, 2020)

Teniendo en cuenta las variables en la ecuación, es evidente que para las condiciones críticas de operación, donde el flujo de calor es máximo, es cuando la conductividad es alta, el área de contacto es grande, y el gradiente de temperatura es el máximo posible.

Se propone una interfaz que cumpla con estas condiciones críticas, se utiliza un núcleo de aluminio de 2", cuya sección transversal se muestra en la figura 8 como condiciones de frontera de la interfaz, se supone una temperatura de pared en el módulo caliente de 150°C y una temperatura de pared en el módulo frío de 25 °C. Y se procede a analizar el sistema.

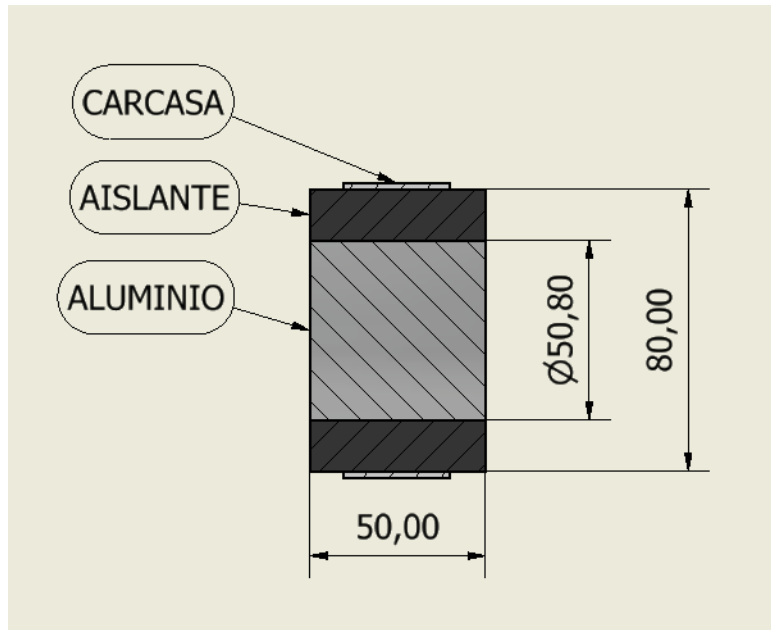


Figura 16. Vista de la sección transversal Interfaz. Fuente: Propia.

La conductividad del aluminio según la tabla 3 es de 240 W/mK @ 400K, el cálculo del área, teniendo en cuenta que el diámetro es 2 pulgadas (50.8 mm) se expresa como:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\Delta T = T_{hot} - T_{cold} = 150 - 25 = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El diferencial de posición  $\Delta x$  para el caso propuesto es de 50 mm, sin embargo, se realiza el cálculo para diferentes distancias, variando esta desde los 20 mm hasta los 80 mm, con el fin de ver el comportamiento del flujo de calor según la distancia. Los resultados se tabulan y grafican como se muestra en la figura 14.

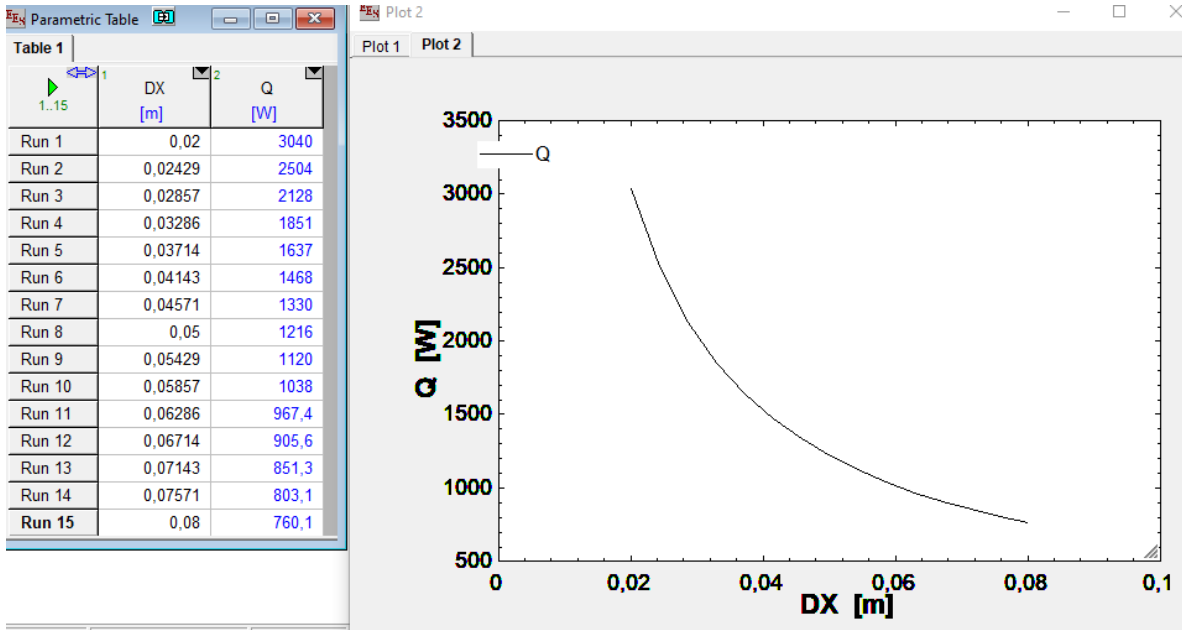


Figura 17. Resultados de iteración del gradiente de temperatura. Fuente: Propia.

Basado en la simulación anterior, se obtiene el comportamiento de estudio con la siguiente ecuación:

$$Q = 60,93Dx^{-1}$$

De esa manera teniendo la gráfica y la ecuación, se obtiene, que el flujo de calor para esta configuración es de 1216 W @ 50mm, sin embargo, para mantener un factor de seguridad se utiliza el máximo de 3040 W @ 20mm. Este flujo corresponde únicamente al generado por la diferencia de temperatura entre las dos paredes de frontera, se debe agregar el flujo de calor generado por la resistencia de 150 W que mantiene la temperatura de 150°C, entonces, los cálculos de disipación de energía en el módulo frieron, se realizan con la suma de ambos resultados, es decir 3190W @ 20mm.

Para mantener la temperatura de 25°C en el módulo frio, se utiliza refrigeración por agua, en caso de ausencia de este sistema, se podría calcular la temperatura de pared de la interfaz. Esta suposición puede ser de utilidad para calcular la temperatura máxima suponiendo ausencia de calor en el extremo frio. Para este cálculo se utiliza el flujo de calor de la resistencia de 150 W, y nuevamente, se itera para diferentes valores de Δx [20-80]mm. Estos

resultados se muestran en la figura 10, donde se evidencia que la gráfica tiene un comportamiento similar a la teoría mostrada en la figura 7.

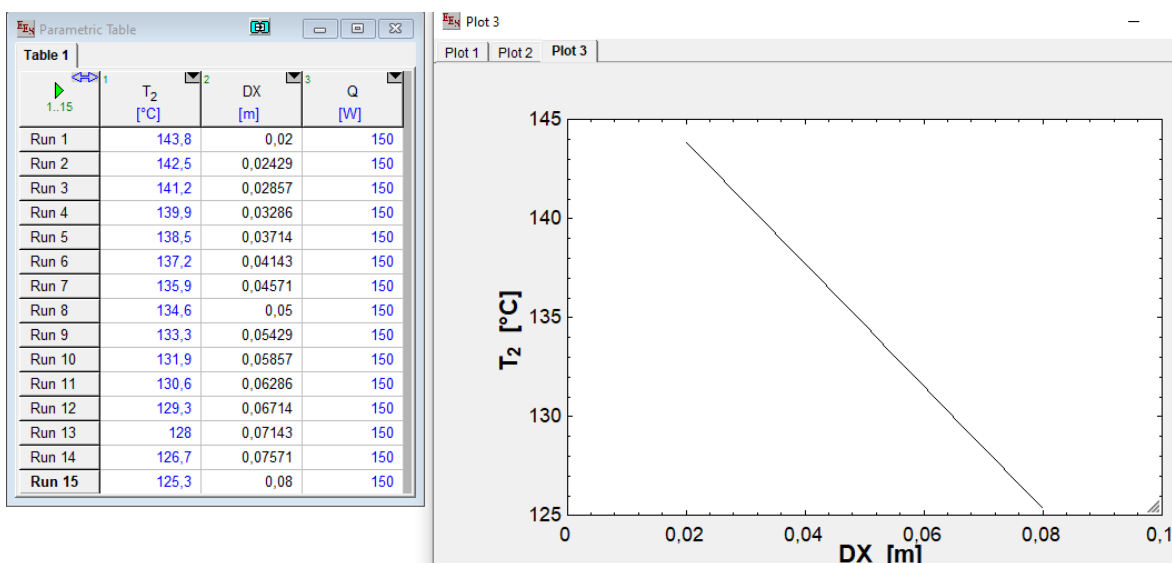


Figura 18. Resultados de iteración del gradiente de temperatura con los módulos de calor y frío. Fuente: Propia.

También es importante tener en cuenta, que debido a que el flujo de calor es considerablemente mayor que la capacidad de la resistencia, el módulo caliente tiende a perder temperatura fácilmente, por lo cual no se recomienda usar esta configuración por lapsos de tiempos prolongados. El largo de la interfaz se mantiene en 50 mm, para un flujo de 1216 W, y tampoco se recomienda utilizar un largo menor a este. Se aclara que el flujo de calor es alto, ya que se analizan las condiciones críticas y no las condiciones normales de operación.

#### Módulo frío

En el apartado anterior se calculó el flujo de calor que pasara por la interfaz a evaluar, y se determinó que el módulo frío debe mantener una temperatura constante de 25°C y expulsar calor del sistema por medio de un flujo de agua. El calor para retirar para las condiciones críticas es de 3190W, de modo que analizando que el calor del agua es:

$$Q = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

Donde el calor específico del agua a presión constante es:

$$c_p = 4186 \frac{J}{kg^{\circ}C}$$

El sistema se supone a presión constante, más adelante, cuando se analice el diagrama hidráulico se confirmará dicha suposición. La temperatura inicial del agua se considera  $T_1 = 25^{\circ}C$ , por otra parte, la temperatura de salida del agua debe ser muy cercana a  $T_1$ . El calor para las condiciones críticas es de 3190W, entonces se reemplaza en la ecuación, de modo que:

$$3190 = \dot{m}(4186)(T_2 - 25)$$

Se realiza una iteración para calcular el flujo de agua que debe pasar por el sistema para lograr retirar ese calor, suponiendo un aumento de temperatura del agua entre 1 y 5 °C. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 16.

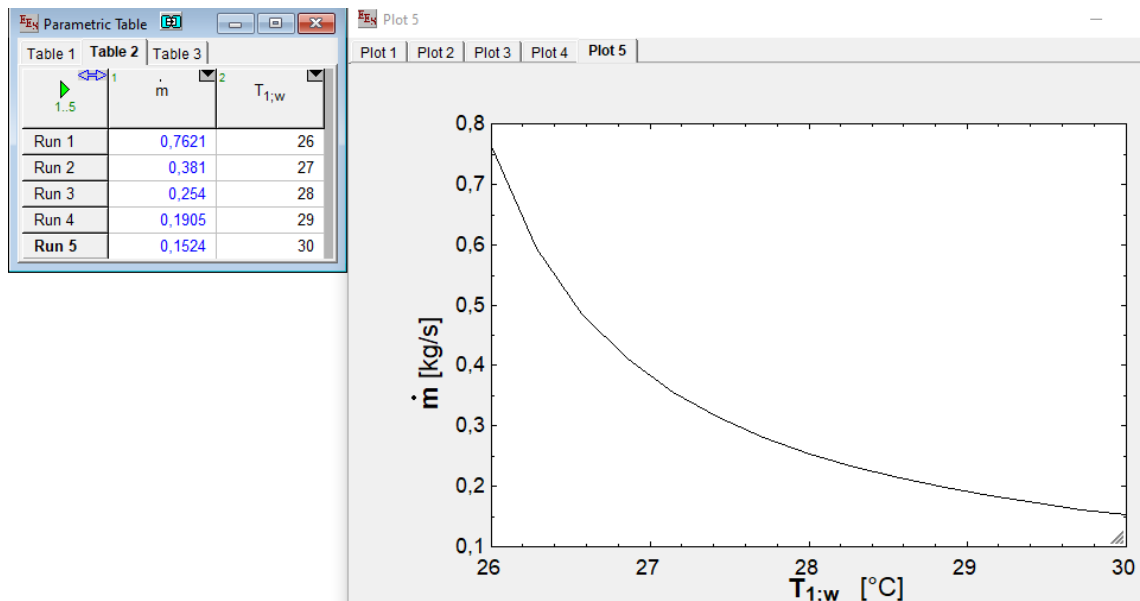


Figura 19. Resultados de la iteración del flujo del agua. Fuente: Propia.

Se observa que la gráfica tiene un comportamiento NO lineal, de modo que entre más cercana este la temperatura a los 25°C, más flujo de agua necesita. Se observa un punto de inflexión entre los 27 y 28 °C, entonces, se selecciona que la temperatura deseada de salida este alrededor de 27°C para condiciones máximas. Esto requiere un flujo de agua de 0,381 kg/s.

Convirtiendo este valor a flujo volumétrico, tenemos en cuenta la densidad del agua a dicha temperatura. La densidad del agua para una temperatura de 26°C (Promedio entre 25 y 27°C) es de 996.8 kg/m<sup>3</sup>, equivalente a 0.9968 L/kg, entonces, se calcula el flujo:

$$\dot{V} = \dot{m} * \rho$$

$$0.381 \frac{kg}{s} * 0.9968 \frac{L}{kg} = 0.3798 \frac{L}{s}$$

El sistema debe bombear un flujo volumétrico de 0,3798 L/s, se propone el siguiente circuito hidráulico mostrado en la Figura 12. Donde TK1 corresponde al tanque de almacenamiento, B1 a la bomba de propulsión, V1 a la válvula reguladora y TC1-2 a las termocuplas de cada circuito.

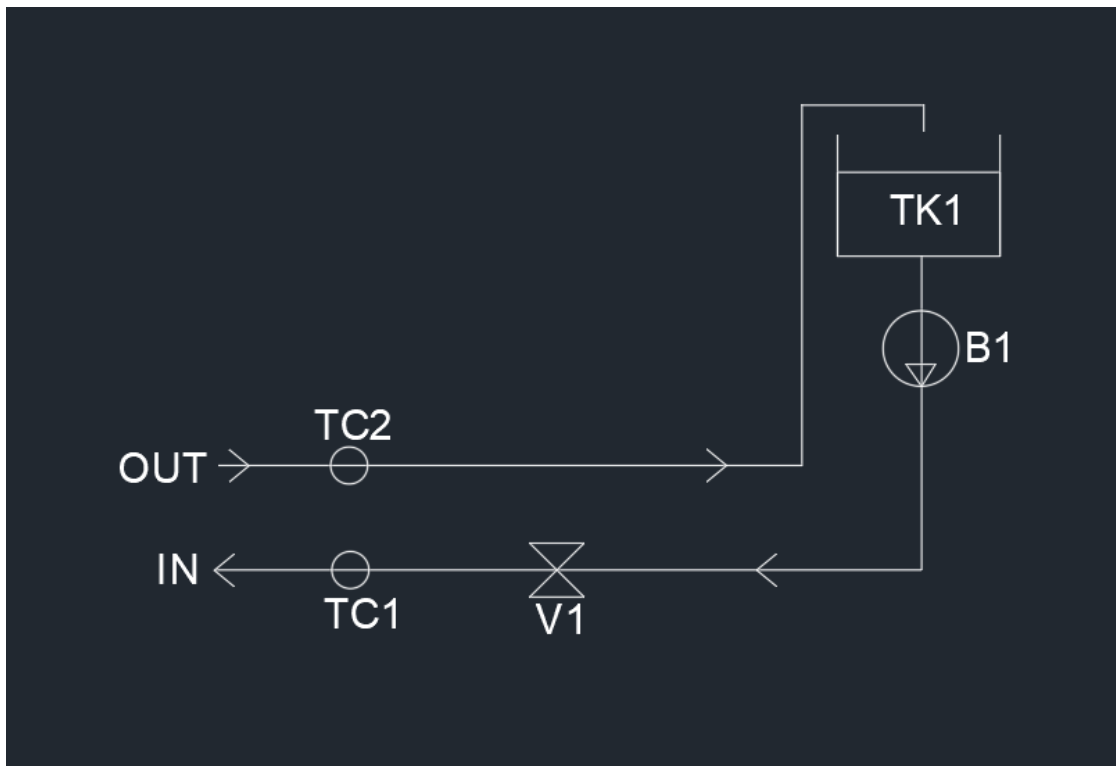


Figura 20. Circuito hidráulico implementado para el sistema de enfriamiento. Fuente: Propia.



Debido a la simplicidad del sistema, se utilizan mangueras para el transporte del fluido, en este caso se seleccionan mangueras de ½”, con un diámetro interno de 13mm y externo de 15mm. Calculando el área transversal de los ductos.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{13}{1000}\right)^2}{4} = 0.0001327 \text{ m}^2$$

Recordando que el flujo volumétrico se representa como:

$$\dot{V} = A * V$$

Donde el flujo volumétrico, en m<sup>3</sup>/s es:

$$\dot{V} = 0.3798 \frac{\text{L}}{\text{s}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} = 0.3798 \frac{\text{x}10^{-3}\text{m}^3}{\text{s}}$$

Despejando la ecuación, se encuentra que la velocidad es de:

$$V = 2.86 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Lo que no representa un valor significativo en las pérdidas de presión por fricción, además que no genera cavitación ni golpe de ariete en el sistema. Es aconsejable encontrar una bomba comercial, que genere un flujo de agua de 1L/s o 60L/min.

Finalmente, es importante aclarar el diseño conceptual del módulo frío, el cual se muestra en la Figura 13, el cual está conformado por un tubo de acero inoxidable de 2 ½” SH 40, recubierto por un aislante térmico que evita que el agua sufra un cambio de temperatura por condiciones en su entorno, y posteriormente por una carcasa.

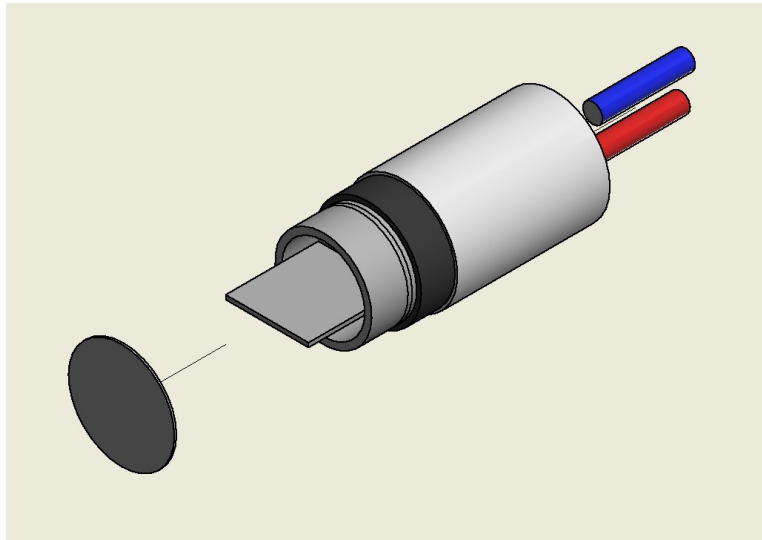


Figura 21. Esquema del módulo de enfriamiento por capas. Fuente: Propia.

Además, dentro del tubo se instala una separación horizontal, la cual obliga al fluido a pasar por la tapa exterior, en la Figura 14 se muestra la sección transversal del módulo frío, incluyendo el camino que toma el agua desde la entrada hasta su salida del módulo.

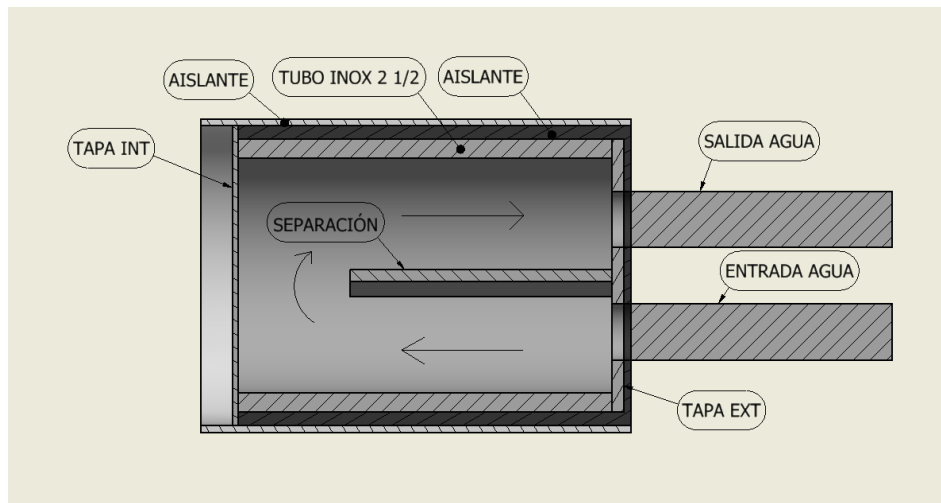


Figura 22. Vista de la sección transversal del módulo de enfriamiento. Fuente: Propia.

Para mantener estanqueidad en el sistema, se utiliza una tapa interior de acero al carbón con espesor de 1/16", se realizan cálculos de transferencia de calor para verificar que la diferencia de temperatura en este elemento no es significativa para el funcionamiento del equipo. Tomando la Ley de Fourier para la placa de acero:

$$Q_{con} = -kA \frac{dT}{dx}$$

*k*: conductividad del material

*A*: Area de contacto

$\frac{dT}{dx}$ : Gradiente de temperatura

Recordando que la temperatura interna debe ser de 25°C y el flujo de calor máximo es 3190W. La conductividad del acero es 63.9 W/mK, se obtiene la siguiente expresión.

$$Q = 63.9 * (0.002) \frac{dT}{1.8 \times 10^{-3}}$$

Donde se puede observar que el denominador en la fracción es pequeño, lo que evita un dT alto.

#### *Sistema de control*

El sistema de control consta de tres subsistemas:

- Sistema de tratamiento de las señales
- Tarjeta embebida de control
- Sistema de control de señales

Estos tres sistemas sirven para poder controlar los sistemas de transferencia de temperatura, los sistemas de las señales de sensado de temperatura y los sistemas de las señales hacia los actuadores.

#### *Sistema de tratamiento de las señales*

El banco de pruebas tiene dentro de sus funcionamientos el sensado de las señales que pertenecen a los módulos de calor y de enfriamiento, estos módulos generan un tipo de señal que debe ser tratada para poder ser llevada a la tarjeta de control. De esa manera se genera una señal AC y a esa señal se le debe tratar para lograr una señal DC, de manera que la tarjeta de control tome esa señal y según programación tome decisiones sobre la misma.

Para esto, se tiene el termopar tipo K, de manera que este sistema está distribuido como en la figura 9, tanto para el sistema de calor como el de enfriamiento tiene la misma configuración. Para la interfaz si se tiene de la siguiente manera:



*Figura 23. Configuración de los termopares en la interfaz. Fuente: (edibon, 2010)*

Dentro de este sistema se tiene el sensor termopar tipo K con el módulo MAX6675, que es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Existen varios tipos de termopares, el termopar tipo K (cromel/alumel) el cromel es una aleación de Ni-Cr, y el alumel es una aleación de Ni-Al.

## 8. Resultados y análisis de resultados

### *Resistencia eléctrica tubular*

La resistencia tubular o de cartucho está constituida por un alambre de níquel-cobre, este es enrollado en forma espiral sobre un cilindro cerámico, tiene una camisa de acero inoxidable externo que está aislado eléctricamente del alambre por medio de óxido de magnesio, el cual cuenta con una gran conductividad térmica. Las densidades de potencia de la resistencia están con un máximo de 150 W.

La temperatura ambiente requiere la mitad de la temperatura de trabajo del equipo 120°C (248°F), en general las resistencias utilizan camisas de acero inoxidable para trabajos máximos de 759°C (1400°F), existen otros tipos de materiales con mayor o menor capacidad de temperatura máxima, pero se utiliza este material debido a que es el más común encontrado en las resistencias. Se obtiene una densidad de potencia máxima de 36 W/in<sup>2</sup> (55800 W/m<sup>2</sup>), que la temperatura de trabajo sea mucho más baja que la máxima da un aumento en la vida útil de la resistencia.

Una vez obtenido el máximo de densidad de potencia se selecciona en catálogos la resistencia adecuada cercana a 150W y 36 W/in<sup>2</sup> (55800 W/m<sup>2</sup>), seleccionando una resistencia de 9 mm de diámetro con 33 mm de longitud, con una potencia de 150 W y 52053 W/m<sup>2</sup>.

Teniendo en cuenta los cálculos obtenidos en el diseño, las pruebas muestran una entrada de densidad de calor por la resistencia alrededor de 14000 W/m<sup>2</sup>, este valor en colocado en carga, de igual forma se observa en el módulo de enfriamiento que las cargas térmicas dependen del caudal y la temperatura de entrada y salida del ducto de enfriamiento, con una entrada de caudal de 0.381 m/s de velocidad y una temperatura inicial igual al ambiente de 17 °C para todas las partes del cuerpo.

El diferencial de temperatura obtenido es de 60 °C, demostrando que efectivamente se entrega 42,9 W a cada elemento dentro del volumen de control. Por otra parte se puede observar que la temperatura alcanzada por el agua es de 18°C, se estima que la causa es el

área de contacto y el coeficiente de convección, que no es suficiente para absorber toda la potencia, al tener 36.8W hay mayor cantidad de calor almacenado en el metal lo que significa que la unidad de enfriamiento tiene una eficiencia de 83%, reflejado en un aumento en las temperaturas finales.

Por otra parte, se pudo observar, que la temperatura de la resistencia es de 416 K (aproximadamente 142 °C), este valor puede ser más bajo si se hubiera tenido en cuenta la pérdida por el aislamiento, pero de igual forma está cercano al valor objetivo, esta temperatura se utiliza para el diseño del aislamiento térmico.

Las temperaturas registradas demuestran el comportamiento lineal en estado estacionario, cumpliendo con el objetivo primordial del equipo.

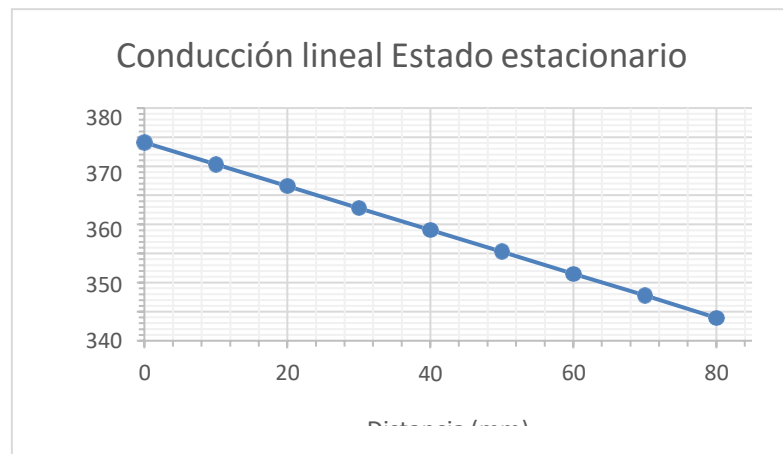


Figura 24. Demostración de comportamiento lineal de equipo de conducción lineal.

Fuente: Propia.

#### Comportamiento de la interfaz

La probeta sube su temperatura debido a la constante radiación térmica que transmite el radiador de calor, se puede determinar las características de radiación térmicas de la probeta de acuerdo con su temperatura final sabiendo la potencia que se el radiador está transmitiendo. La interfaz presentó una temperatura homogénea.

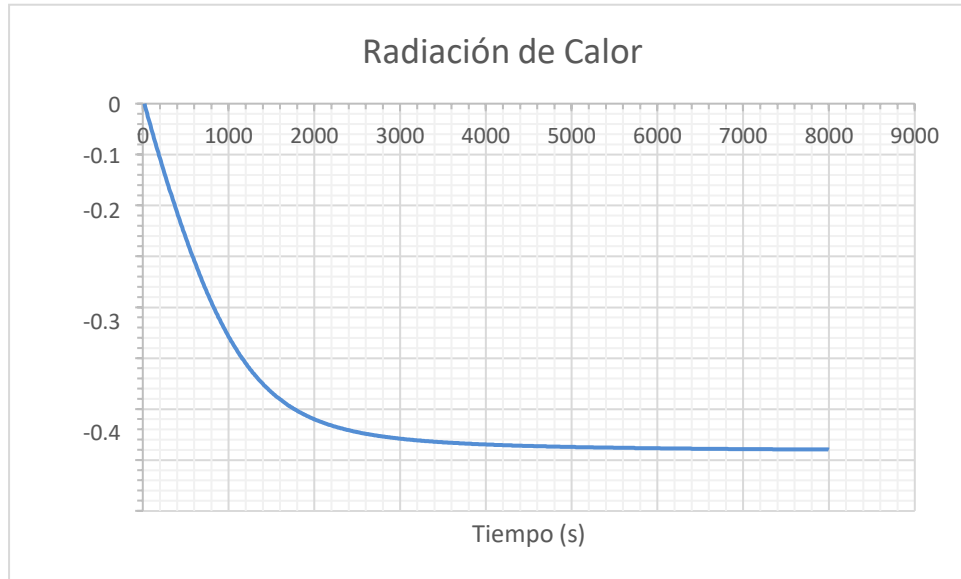


Figura 25. Radiación neta de la interfaz. Fuente: Propia.

Con la temperatura final y el calor que transmite el radiador de calor se puede obtener las potencias de la radiación reflejada, absorbida y emitida.

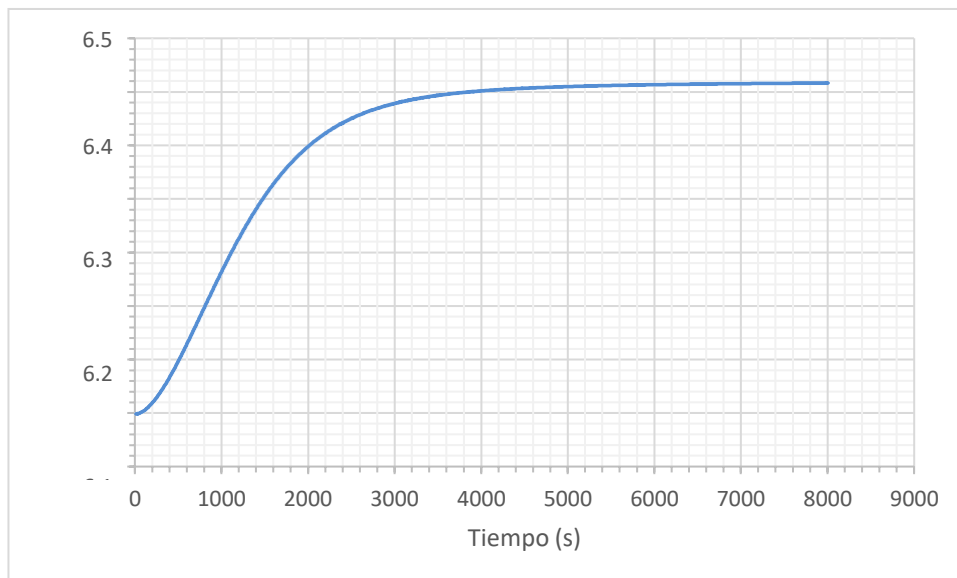


Figura 26. Radiación emitida de la probeta. Fuente: Propia.

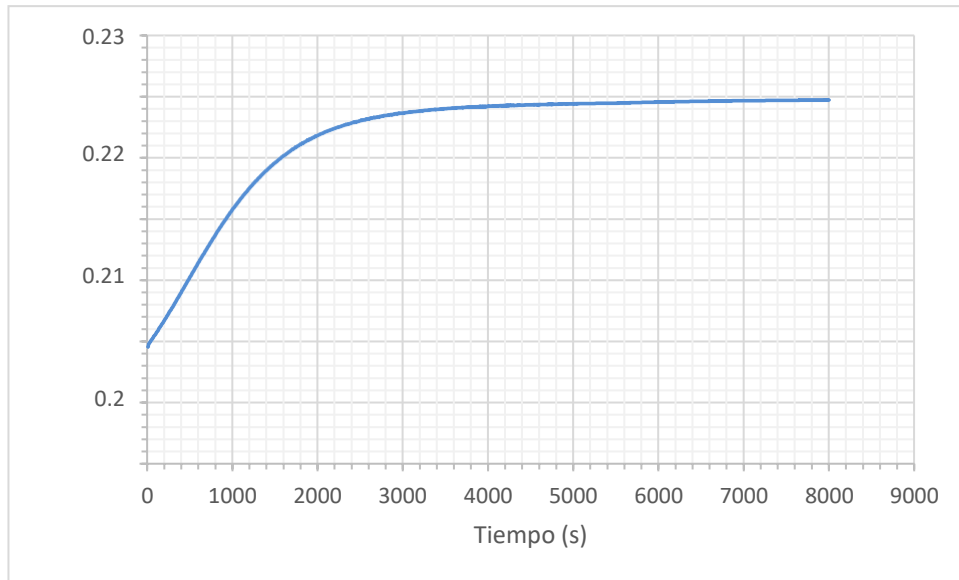


Figura 27. Radiación reflejada de la interfaz. Fuente: Propia.

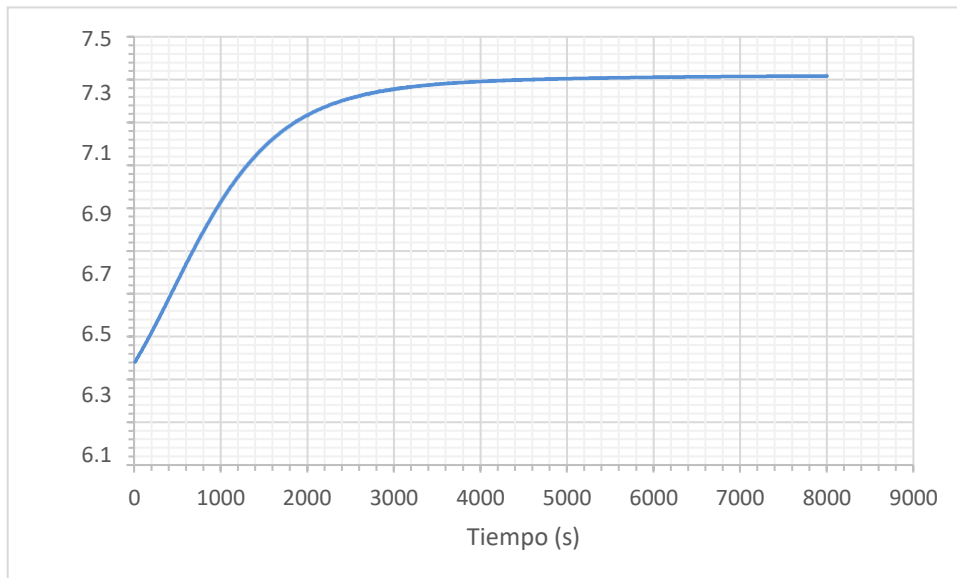


Figura 28. Radiación absorbida de la interfaz. Fuente: Propia.



## **9. Conclusiones**

- Las características de funcionamiento y parámetros de diseño del equipo garantizan el aprendizaje del estudiante, debido a que se cumple con el fenómeno de conducción lineal, el cambio de las dimensiones y material de la interfaz.
- Los experimentos del equipo cumplen con los requisitos y parámetros de diseño cumpliendo con la conducción lineal y la determinación de conductividad térmica.
- El control del equipo debe realizarse con el prototipo ya construido, debido a las características de los componentes según el fabricante, se caracteriza el comportamiento del equipo en condiciones reales para que trabaje en los parámetros establecidos en este proyecto.
- El área de contacto del agua puede obtener una eficiencia más alta al acondicionar las características de entrada del líquido de enfriamiento, donde se puede tener alternativas de líquido refrigerantes o una mezcla de agua con estos.
- Al trabajar con temperaturas bajas la resistencia cartucho puede tener un tiempo de vida mucho más largo.
- No se presentan planos eléctricos ni electrónicos debido al alcance del proyecto.

## **10. Recomendaciones**

- Se debe realizar el acondicionamiento del software de visualización y adquisición de datos, además de los módulos de potencia y control.
- El equipo está sujeto a mejoramiento en el control del caudal, además de la implementación de más probetas de experimentación.

## Referencias

- ACOFI. (Septiembre de 2015). BANCO DE PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA COMO HERRAMIENTA PEDAGÓGICA PARA LA ENSEÑANZA DE TRANSFERENCIA DE CALOR. Cartagena de Indias, Colombia.
- AreaCiencias*, 2021. (s.f.).
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia De Calor y Masa*. México DF: McGraw-Hill.
- Cengel, Y., Boles, M., & Kanoglu, M. (2019). *Termodinámica*. España: MCGRAWHILL.
- edibon. (2010). Unidad de conducción de calor TCCC. *Equipo de Enseñanza Técnica*. Leganés, España: edibon internacional.
- ENCICLOPEDIA. (2023). *enciclopedia.net*. Obtenido de <https://enciclopedia.net/conductividad/>
- greenspec. (2023). *greenspec.co.uk*. Obtenido de <https://www.greenspec.co.uk/building-design/heat-transfer-conduction-convection-radiation/>
- intel. (2013). *intel.in*. Obtenido de <https://www.intel.in/content/www/in/en/gaming/resources/how-to-apply-thermal-paste.html>
- Lienhard, J., & Lienhard, J. (2020). *A Heat Transfer Textbook*. Reprint edition.
- Lozano, R. (2020). *taloselectronics.com*. Obtenido de <https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/sensor-de-teperatura-con-relevador>
- Mendoza, L. J. (2020). *quimicaitatljmm.files.wordpress.com*. Obtenido de <https://quimicaitatljmm.files.wordpress.com/2020/05/mecanismos-transferencia-de-masa-ej2020.pdf>
- S.R.L, C. I. (2023). *vzcontroles.com*. Obtenido de <https://vzcontroles.com/producto/resistencia-de-cartucho-3-4-x-10-220v-1050w/>
- simscale. (2023). *simscale.com*. Obtenido de <https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>
- synheat. (2023). *synheat.co*. Obtenido de <http://synheat.com/wp-content/uploads/2014/10/SYN-Tubular-Heating-Elements-A.pdf>

- Tecnic, P. (2023). *polimertecnic.com*. Obtenido de <https://www.polimertecnic.com/materiales-plasticos/otros-plasticos-en-placas/abs-placas/abs/>
- Veneta, E. (2023). *elettronicaveneta.com*. Obtenido de <https://www.elettronicaveneta.com/es/prodotto/medicion-de-la-temperatura-y-calibracion-2/>
- web.me.iastate. (2023). *web.me.iastate.edu*. Obtenido de [https://web.me.iastate.edu/tsippel/htlab/11-linear-conduction.html#:~:text=The%20linear%20heat%20conduction%20module,\(radial%20direction\)%20are%20insulated.](https://web.me.iastate.edu/tsippel/htlab/11-linear-conduction.html#:~:text=The%20linear%20heat%20conduction%20module,(radial%20direction)%20are%20insulated.)

## 11. Anexos

Anexo 1. Condiciones iniciales resistencia térmica, transferencia de calor por conducción.

$$T_{\text{set}} = 150 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$T_{\text{carcasa}} = 52 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$R_{\text{ext,resist}} = \frac{12}{2000} \text{ [m]}$$

$$T_{\text{amb}} = 25 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Camisa

$$k_{\text{camisa}} = 240 \text{ [W/m]}$$

Aislante

$$k_{\text{aisl}} = 0,24 \text{ [W/m]}$$

$$R_{\text{ext,aisl}} = \frac{80}{2000} \text{ [m]}$$

Carcasa

$$k_{\text{carcasa}} = 63,9 \text{ [W/m]}$$

$$R_{\text{ext}} = R_{\text{ext,aisl}} + \theta_{\text{sp,aisl}}$$

$$\theta_{\text{sp,aisl}} = \frac{1,4}{1000} \text{ [m]}$$

$$R_{\text{ext,camisa}} = \frac{50}{2000} \text{ [m]}$$

$$Q_{\text{perdidas}} = \frac{T_{\text{set}} - T_{\text{carcasa}}}{R_{\text{total}}}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{camisa}} + R_{\text{aisl}} + R_{\text{carcasa}}$$

$$R_{\text{camisa}} = \frac{\ln \left[ \frac{R_{\text{ext,camisa}}}{R_{\text{ext,resist}}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot k_{\text{camisa}}}$$

$$R_{\text{aisl}} = \frac{\ln \left[ \frac{R_{\text{ext,aisl}}}{R_{\text{ext,camisa}}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot k_{\text{aisl}}}$$

$$R_{\text{carcasa}} = \frac{\ln \left[ \frac{R_{\text{ext}}}{R_{\text{ext,aisl}}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot k_{\text{carcasa}}}$$

$$Q_{\text{perdidas}} = \frac{T_{\text{ext,aisl}} - T_{\text{ext,camisa}}}{R_{\text{aisl}}}$$

$$Q_{\text{perdidas}} = \frac{T_{\text{carcasa}} - T_{\text{ext,aisl}}}{R_{\text{carcasa}}}$$

*Anexo 2. Condiciones iniciales de diseño de la interfaz.*

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$d = \frac{50,8}{1000} \text{ [m]}$$

$$K = 240 \text{ [W]}$$

TC

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{DT}{DX}$$

$$DT = T_1 - T_2$$

$$T_1 = 150$$

$$Q = 1500$$

$$DX = \frac{50}{1000}$$

$$Q_w = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{2;w} - T_{1;w})$$

$$Q_w = -3190$$

$$c_p = 4186$$

$$T_{2;w} = 25$$

$$A_{tra} = \pi \cdot \frac{di^2}{4}$$

$$di = \frac{13}{1000}$$

### Anexo 3. Condiciones iniciales sistema de enfriamiento.

$$Q_1 = k_1 \cdot A_1 \cdot \frac{DT_1}{DX_1}$$

$$-DT_1 = T_{11} - T_{12}$$

$$T_{11} = 25$$

$$k_1 = 63,9$$

$$A_1 = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4}$$

$$d_1 = \frac{50,8}{1000}$$

$$Q_1 = 3190$$

$$DX_1 = \frac{1,8}{1000}$$

### Anexo 4. Diseño de control

El control del sistema viene dado por una placa Arduino y para controlar el paso de energía hacia la resistencia de potencia por tal motivo, se hace el uso de un control, ON-OFF y de un dispositivo electrónico relé.



Figura 29. Configuración del módulo relé hacia la resistencia tubular de calefacción.

Fuente: (Lozano, 2020)

El módulo cuenta con un relevador para controlar una carga AC directamente, cuenta con las terminales normalmente abierto, normalmente cerrado y el común.

Especificaciones:

- Voltaje de alimentación: 3.3 ~ 5 VCD

- Voltaje de suministro: 250 VCD / 30 VCD a 10 A
- Dimensiones: 50 x 26 x 17 mm
- Peso: 14.6 g

Su configuración es:

```

1
2 //byte rele = D1; // Si utilizas un ESP8266 NodeMCU Wemos D1 mini
3 byte rele = 2; // Si utilizas un Arduino UNO Arduino MEGA
4
5 // the setup routine runs once when you press reset:
6 void setup() {
7   // initialize el pin del rele como salida
8   pinMode(rele, OUTPUT);
9 }
10
11// the loop routine runs over and over again forever:
12void loop() {
13  digitalWrite(rele, HIGH); // activar el rele'
14  delay(1000);           // esperar un segundo
15  digitalWrite(rele, LOW); // apagar el rele'
16  delay(1000);           // esperar un segundo
17}

```

Por otro lado, se tiene el control de la visualización de los datos en los display LCD 16x2, de manera que se tiene, un kit shield keypad en Arduino, de manera que la conexión es extremadamente sencilla, ya que el "escudo" se conecta sobre la placa Arduino UNO.

Los pines del propio shield van internamente según la tabla:

PIN	FUNCIÓN
Analog 0	Button(select, up, right, down and left)
Digital 4	DB4

Digital 5	DB5
Digital 6	DB6
Digital 7	DB7
Digital 8	RS (Data or signal Display Selection)
Digital 9	Enable
Digital 10	Backlit Control

Tabla 11. Pines del shield display LCD. Fuente: Propia.

Su configuración es:

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
```

```
int lcd_key = 0;
```

```
int adc_key_in = 0;
```

```
#define btnRIGHT 0
```

```
#define btnUP 1
```

```
#define btnDOWN 2
```

```
#define btnLEFT 3
```

```
#define btnSELECT 4
```

```
#define btnNONE 5
```

```
int read_LCD_buttons() // para leer los botones
```

```
{ adc_key_in = analogRead(0); // Leemos A0
```

```
// Mis botones dan: 002, 130, 306,481,720
```

```
// Y ahora los comparamos con un margen comodo
```

```
if (adc_key_in > 900) return btnNONE; // Ningun boton pulsado
```



```

if (adc_key_in < 50) return btnRIGHT;

if (adc_key_in < 250) return btnUP;

if (adc_key_in < 450) return btnDOWN;

if (adc_key_in < 650) return btnLEFT;

if (adc_key_in < 850) return btnSELECT;

return btnNONE; // Por si todo falla

}

void setup()

{ lcd.begin(16, 2);          // Inicializar el LCD

  lcd.setCursor(0, 0);

  lcd.print("SolectroShop"); // print a simple message

}

void loop()

{ lcd.setCursor(9,1);      // Cursor a linea 2, posicion 9

  lcd.print(millis()/1000); // Imprime contador en segundos

  lcd.setCursor(13, 0);    // Cursor a linea 1, posicion 13

  lcd.print(adc_key_in);   // Imprime el valor leido en la puerta A0

  lcd.setCursor(0,1);      // Cursor a linea 2, posicion 1

  lcd_key = read_LCD_buttons();

  if( lcd_key == btnRIGHT)

    lcd.print("RIGHT ");

```

```
else if ( lcd_key == btnLEFT )  
    lcd.print("LEFT ");  
else if ( lcd_key == btnUP )  
    lcd.print("UP ");  
else if ( lcd_key == btnDOWN )  
    lcd.print("DOWN ");  
else if ( lcd_key == btnSELECT )  
    lcd.print("SELECT");  
else if ( lcd_key == btnNONE )  
    lcd.print("NONE ");  
}
```

Anexo 5. Planos del módulo banco de pruebas térmicas.

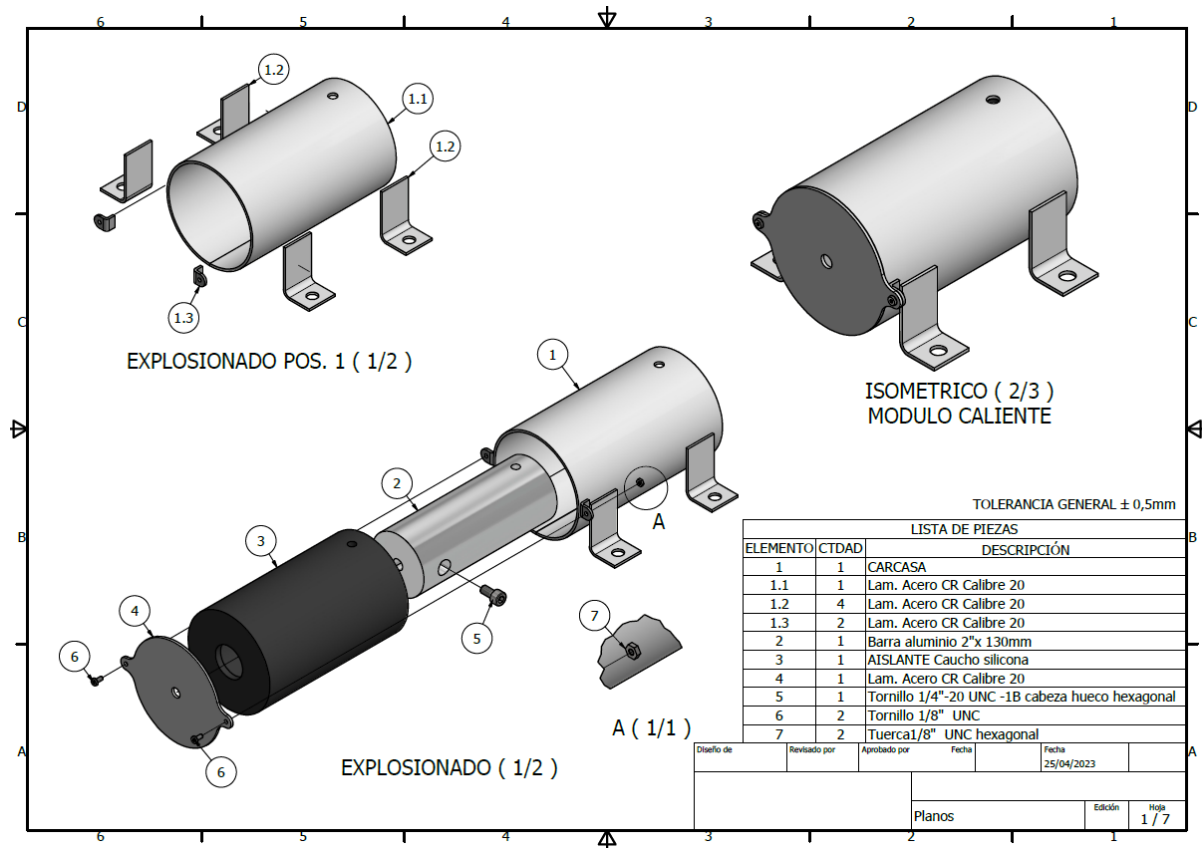


Figura 30. Módulo de calor. Fuente Propia.

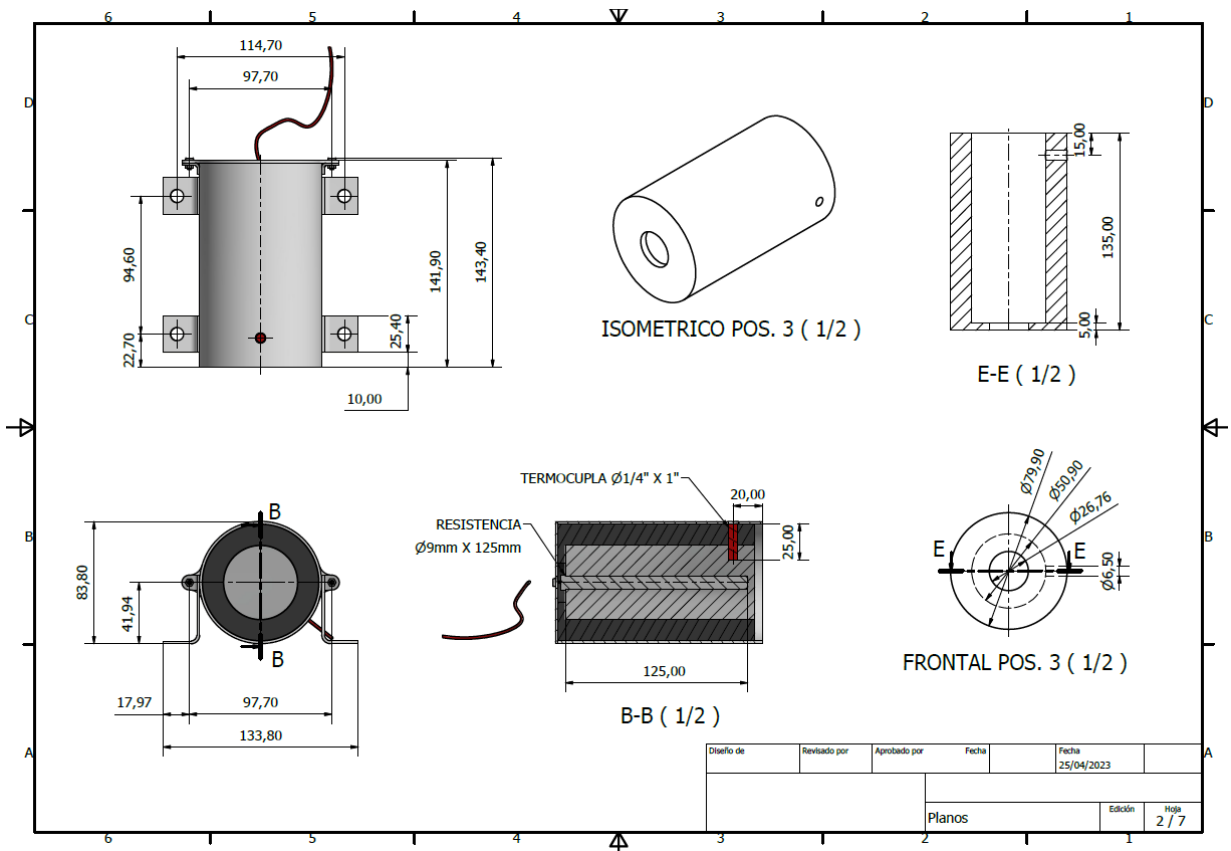


Figura 31. Módulo interfaz. Fuente: Propia.

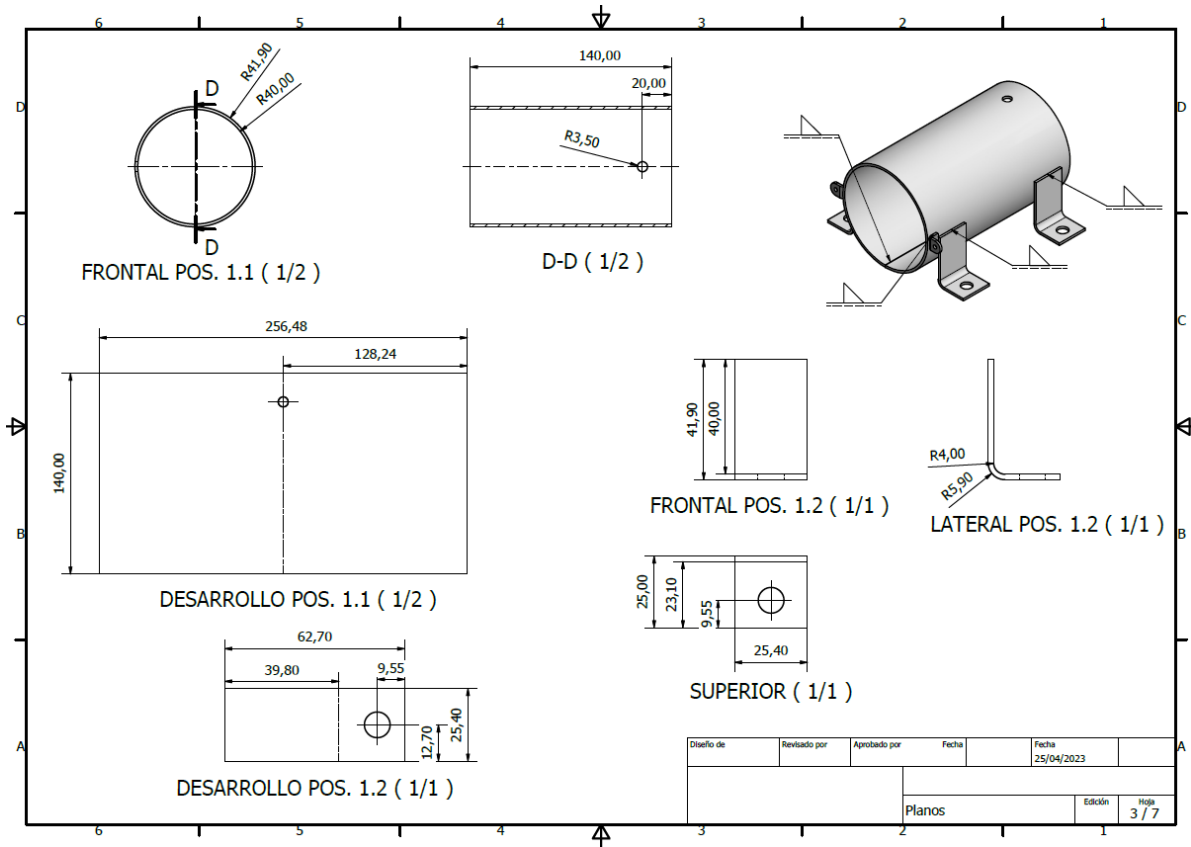


Figura 32. Carcaza. Fuente: Propia.

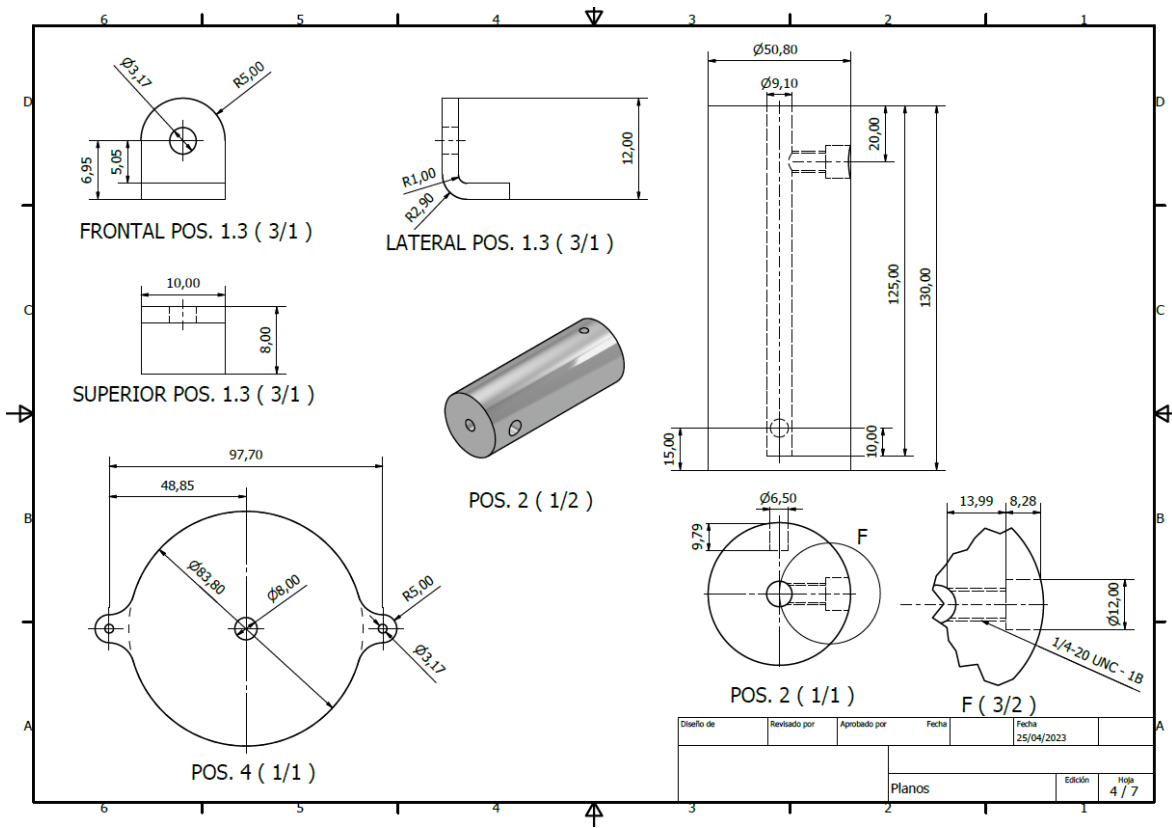


Figura 33. Pieza de la interfaz. Fuente: Propia.

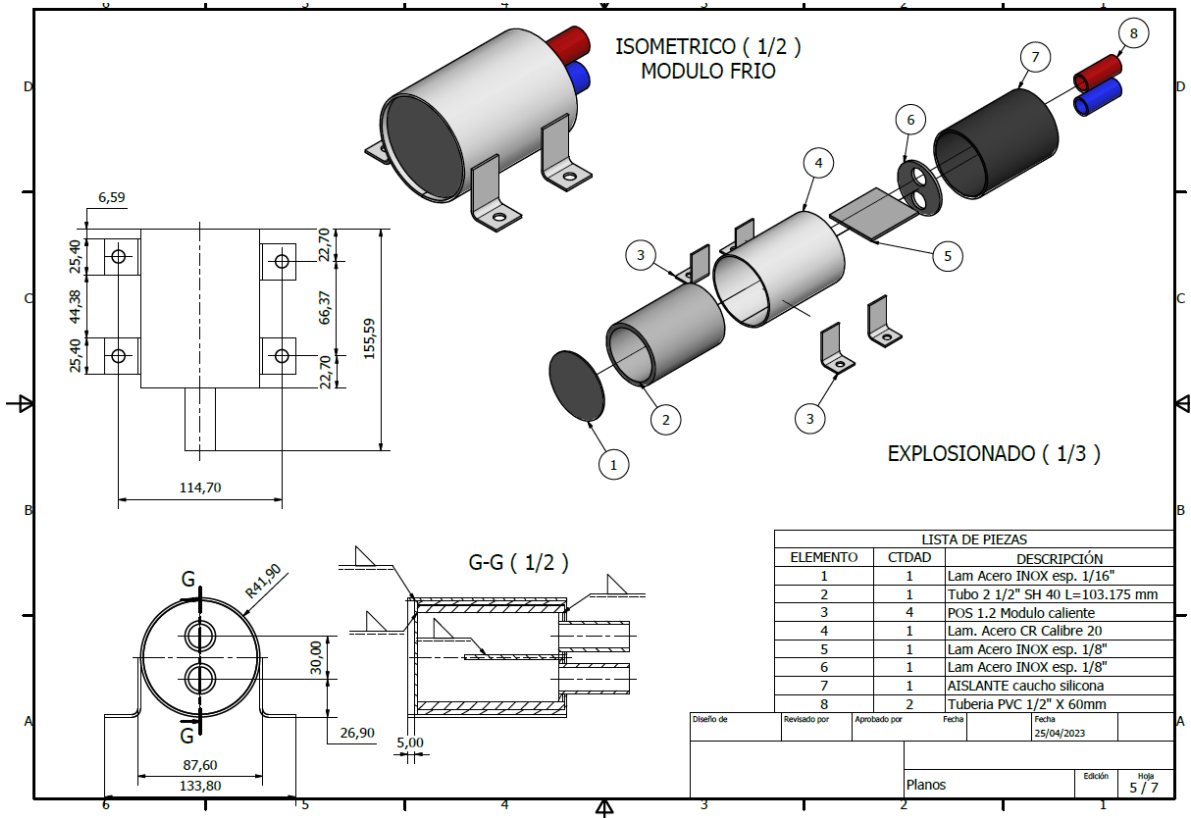


Figura 34. Módulo de enfriamiento. Fuente: Propia.

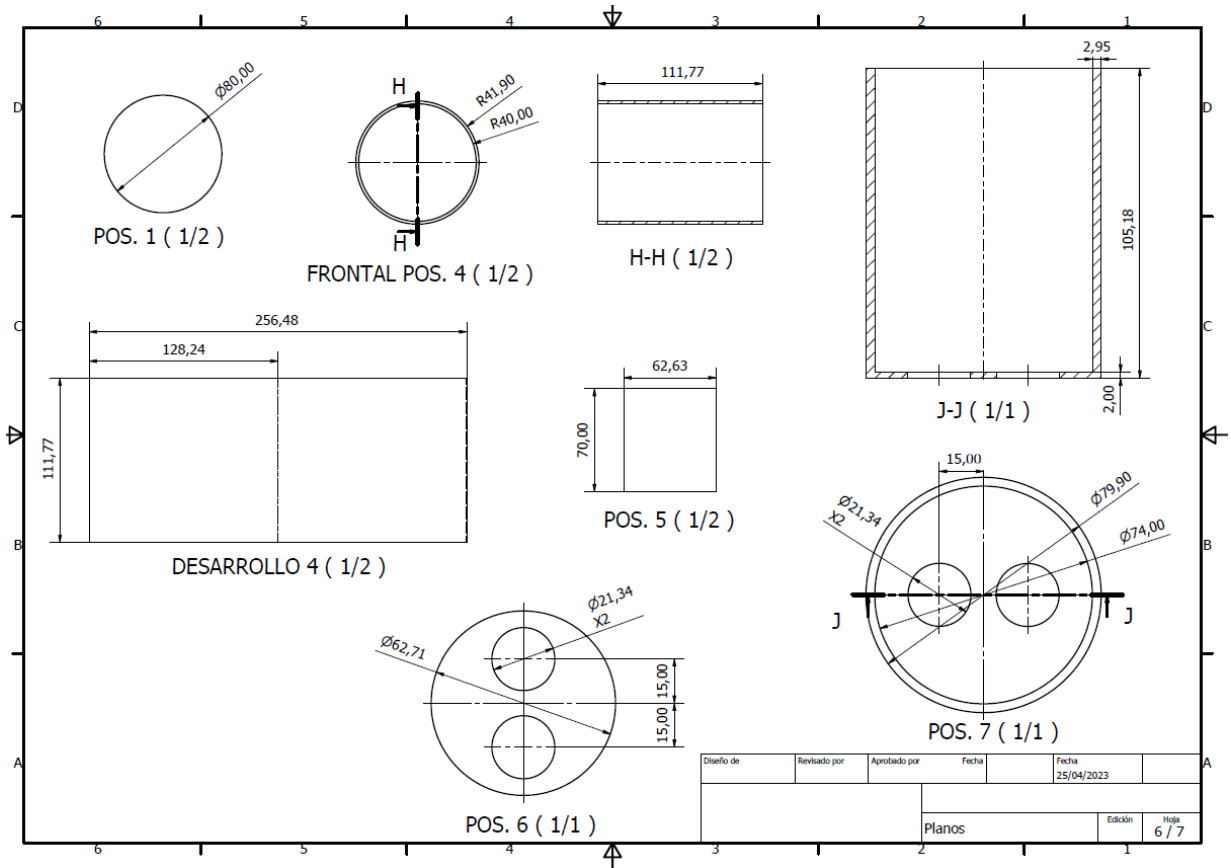
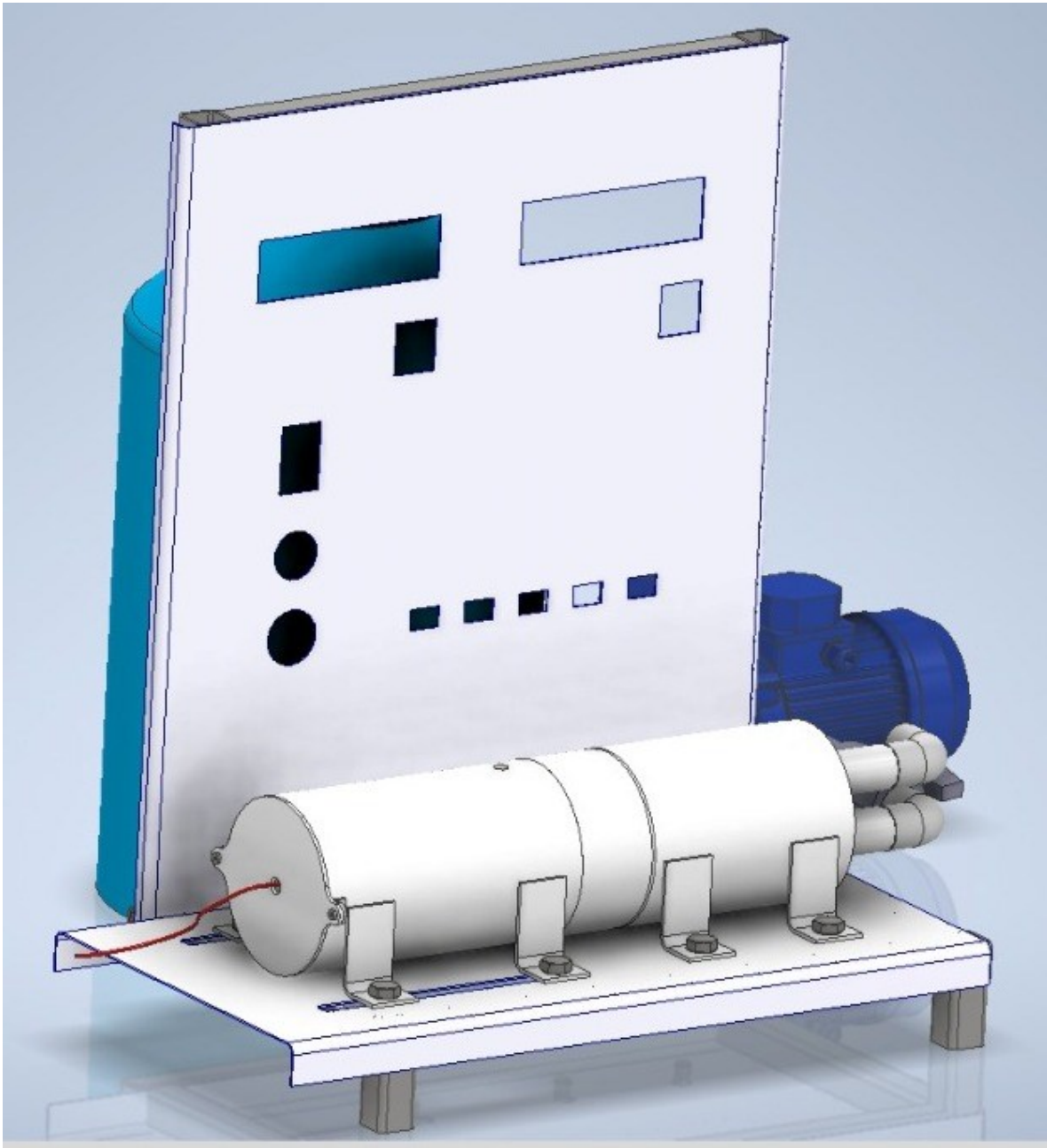


Figura 35. Tapas de la fuente de enfriamiento. Fuente: Propia.





*Figura 36. Vista render banco de pruebas de temperatura. Fuente: Propia.*

## **Anexo 6. Guía de usuario**

### *Requisitos de equipo de conducción lineal*

De acuerdo los temas abordados en la universidad, la indagación de profesionales con experiencia en el campo y antecedentes de equipos fabricados, se puede establecer requisitos académicos y de funcionamiento.

Equipo de Transferencia de calor por Conducción Lineal:

- Debe mostrar el comportamiento de conducción lineal y Radial del sistema en un diferencial de temperatura.
- Obtención de Conductividad térmica.
- Caracterización de Conducción lineal con diferentes materiales y dimensiones.
- Caracterización del cambio de conductividad con diferentes temperaturas del equipo.
- Fácil interpretación de datos del equipo.
- Práctica y de fácil utilización.

Equipo de Transferencia de calor por Radiación Térmica:

- Determinar Coeficiente de emisividad de material receptor
- Determinar Coeficiente de Absortividad y Reflectividad
- Generar Radiación térmica entre dos cuerpos
- Demostrar la ley de Lambert
- Demostrar ley de Sthephan Boltzmann

Requisitos para todos los equipos:

- El equipo debe presentar confiabilidad en las mediciones experimentales
- El funcionamiento del equipo es acorde a las instalaciones eléctricas y de agua del Laboratorio de la Universidad.
- El equipo debe tener bajo costo.
- Debe presentar un pequeño tamaño para su fácil manipulación.
- Debe garantizar la seguridad del estudiante.
- No tener un alto peso.

## Condiciones de operación

El equipo debe cumplir algunas condiciones de operación

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	OBSERVACIÓN
Potencia	150 W	Se toma como potencia máxima, se va a diseñar el equipo de modo que la potencia requerida para obtener el diferencial de temperatura máximo sea menor a esta potencia. Sobredimensionando el equipo se puede garantizar que el tiempo de estabilización es menor. De acuerdo con el comportamiento del equipo se puede subir o bajar o dejar igual esta potencia máxima
Voltaje de trabajo (V)	120	Los laboratorios de la universidad pueden entregar 120 V
Temperatura Máxima (°C)	120	Esta es la temperatura máxima deseada en la fuente de calor, ya que la resistencia es la zona que se presume que va a tener una mayor temperatura, se utiliza este valor de tal manera que el equipo no requiera de un espesor muy grande de aislamiento para garantizar la seguridad del estudiante. Para el cumplimiento del equipo no es necesario tener temperaturas altas para demostrar el fenómeno.
Diferencial de temperatura	60	Teniendo en cuenta la temperatura máxima de la fuente de calor y que la temperatura ambiente promedio es de 17°C (Ref. 14), este da un intervalo de temperatura de 103°C, la diferencia de temperaturas de 60°C está dentro de este intervalo y se toma como valor inicial, debido a que si se usa

a Máximo (°C)		un intervalo mayor cercano a 103°C, se puede presumir que la temperatura máxima de la fuente de calor aumentará y se requerirá mayor potencia.
Caudal de enfriamiento (l/min)	3	Esté valor es entregado por el laboratorio de la universidad libre

Tabla 12. Condiciones de operación del equipo de conducción lineal. Fuente: Propia.

#### Pasos de conexión

Se debe ajustar el modulo de calor de manera que quede ajustado a la interfaz y al modulo de enfriamiento, que están previamente ajustados, por medio de un tornillo.

Luego se debe conectar los tubos de flujo de agua a la válvula manual y luego hacia la motobomba.



Figura 37. Conexión tubería con motobomba y módulo de enfriamiento. Fuente: Propia.

El módulo de enfriamiento con válvula y motobomba funciona de la siguiente manera: el fluido que se desea enfriar o regular su temperatura es impulsado por la motobomba a través del sistema. El fluido pasa a través de la válvula de control, que ajusta el flujo de acuerdo con los parámetros establecidos.



*Figura 38. Conexión hidráulica de motobomba. Fuente: Propia.*

De esa manera se debe conectar un depósito de agua a la motobomba y de esta manera este sale hacia la válvula manual. Para eso se tiene:

- Válvula check
- Válvula de paso
- Unión universal
- Niples
- Adaptadores
- Codo y T

Con esto, se tiene una conexión eléctrica, de manera que se debe ajustar la conexión del lugar de la toma que va hacia la clavija de la motobomba. De esa manera se tiene:

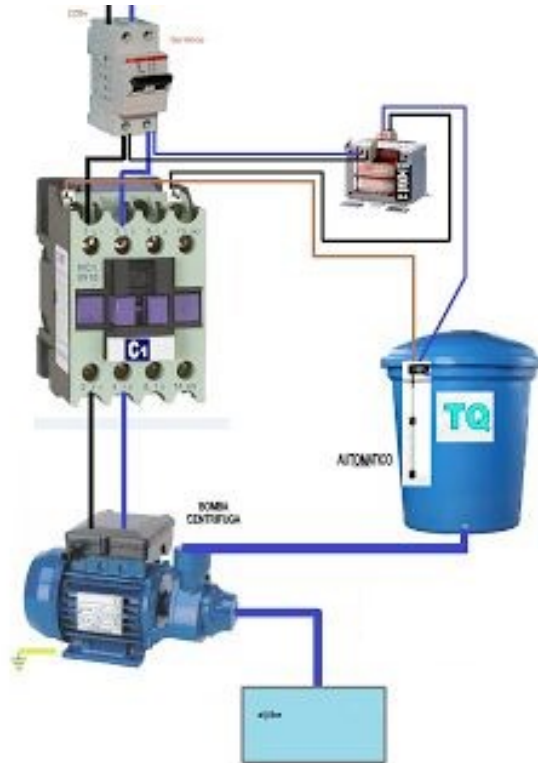


Figura 39. Diagrama de conexión eléctrica de la motobomba. Fuente: Propia.

De ahí se tiene la conexión de los sensores:

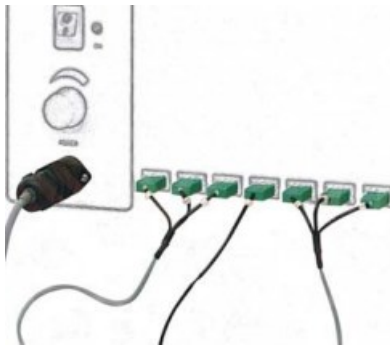


Figura 40: Conexión de los sensores. Fuente propia.

El siguiente paso es conectar el control de alimentación hacia la resistencia térmica.



*Figura 41. Diagrama de conexión del control relé desde Arduino hasta la resistencia térmica. Fuente: Propia.*

El lado de la carga entonces se conecta la resistencia térmica tubular. Por otro lado, se alimenta el módulo bien sea desde el Arduino o desde una fuente externa, adicional se tiene un canal que es el canal de la señal de control desde Arduino.