

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



**Diseño, construcción y calibración de módulo para medir
conductividad térmica en materiales sólidos.**

Gonzalo Alonso Abarca Esparza

Profesor Guía:

Donovan Díaz Droguett

**Tesis para optar al Título Profesional de
Ingeniero Físico.**

Santiago – Chile

2017

© Gonzalo Alonso Abarca Esparza, 2017.

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial Chile 3.0

Diseño, construcción y calibración de módulo para medir conductividad térmica en materiales sólidos

Este trabajo de Titulación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Donovan Díaz, de la Facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica, y bajo la supervisión del profesor patrocinante Juliano Denardín del Departamento de Física de la Universidad de Santiago, y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora Diego Celentano y Simón Oyarzún del candidato, Sr. Gonzalo Alonso Abarca Esparza.

Profesor Diego Celentano.

Profesor Simón Oyarzún.

Profesor Juliano Denardin.

Profesor Guía: Donovan Díaz Droguett.

Director de Departamento: Enrique Cerda.

RESUMEN

Este trabajo trata acerca del diseño, construcción, ensamble y calibración de un módulo que permite determinar la conductividad térmica en materiales sólidos a través de un flujo de calor en estado estacionario. La primera etapa de este trabajo explica el proceso de diseño del dispositivo como tal, en el que se considera una geometría cilíndrica concéntrica de tipo modular, donde en los extremos de esta estructura cilíndrica se establecerá un gradiente de temperatura en forma controlada. Con el flujo de calor axial a través de una muestra se utilizó un modelo matemático derivado de la ecuación de difusión de calor de Fourier, el cual determina la conductividad térmica de la muestra y en donde se desprecian las pérdidas de calor por convección/radiación.

Para la calibración se utilizó una pastilla de cobre (Cu), cuya conductividad térmica nominal reportada en la literatura es $385 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$. Con esta se realizó una serie de experimentos sistemáticos, en donde se determinó que el factor de calibración del módulo no es constante, sino que aumenta con el incremento de diferencia de temperatura entre los calefactores. Se ajustaron los datos experimentales a curvas lineales ($r^2=0.99$) para calcular el factor de calibración en diferentes rangos de temperatura. Desviación estándar calculada en ensayos con *set-point* sobre 70°C es $12.4 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$ y esta aumenta cerca de 43% con *set-point* inferiores a 70°C . Luego, el rango óptimo operativo del módulo para la medición de una muestra basada en cobre se encuentra entre 70°C y 120°C . Luego, se incorporó un enfriador Peltier al aparato y se midió la conductividad térmica en la muestra de cobre arrojando resultados considerablemente más estables con un error relativo porcentual del 4.2%.

Palabras claves: Diseño, Ensamble, Calibración, Conductividad térmica.

Agradecimientos

Agradezco la oportunidad de haber trabajado en mi proyecto de tesis bajo la supervisión del profesor Donovan Díaz y al proyecto Interdisciplinario del CIEN-UC.

Agradezco a los miembros del Laboratorio por la colaboración en el trabajo desde el comienzo. En particular a Pedro Álvarez y Jan Ahlstrom, por la dedicación y buena voluntad.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPITULO 1	2
1.1 Objetivo general y específicos	2
1.2 Contexto.....	3
1.2.1 Dispositivos existentes actualmente en el mercado	4
1.3 Antecedentes y aspectos teóricos.....	7
1.3.1 Transferencia de calor por conducción.....	7
DISEÑO Y MODELO MATEMÁTICO	12
2. CAPÍTULO 2	12
2.1 Diseño	12
2.1.1 Propuesta de diseño	13
2.1.2 Modelo Matemático	15
2.1.3 Pérdidas de calor convección/radiación	16
PARTE EXPERIMENTAL.....	19
3. CAPÍTULO 3	19
3.1 Montaje experimental.....	19
3.2 Componentes secundarios.....	21
3.3 Descripción experimento típico.....	25
RESULTADOS	27
4. CAPÍTULO 4	27
4.1 Resultados ensayos de calibración.....	27
4.1.1 Análisis del factor de calibración en módulo up-grade	31
4.2 Resultados comparativos	36
CONCLUSIONES.....	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO.....	42

Índice de Tablas

TABLA 1. FICHA TÉCNICA DEL APARATO FOX 600	6
TABLA 2. DENSIDAD Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA W/KM DE MATERIALES METÁLICOS REPORTADOS EN LA LITERATURA.	10
TABLA 3. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL CALENTADOR UTILIZADA EN LA ETAPA DE ENSAMBLAJE DEL MÓDULO.	22
TABLA 4. DESCRIPCIÓN TÉCNICA SENSOR DE TEMPERATURA TMP 36	23
TABLA 5. VALORES EXPERIMENTALES SIN UP-GRADE EN LOS INTERVALOS DE TEMPERATURA INDICADOS.	28
TABLA 6. VALORES EXPERIMENTALES CON UP-GRADE EN LOS INTERVALOS DE TEMPERATURA INDICADOS. TOMANDO LOS ΔT DEL MÓDULO SIN UP-GRADE.	30
TABLA 7. VALORES EXPERIMENTALES CON UP-GRADE EN LOS INTERVALOS DE TEMPERATURA INTERMEDIOS A LOS DE REFERENCIA.	30
TABLA 8. VALOR DE A OBTENIDO DE INTERPOLACIÓN.....	33
TABLA 9. ERROR RELATIVO PORCENTUAL DE LOS VALORES A EXPERIMENTALES RESPECTO A LOS OBTENIDOS MEDIANTE CADA INTERPOLACIÓN.....	34
TABLA 10. VALOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA CALCULADA	35
TABLA 11. VALOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA CALCULADA A PARTIR DE LA INTERPOLACIÓN	36
TABLA 12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ENFRIADOR PELTIER TC1-12607.	36
TABLA 13. ENSAYO DE CALIBRACIÓN CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA MUESTRA DE COBRE PURO, A DIFERENTES TEMPERATURAS SP.....	38
TABLA 17. VALORES DE LOS PUNTOS (TM, PVM) Y TU EN AMBOS CALEFACTOR DE ACUERDO A LA FIGURA 18.....	44
TABLA 18. PARÁMETROS PID OBTENIDOS A PARTIR DEL MÉTODO DEL ESCALÓN CON DATOS EXPERIMENTALES. PARA EL MÓDULO SIN-UPGRADE.	44
TABLA 19. COSTO DE FABRICACIÓN DEL MÓDULO.....	45

ÍNDICE DE ILLUSTRACIONES

Figura 1. Dispositivos Raysky.....	4
Figura 2. TA instruments Series Heat Flow Meters	5
Figura 3. Esquema de funcionamiento del interior del aparato TA Instrument Fox 600 para la medición de conductividad térmica en materiales.	5
Figura 4. Esquema de transferencia de calor por conducción.....	8
Figura 5. Transferencia de calor por conducción en un cilindro aislado con $T_1 > T_2$ descrito por ecuación de Fourier.....	8
Figura 6. Conductividad térmica metales en función de la Temperatura	11
Figura 7. Esquema del primer diseño.....	12
Figura 8. Diseño del módulo para medir conductividad térmica en materiales sólidos...	13
Figura 9. Perfil de temperatura obtenido a partir del modelo matemático].	18
Figura 10. (A) Estructura principal del dispositivo sin recubrimiento aislante. (B) Módulo con armazón aislante y termopares instalados.....	19
Figura 11. Montaje experimental utilizando una prensa oleo-hidráulica para aumentar el contacto térmico entre el modulo y la muestra.....	20
Figura 12. Calentador MOSFET-N IRFZ40.	21
Figura 13. Sensor de temperatura TMP36	23
Figura 14. Esquema circuito eléctrico..	24
Figura 15. (A) Interface utilizada para la medición de conductividad térmica en régimen estacionario. (B) Perfil de temperatura en LabView de temperatura/tiempo.....	26
Figura 16. Valores experimentales Factor de calibración α vs ΔT	28
Figura 17. Interpolación con valores experimentales	32
Figura 19. Celda Peltier modelo TC1-12607	37
Figura 18. Montaje Experimental con celda Peltier incorporado.	37
Figura 20. Ensayos de calibración para determinar conductividad térmica de aleaciones con diferentes proporciones de cobre.	39
Figura 21. Proceso ajuste de parámetros PID.	42
Figura 22. Gráfico T [°C] vs tiempo [s]..	43

INTRODUCCIÓN

La medición de la conductividad térmica en materiales sólidos tiene un gran interés tanto a nivel teórico de investigación como para propósitos industriales. Actualmente, existen principalmente dos métodos para determinar la conductividad térmica.

La primera denominada *método transciente*, la cual requiere información sobre la capacidad térmica de la muestra en estudio. La técnica de laser-flash (Choy, Kwok, Leung, & Lau, 1994) es un ejemplo de una técnica en estado *transciente*, el cual puede ser aplicado a mediciones con altas temperaturas. El segundo método se refiere a un flujo de calor controlado en estado estacionario, en donde se mide *in situ* la temperatura en diferentes partes de la muestra (Spinnler, 2004).

En (Burheim, Vie, Pharoah, & Kjelstrup, 2007) las mediciones de conductividad térmica son realizadas a través de una técnica directa, y es posible obtener la conductividad térmica de un material sólido mediante la ecuación de Fourier.

Una de las motivaciones de este trabajo de construir un dispositivo modular que opere con un flujo de calor en estado estacionario es el bajo costo monetario que podría lograrse, comparativamente menor a los dispositivos que ofrece el mercado, y con expectativas de precisión y estabilidad relativamente similares.

En este capítulo se indican los objetivos principales de este trabajo, antecedentes y aspectos teóricos, así como los conceptos fundamentales de la transferencia de calor por conducción en materiales.

En los siguientes capítulos se describe el proceso completo del trabajo; el diseño global del módulo. La justificación de la geometría empleada y estructuras. Luego la parte experimental; el ensamblaje, describiendo las componentes principales y secundarias, como la electrónica usada. Y por último, la calibración del módulo con los resultados obtenidos y sus respectivas conclusiones.

1. CAPITULO 1

1.1 Objetivo general y específicos

Objetivo General

Realizar medición de conductividad térmica en materiales sólidos en un régimen estacionario de temperatura.

Objetivos específicos

1. Diseñar un módulo para medir conductividad térmica de materiales sólidos. Elaborar un modelo matemático que describa la participación de los parámetros y variables involucradas.
2. Construcción y ensamblaje del aparato. Maquinado de sus componentes principales y la incorporación de las componentes periféricos como sensores de temperatura, calefactores y controladores. Considerando etapas de mejora en la instrumentación utilizada.
3. Calibrar con una muestra patrón de cobre puro para analizar estabilidad en los resultados entregados de acuerdo a la variación de *Set-Point* (SP) en los extremos del módulo. Mejorar condiciones de precisión y estabilidad.

1.2 Contexto

Las propiedades mecánicas, eléctricas o magnéticas de diversos materiales sufren importantes cambios cuando la temperatura varía. Por esto mismo deben tenerse en cuenta los efectos térmicos a la hora de dimensionar o seleccionar un material idóneo, ya que algunas aplicaciones industriales requieren la utilización de materiales con propiedades térmicas específicas. La conductividad térmica está directamente vinculada con la eficiencia energética: cuanto más baja sea la conductividad térmica de un producto, mejor será su propiedad para impedir el flujo de calor, y más eficiente será en evitar la pérdida de calor (o la ganancia de calor en el caso de sistemas refrigerados). Por esto, dentro del marco de la ingeniería hay estudios de materiales tanto metales como no metales, en estados de agregación sólidos o semisólidos, que buscan la manera de adaptarlos y fabricarlos para responder a diferentes necesidades.

El acelerado crecimiento tecnológico hace que el estudio y caracterización de nuevos materiales sean la base de los avances tecnológicos. Dentro del marco de la ingeniería, esto se traduce en diseño, fabricación, comportamiento e incorporación de nuevas técnicas. Los automóviles, la ropa, el calzado, el equipo deportivo, los ordenadores, las prótesis y dispositivos biomédicos, sólo por mencionar algunos, se fabrican con materiales cada vez más modernos, incluso basados en nanotecnología, que necesariamente deben ser caracterizados y estudiados previamente. En este aspecto, la conductividad térmica determina la capacidad de un material de transferir calor a través de éste. La precisión en las mediciones de esta propiedad es de vital importancia a la hora de estudiar y modelar la transferencia de calor en un sistema. La medición de estas propiedades de transporte también entrega información relevante sobre la composición del material, pureza y estructura.

1.2.1 Dispositivos existentes actualmente en el mercado

Actualmente existen dispositivos en el mercado dirigidos a un mercado de empresas manufactureras, organismos de investigación y universidades. Estos aparatos de gran sofisticación son capaces de medir propiedades termo físicas de sólidos, líquidos y polvos. Dentro de la variedad de dispositivos que ofrece actualmente el mercado, también hay diferentes precios asociados a estos dispositivos de alta gama tecnológica. El rango de precio de estos dispositivos se encuentra alrededor de los USD 10.000 (cerca de 7 millones de pesos chilenos), y que dependerá de las técnicas, precisión y versatilidad.



Figura 1. Actualmente líderes del mercado en la construcción de dispositivos para obtener conductividad térmica en diferentes sustancias con alta resolución, entre 0.1 $\frac{W}{K \cdot m}$ a 500 $\frac{W}{K \cdot m}$. Raysky tiene una ventaja muy superior al resto de los módulos, ya que puede medir una gran variedad de materiales únicos o compuestos a una gran precisión de temperatura, con un grado de control en el proceso de medición automático.

Imagen: (RaySky Scientific Instruments Co. Ltd, s.f.)



Figura 2. TA instruments Series Heat Flow Meters
Modelo Fox 600.

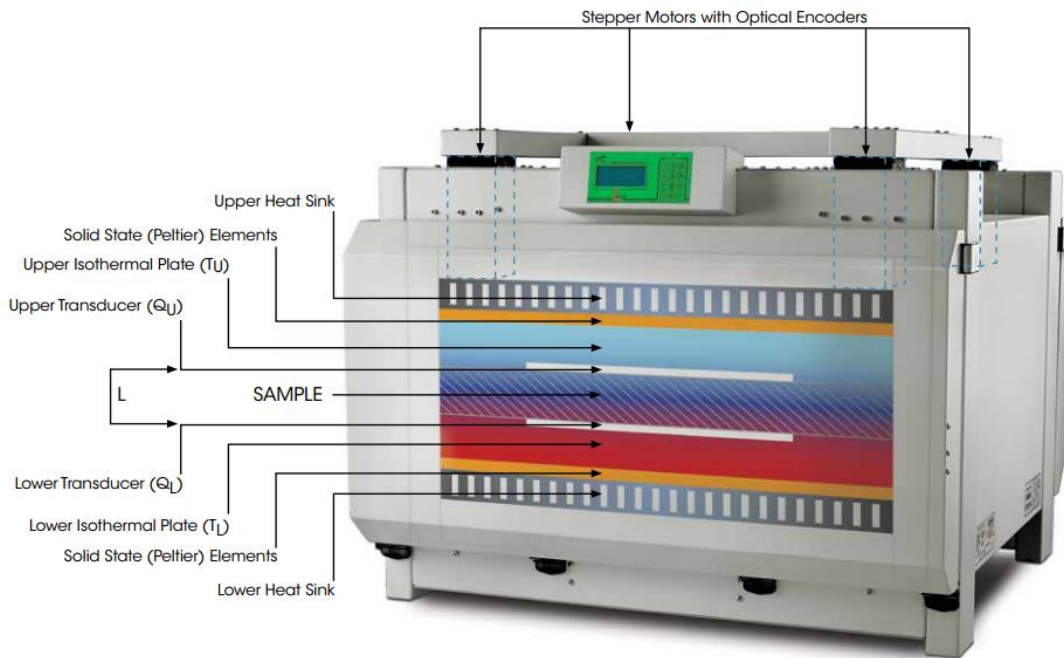


Figura 3. Esquema de funcionamiento del interior del aparato TA Instrument Fox 600 para la medición de conductividad térmica en materiales.

Tabla 1. Ficha técnica del aparato Fox 600

	FOX 600
Espesor máximo de muestra	200 mm
Rango de Temperatura	-15 a 65 °C
Resolución de Temperatura	±0.01°C
Precisión	±1°C
Rango de conductividad térmica	0.001 a 0.35 [W/K·m]
Reproducibilidad	0.5%

Cuatro modelos de los medidores de flujo de calor de la serie FOX acomodan la gama más amplia en dimensiones de la muestra para medir conductividad térmica. Cada instrumento tiene la flexibilidad para probar muestras con dimensiones más pequeñas y las muestras más grandes se pueden probar en la configuración de puertas abiertas sin sacrificar la precisión y exactitud de la medición. En la Figura 3, se puede apreciar que estos aparatos funcionan bajo el mismo principio de un flujo de calor producido por la diferencia de la temperatura entre ambos lados de la muestra a medir.

1.3 Antecedentes y aspectos teóricos

En esta sección se hace un repaso de los conceptos fundamentales relacionados con la transferencia de calor por conducción. Así mismo, se realizó una revisión bibliográfica de los métodos experimentales con los que se realiza la medición de conductividad térmica en materiales.

1.3.1 Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Cuando un cuerpo, por ejemplo, está a una temperatura diferente a la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica (comúnmente denominada transferencia de calor o intercambio de calor) ocurre de tal manera tal que el cuerpo y su entorno alcancen el equilibrio térmico. La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente hacia uno más frío, conforme a lo establecido por la termodinámica.

La conducción de calor, o transmisión de calor por conducción, es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos como se puede apreciar en la Figura 4, sin intercambio de materia. La propiedad física de los materiales que determina su capacidad para conducir el calor es la conductividad térmica k [$\frac{W}{K \cdot m}$]. La propiedad inversa de la conductividad térmica es la resistividad térmica, que corresponde a la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor.

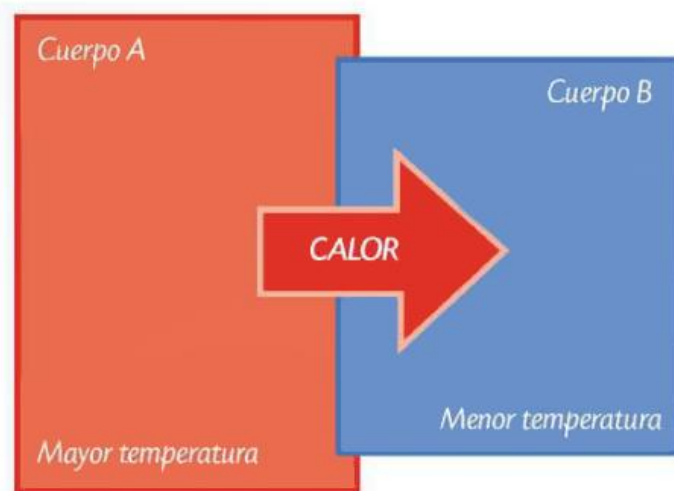


Figura 4. Esquema de transferencia de calor por conducción. Cuando se ponen en contacto dos cuerpos con diferente temperatura, al cabo de cierto tiempo, ambos cuerpos llegan a tener la misma temperatura. En ese momento, los cuerpos han alcanzado el equilibrio térmico

Teniendo en cuenta este principio, se desarrolla el diseño descrito en el capítulo siguiente y se define el modelo matemático que permita determinar la conductividad térmica (k) en materiales sólidos. La ecuación de Fourier describe la relación entre el flujo de calor Q en una placa aislada de longitud Δx (m) de conductividad térmica y de sección transversal A con una diferencia de temperatura ΔT entre los extremos de acuerdo al esquema de la Figura 5.

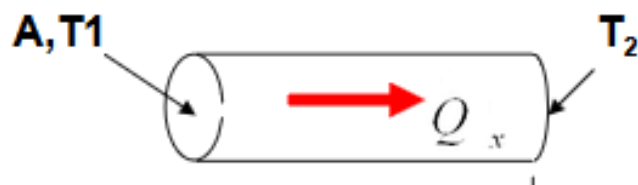


Figura 5. Transferencia de calor por conducción en un cilindro aislado con $T_1 > T_2$ descrito por ecuación de Fourier.

Entonces, el flujo de calor a través de la placa viene dada por la siguiente relación

$$Q = kA \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

De la ecuación 1.1 se puede deducir que la cantidad de energía transferida es constante en cualquier parte de la sección transversal del bloque. Esto también es válido para cualquier fluido (líquidos y gases) entre dos placas separadas por cierta distancia Δx , siempre y cuando se transfiera calor por conducción.

La conductividad térmica es útil para clasificar el carácter térmico del medio. Así mismo, se puede decir que un medio es térmicamente homogéneo si su conductividad térmica k no varía según la posición dentro del mismo medio. Por otro lado, el medio también puede clasificarse térmicamente como isotrópico si la conductividad es la misma en todas las direcciones, o térmicamente anisotrópico si sucede lo contrario.

En la conductividad térmica de materiales en estado sólido, la interacción existente entre los átomos de un arreglo cristalino es fuerte, de modo que el movimiento de éstos se puede interpretar como ondas de sonido que se propagan a través del sólido (fonones).

Como resultado de esta propagación de fonones, se puede considerar que los átomos metálicos dispersan electrones, esta dispersión de electrones es más fuerte a altas temperaturas, por lo que estos tienen una influencia sobre la conductividad térmica. Así mismo, puede haber dispersión sobre la red cristalina, la cual representa una contribución mínima al valor de la conductividad. En particular, la conductividad térmica de los metales es bastante alta, y aquellos metales que son los mejores conductores eléctricos son también, por lo general, los mejores conductores térmicos.

La conductividad térmica aumenta con la velocidad media de las partículas al aumentar el transporte de energía cinética. Sin embargo, la conductividad eléctrica disminuye con el aumento de velocidad de las partículas, porque las colisiones desvían los electrones del camino de transporte de cargas. A continuación se presentan los valores de la conductividad térmica de algunos materiales reportados en la literatura.

Tabla 2. Conductividad térmica W/Km de materiales metálicos reportados en la literatura.

(Fuente: <http://procesosbio.wikispaces.com/Conducci%C3%B3n>)

Material	$k \left[\frac{W}{Km} \right]$
Cobre	385
Aluminio	220
Bronce	150
Zinc	110
Acero Inoxidable	46.5
Porcelana	0,81

Una sustancia que tiene gran conductividad térmica es un buen conductor de calor, en cambio, un material con pequeña conductividad térmica es un mal conductor de calor, por tanto, es un aislante térmico. No hay ninguna sustancia que sea un conductor perfecto (k infinito) o un aislante perfecto ($k=0 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$), pero como se puede ver en la Tabla 2, los metales presentan altos valores de conductividad térmica, dado que el transporte de calor es básicamente contribuido por electrones (Largo & Solana, 2011).

El valor de k también depende de la temperatura, observando la Figura 6, se puede ver que la conductividad térmica cambia a muy altas temperaturas, En muchos casos, la diferencia es aproximadamente lineal. Por lo que, con frecuencia, es posible describir k mediante la ecuación 1.2.

$$k = k_0(1 + \beta(T - T_0)) \quad (1.2)$$

Donde k_0 es el valor de la Conductividad Térmica a la temperatura T_0 que es la temperatura de referencia, T es la temperatura a la cual se está calculando la conductividad térmica k y β es una constante, que es positiva si k decrece con T y su valor generalmente es pequeño.

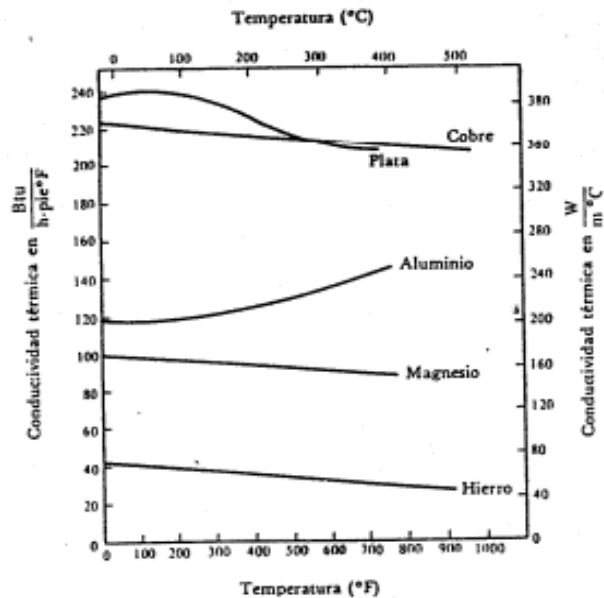


Figura 6. Conductividad térmica metales en función de la Temperatura
Imagen: (Tesis.uson.mx, s.f.)

DISEÑO Y MODELO MATEMÁTICO

2. CAPÍTULO 2

En la primera sección de este capítulo se describe el diseño del aparato, el modelo matemático que permite determinar la conductividad térmica de la muestra y las pérdidas de calor por radiación/convección.

2.1 Diseño

Para el diseño de propuesta se hizo una búsqueda bibliográfica de autores en donde se proponían varios esquemas y montajes de sistemas de calefacción, en donde tomamos como referencia el diseño propuesto por (Burheim, Vie, Pharoah, & Kjelstrup, 2007)

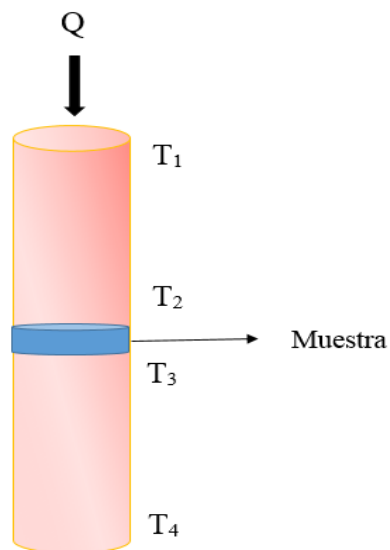


Figura 7. Esquema del primer diseño considerado del módulo..

2.1.1 Propuesta de diseño

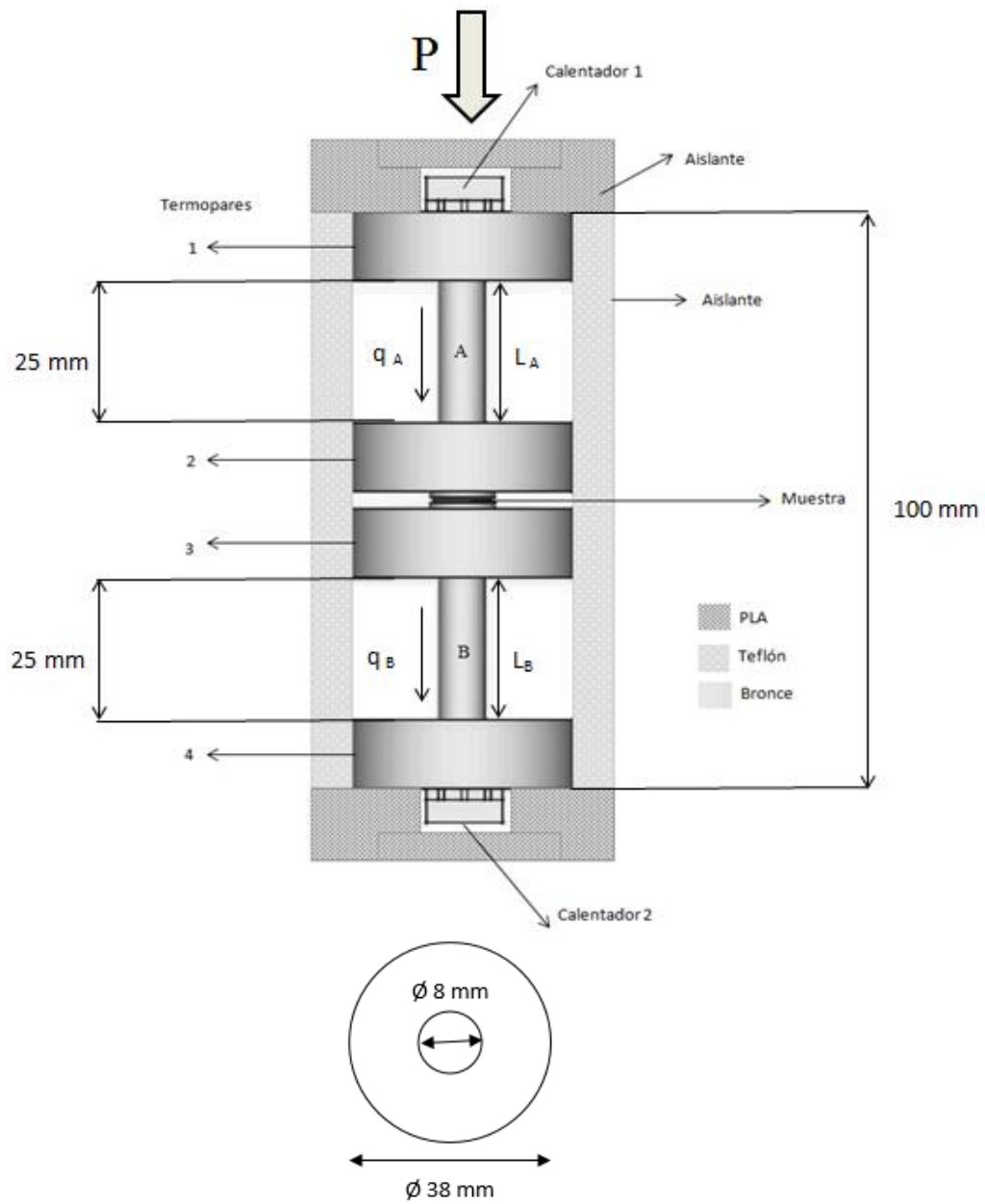


Figura 8. Diseño del módulo para medir conductividad térmica en materiales sólidos.

La estructura principal del diseño actualizado está conformada por dos cilindros concéntricos y simétricos (A) y (B), los cuales están radialmente ensanchados un segmento de 2.5 cm, y en cada extremo se ubican calefactores MOSFET. En la juntura del cilindro A y B se encuentran el contenedor de la muestra. El objetivo de ensanchar una parte del segmento de cada cilindro es para lograr que los sensores de temperatura pueda medir un gradiente de temperatura entre los puntos donde fueron ubicados (1, 2, 3, 4), además de una mejor fijación al aparato impidiendo la movilidad que pueda interferir en las mediciones. Los efectos de pérdida producidos por radiación/convección se desprecian al aislar el dispositivo del medio exterior y se justificará en la siguiente sección. Un armazón de teflón cubre las superficies convexas (manto cilíndrico), que tiene una longitud de 10 cm y espesor 0.65 cm. El otro revestimiento aislante está hecho de un polímero PLA confeccionado en la impresora 3D.

La muestra patrón de cobre tiene 10 mm de diámetro y 1 mm de espesor, la cual se cubrió con pasta de plata en ambas caras para aumentar el contacto térmico. Para determinar el flujo de calor unidimensional se utilizaron cuatro sensores de temperatura (TMP36) en el orden de la Figura 8. Las mediciones hechas por estos sensores son las variables que determinan la conductividad térmica en la muestra, de acuerdo al modelo matemático desarrollado en la siguiente sección.

En los extremos se sujetan calentadores que controladamente aumentan la temperatura, de manera que se genere un flujo de calor estacionario Q desde el extremo a mayor temperatura al de menor temperatura. Para reducir la resistencia térmica, se utilizó un peso de 500 gr.

2.1.2 Modelo Matemático

De acuerdo a la ec.1.1 la cual describe el flujo de calor por conducción en materiales de una longitud $L_A=L_B=L$, de sección transversal de los cilindros simétricos $A_A=A_B=A$ y de conductividad térmica del bronce $k_B=150 \left[\frac{W}{K \cdot m}\right]$. El flujo de calor en cada segmento (q_A , q_B) del dispositivo posee un término q^* asociado a pérdidas de calor debido a radiación/convección.

$$q_A = k_B A \frac{T_1 - T_2}{L} - q^* \quad (0.1)$$

$$q_B = k_B A \frac{T_3 - T_4}{L} - q^* \quad (0.2)$$

Se supone que el flujo de calor a través de la muestra es el promedio del calor superior e inferior:

$$q_m = \frac{q_A + q_B}{2} \quad (0.3)$$

Despreciando el efecto de pérdida de calor asociado a la convección/radiación en este modelo, la conductividad térmica de la muestra:

$$k_m = \frac{Z_m q_m}{(T_2 - T_3) A_m} \quad (0.4)$$

Donde Z_m es el espesor de la muestra, q_m es el flujo de calor a través de la muestra, A_m el área transversal en contacto con el módulo y T_2-T_3 es la diferencia de temperatura de ambas caras de la muestra.

2.1.3 Pérdidas de calor convección/radiación

La ecuación que rige el intercambio de calor por radiación es la conocida ecuación de Stefan-Boltzman, la cual considera que la densidad de flujo de calor por unidad de área es proporcional a la diferencia a la cuarta potencia de temperaturas (en Kelvin) entre superficies. Recuérdese que únicamente considera este tipo de mecanismo de intercambio de calor en presencia de gases, y en este caso práctico, es el aire.

$$q_{radiación} = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_{Ambiente}^4) \quad (0.6)$$

En donde, σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) y ε es el coeficiente de emisión de la superficie en estudio, en este caso se trata de bronce donde $\varepsilon=0,1$ (P., David P., & De Witt, 1999). T es la temperatura promedio de las paredes del aparato y $T_{ambiente}$ la temperatura ambiental. El orden de magnitud resultante en la ecuación 2.6 considera que la temperatura máxima del dispositivo es cercano a 120°C (393°K) y la superficie del segmento A y B es $\sim 10^{-6} \text{ m}^2$. Luego,

$$q_{radiación} \sim 10^{-7} \text{ [W]} \quad (0.7)$$

Por otro lado, la ecuación que rige el intercambio de calor por convección es la conocida ecuación de Newton, la cual considera que la densidad de flujo de calor por unidad de área es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie y la temperatura del fluido (líquido o sólido).

$$q_{convección} = Ah_{convección}\Delta T \quad (0.8)$$

Donde $A \sim 10^{-6} \text{ m}^2$ corresponde a la superficie del segmento A y B en contacto con el aire, $h_{\text{convección}} = 10 \text{ w/m}^2\text{C}$ es el coeficiente de convección del aire, luego:

$$q_{\text{convección}} \sim 10^{-4} W \quad (0.9)$$

Como se mencionó anteriormente, el término q^* corresponde a las pérdidas de calor por radiación/convección. Así,

$$q^* = q_{\text{radiación}} + q_{\text{convección}} \sim 10^{-4} W \quad (2.10)$$

Luego, se considera razonable despreciar las pérdidas de calor producidas por radiación/convección en la ec. 2.3, debido a que la cantidad de calor transferida por conducción a través del dispositivo es de tres órdenes de magnitud sobre las respectivas pérdidas. Cabe mencionar que los efectos de la resistencia térmica por contacto entre la muestra y el módulo no se toman en consideración debido a la presencia de pasta térmica de plata y a la carga ejercida por la prensa.

$$\frac{q_{\text{muestra}}}{q^*} \sim 10^3 \quad (2.11)$$

Para evaluar el perfil de temperatura a través del módulo, se utilizó un modelo matemático axialmente simétrico, a partir de la ecuación de Fourier (1.1) utilizando el método de elementos finitos. Considerando temperatura ambiente a 20°C, presión atmosférica de 1 atm y despreciando las pérdidas de calor por convección/radiación. Se obtiene la simulación del sistema como se puede ver en la Figura 9 .

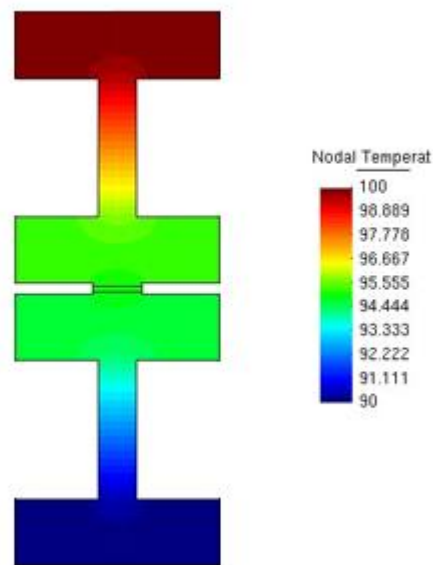


Figura 9. Perfil de temperatura obtenido a partir del modelo matemático propuesto a diferentes temperaturas de set point $T_1=100^\circ\text{C}$ y $T_2=90^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{1-2}=10^\circ\text{C}$).[Simulación: Diego Celentano, Facultad de Ingeniería Mecánica UC].

Como se puede ver en la Figura 9 hay una distribución de temperatura en estado estacionario, a lo largo del módulo. Como se podrá ver más adelante, el modelo entrega una relativamente buena aproximación a la temperatura alcanzada en regiones cercanas a la muestra, con las condiciones de borde mencionadas.

PARTE EXPERIMENTAL

3. CAPÍTULO 3

En este capítulo se describen las piezas maquinadas para el posterior ensamblaje del módulo. Esto considera tanto a los componentes principales, como los componentes secundarios que son los sensores de temperatura y electrónica utilizada. Por último, se exponen los resultados obtenidos tras la realización de ensayos con el módulo y su respectivo análisis, con el fin de determinar el comportamiento y estabilidad global del dispositivo bajo ciertas condiciones óptimas de medición.

3.1 Montaje experimental

El módulo se compone de una estructura principal y componentes secundarias. En esta sección se muestra el montaje experimental ensamblado, y el montaje experimental para realizar los ensayos. La estructura principal de bronce está en la Figura 10 (a), su armazón aislante en la Figura 10 (b) y el montaje experimental completo en la Figura 11.



(a)



(b)

Figura 10. (a) Estructura principal del dispositivo sin recubrimiento aislante. (b) Módulo con armazón aislante y termopares instalados.

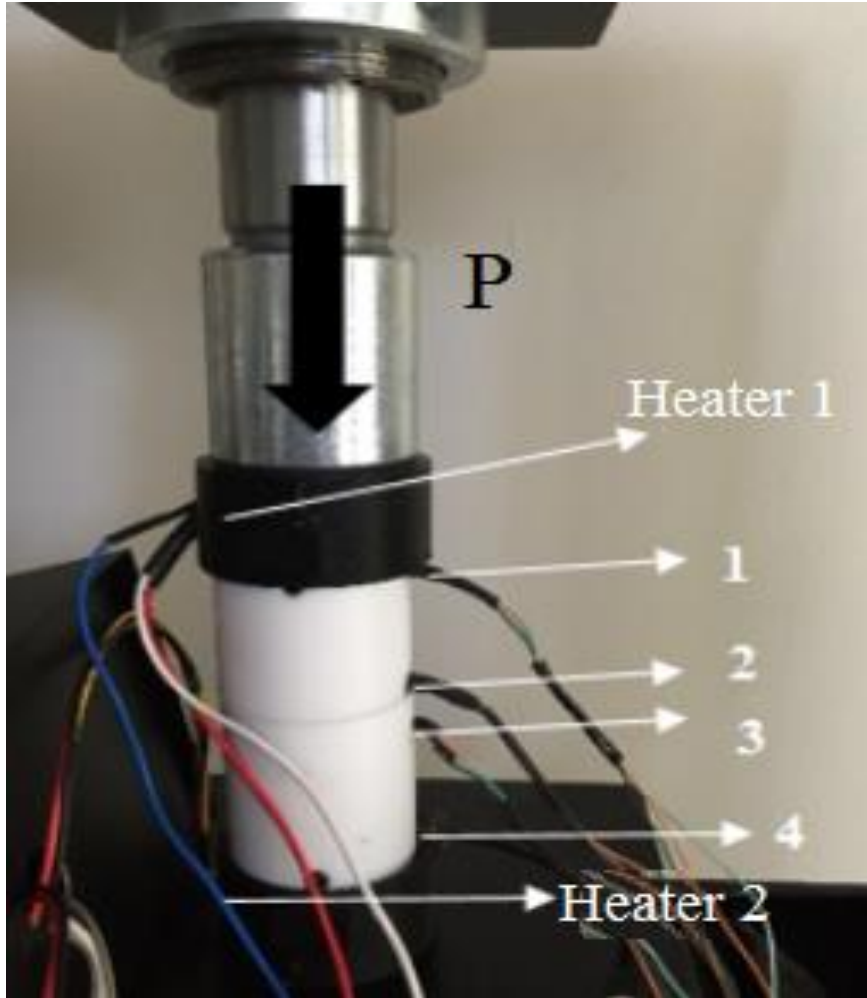


Figura 11. Montaje experimental utilizando una prensa oleo-hidráulica para aumentar el contacto térmico entre el modulo y la muestra.

3.2 Componentes secundarios

Esta sección tiene por objetivo describir técnicamente las componentes secundarias del módulo, incluyendo los esquemas de los circuitos eléctricos acoplados al sistema y el sistema de control PID para la mantener la estabilidad térmica del sistema. El cálculo de los parámetros PID se incluyen en el anexo.

3.2.1 Calefactores

Para calentar el sistema en forma controlada se utilizaron transistores MOSFET IRFZ40 55V/49A/150W para amplificar las señales de corriente entregadas por la red. Estos se ubican en ambos extremos del módulo.

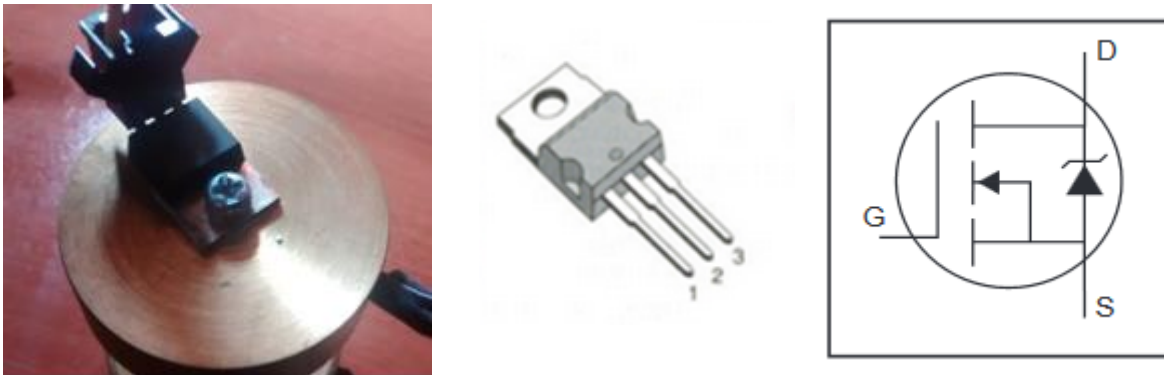


Figura 12. Calentador MOSFET-N IRFZ40 50V/50A/150W ubicado en la parte superior e inferior del dispositivo. Este calentador tiene temperaturas características en función de la corriente de entrada. En donde se alimenta alrededor de 30-40 A. En el dispositivo en cuestión se alimenta con una fuente de 12 V AC para alcanzar temperaturas de hasta 120°C.

Tabla 3. Descripción técnica del calentador utilizada en la etapa de ensamblaje del módulo.

Modelo	V_{DDs}	R_{DS}	I_D
IRFZ40	55V	0.028W	49A

Se decide utilizar este tipo de calentador, ya que al construir un circuito acoplado a la placa ARDUINO, la cual recolecta datos de temperatura, facilita la incorporación del sistema PID para aumentar la temperatura de manera controlada. Más adelante se detallará el circuito utilizado para activar controladamente los calentadores y que, en forma paralela, los sensores van midiendo la temperatura en cada punto del módulo.

El principal inconveniente de este tipo de componente es que tiene conectores metálicos alargados susceptibles a romperse. Esto sucedió en varias oportunidades, ya que al montar y desmontar el módulo había que conectar y desconectar los calentadores del circuito, lo que provocaba que se rompieran sus conectores, y había que cambiar repetidamente los MOSFET. Por eso mismo, se consideró la idea de un *up-grade* utilizando otros calentadores más sofisticados y resistentes a la manipulación.

3.2.2 Sensores de temperatura

Para la medición de temperatura se usaron sensores de temperatura modelo TMP36 en grados centígrados de precisión y bajo voltaje. La salida de voltaje que proporciona es linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius. No requiere ninguna calibración externa para proporcionar una precisión típica de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima del rango de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este sensor es muy fácil de usar, basta con conectarlo a tierra y a un voltaje de 2.7 a 5.5 VDC en una placa ARDUINO y se podrán comenzar a tomar lecturas por el pin V_{out} . El voltaje de salida puede ser convertido fácilmente a temperatura utilizando el factor de escala de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.

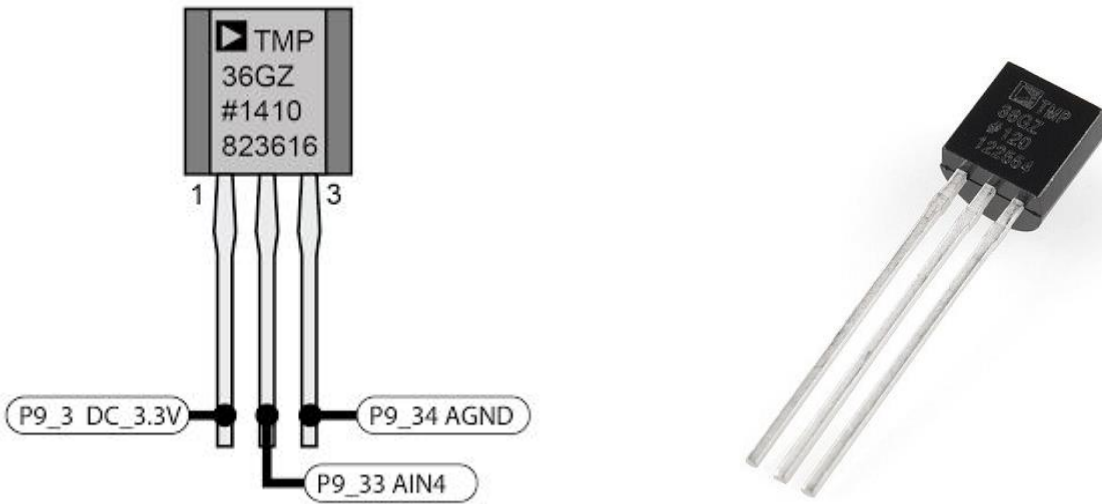


Figura 13. Sensor de temperatura TMP36

Tabla 4. Descripción técnica sensor de temperatura TMP 36

Voltage Input	5.5 VDC
Factor de escala	10 mV/°C
Sensibilidad	±2°C
Error Instrumental	1%

Al igual que los MOSFET, estos sensores de temperatura tienen conectores largos, y para realizar mediciones se necesita manipular bastante el módulo, lo que ocasionaba que los conectores constantemente fallaran porque se rompían. Esto generó un problema, ya que no siempre estaban disponibles y retrasaba el proceso de ensamblaje del dispositivo.

3.2.3 Descripción del circuito eléctrico y conexión del sistema para adquisición de datos

La importancia del control de temperatura está en la estabilidad que tengan las mediciones para lograr un estado estacionario. Se construyó un circuito para la adquisición de datos de temperatura/tiempo. Este se ensambló sobre una placa ARDUINO UNO, la que está conectada al PC mediante salida USB (ver Figura 14). Los sensores TMP36 contienen una entrada de señal (+Vs 5V), el voltaje de salida (V_{out}) conectado a los puertos analógicos de la placa y tierra (GND). A su vez, en los puertos D6 va conectado a una fuente de 12 V en paralelo a un condensador de 470 μ F, y en la salida a tierra de esta fuente se encuentra conectados los puertos D5 y D6. Esto tiene como objetivo darle estabilidad a las lecturas de la temperatura, además sirven como fuente para los calentadores.

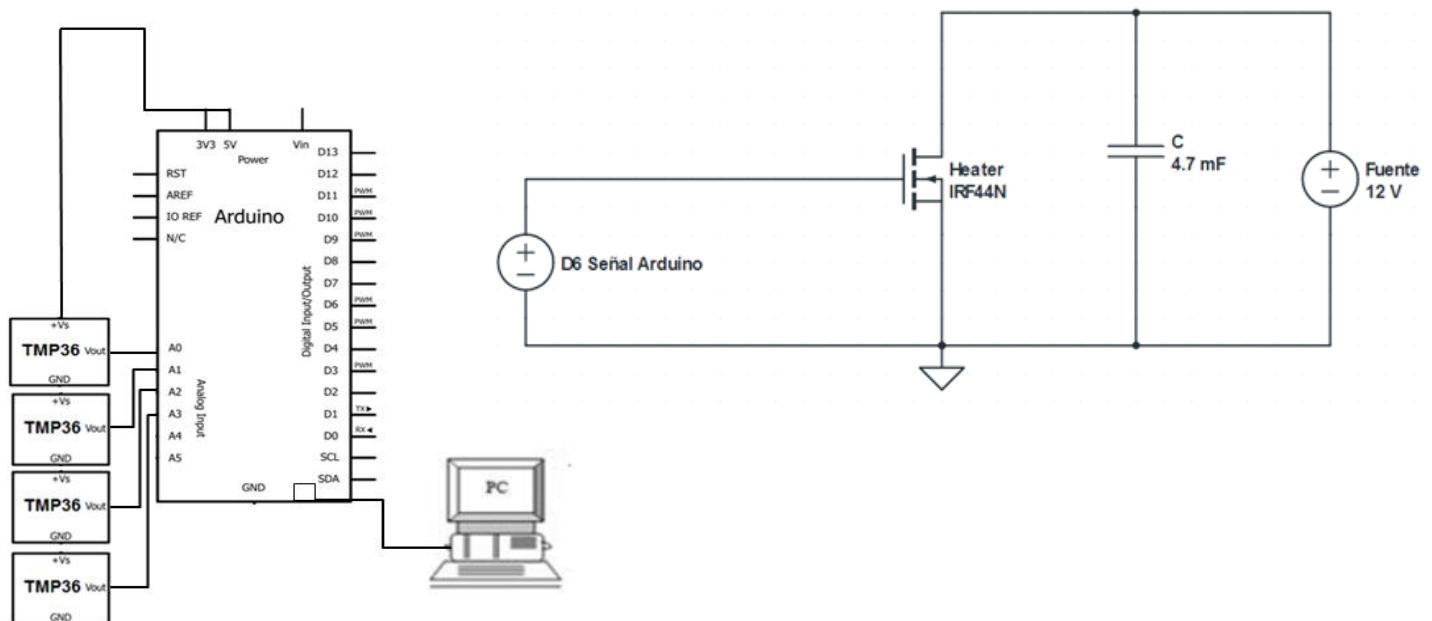
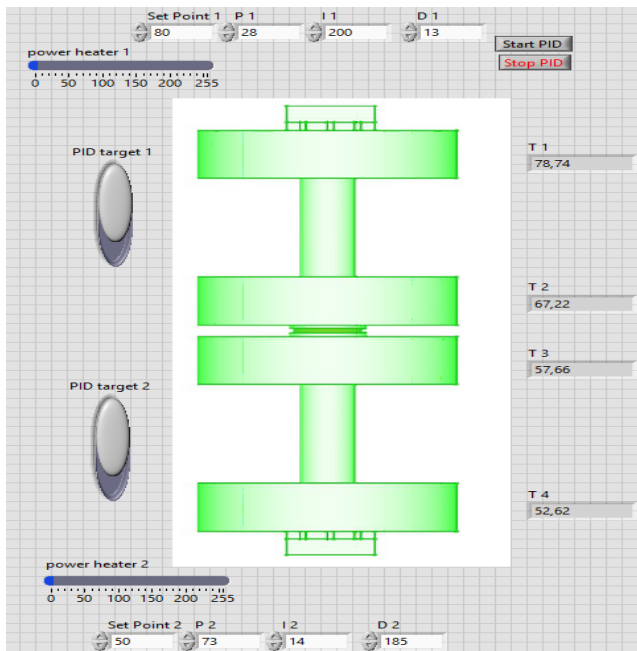


Figura 14. Esquema circuito eléctrico. Placa de adquisición ARDUINO UNO. Sensores TMP36 y calentadores MOSFET IRF44N.

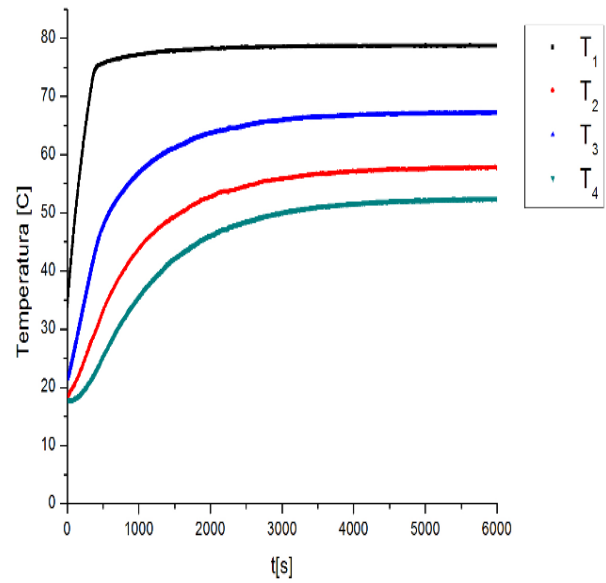
3.3 Descripción experimento típico

Esta sección explica el procedimiento para realizar un experimento considerando el armado del montaje experimental, adquisición de datos al momento de realizar las mediciones y el tratamiento de los datos obtenidos.

- i- Realizar montaje experimental de la Figura 11, ubicando anteriormente la muestra en el módulo (con la pasta de plata por ambos lados de la muestra).
- ii- Conectar los termopares en el orden numerado. Conecte ambos MOSFET-N IRFZ44N exactamente como se indica en la Figura 11.
- iii- Se debe cerrar el módulo colocando el otro extremo térmico en la parte superior y someta el cilindro a una presión axial, como se muestra en la Figura 11.
- iv- Calentar a una temperatura SP los calefactores hasta lograr el régimen estacionario de temperaturas, como se puede ver en la Figura 15 (b).



(a)



(b)

Figura 15. (a) Interface utilizada para la medición de conductividad térmica en régimen estacionario. (b) Perfil de temperatura en LabView de temperatura/tiempo de acuerdo a los parámetros utilizados en la interface. Donde el set-point del calefactor 1 es 80°C y el del calefactor 2 es 50°C.

RESULTADOS

4. CAPÍTULO 4

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados para el proceso de calibración. La relación entre la conductividad térmica registrada por los experimentos γ y el valor nominal k_m ($385 \frac{W}{Km}$) es:

$$k_{muestra} = \alpha k_{Experimental} \quad (3.1)$$

Donde α el factor de calibración del módulo. Los resultados consisten en ver el comportamiento y estabilidad de este factor de calibración con la variación de parámetros térmicos que se indican a continuación.

4.1 Resultados ensayos de calibración

En esta sección se describen los resultados preliminares obtenidos tras una serie de experimentos sistemáticos en el aparato el cual se denomina “módulo sin *up-grade*”, es representado por puntos amarillos en el gráfico de la Figura 16. Por otro lado, para una mejora en cuanto a la manipulación de los instrumentos como a la exactitud de los resultados experimentales, se modificaron los componentes secundarios del dispositivo denominándolo ahora “módulo con *up-grade*”, representado por puntos azules. Los calentadores utilizados en el *up-grade* son calefactores cerámicos y los sensores de temperatura modelo MAX6675 tienen mayor precisión en las lecturas de temperatura, con un 1% de error instrumental y una sensibilidad de 0,5 °C. Además, se agregaron más datos experimentales respecto a los cinco ensayos realizados con el primer “módulo sin

up-grade”. Esto, con el objetivo de clasificar el comportamiento global del módulo bajo diferentes configuraciones térmicas.

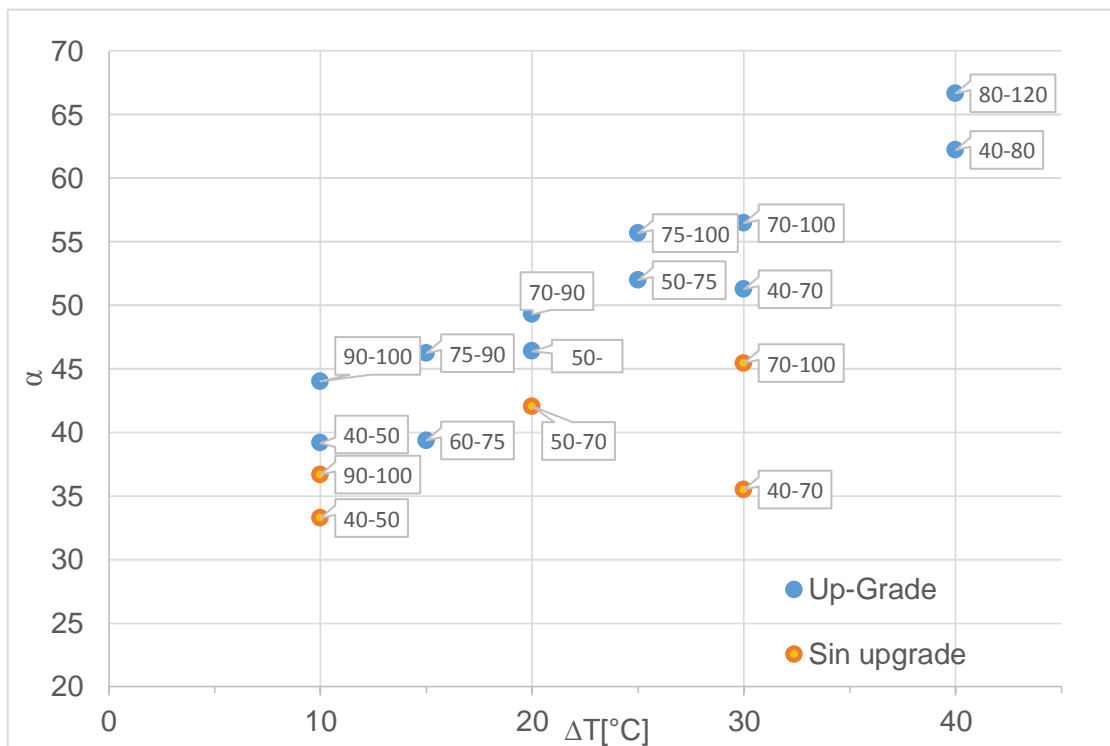


Figura 16. Valores experimentales Factor de calibración α vs ΔT a diferentes intervalos. Los la etiqueta en cada punto corresponde a los Set Point de los calefactores.

Tabla 5. Valores experimentales sin up-grade en los intervalos de temperatura indicados.

SP	ΔT [°C]	α
40-50	10	33,27
90-100	10	36,69
50-70	20	42,06
40-70	30	35,51
70-100	30	45,47

Tabla 6. Valores experimentales con up-grade en los intervalos de temperatura indicados. Tomando los ΔT del módulo sin up-grade.

Rango	ΔT [°C]	α
40-50	10	39,18
90-100	10	44,03
50-70	20	46,40
70-90	20	49,30
40-70	30	51,28
70-100	30	56,48

Tabla 7. Valores experimentales con up-grade en los intervalos de temperatura intermedios a los de referencia.

Rango	ΔT [°C]	α
60-75	15	39,38
75-90	15	46,25
50-75	25	52,00
75-100	25	55,70
80-120	40	66,71
40-80	40	62,25

En la etapa exploratoria del trabajo experimental, los ensayos con el dispositivo sin up-grade (puntos amarillos de la Figura 16) se tomaron como valores preliminares para realizar los ensayos con el modulo modificado (puntos azules de la Figura 16), repitiendo los ensayos con este último en los mismos rangos de temperatura $\Delta T = 10, 20$ y 30°C . Además, en los ensayos posteriores se agregaron otros SP, a saber, $\Delta T=15, 25$ y 40°C para ampliar la matriz de datos experimentales.

Se observa de la Figura 16, que el factor de calibración no es constante en ningún módulo, sino que sigue una tendencia creciente a medida que aumenta la diferencia de temperatura SP en los extremos del módulo.

Se aprecia un desplazamiento en los valores de los ensayos hechos con el módulo modificado por sobre los puntos del módulo sin up-grade, esto se debe a los cambios de instrumentación mencionados anteriormente. Por otro lado, de los ensayos con up-grade se aprecia que para las mismas diferencias de temperatura ΔT entre los SP de los calefactores, los que se encuentran asociados a mayores temperaturas están desplazados hacia arriba con respecto a los SP de temperatura inferior. Los ensayos realizados con el módulo up-grade poseen una desviación estándar porcentual del 7,5% respecto al valor promedio de todas las mediciones.

4.1.1 Análisis del factor de calibración en módulo *up-grade*

Se definieron los datos de la Tabla 7 en rangos altos y bajos de temperatura en función del SP utilizado en los calefactores como se puede ver en la Figura 17. El rango alto corresponde a SP sobre 70°C (puntos rojos) y el rango bajo SP inferiores a 70°C (puntos grises). Se supondrá un crecimiento lineal del factor de calibración α , en función de la diferencia de temperatura entre los calefactores del dispositivo. Entonces, realizando una interpolación en cada rango mencionado, es decir, los valores de rango alto, rango bajo (y finalmente con toda la nube de puntos). Con estas interpolaciones, se pueden estimar los valores esperados de α en los intervalos $\Delta T = 15, 25$ y 40°C que, en primera instancia, se suponen desconocidos para luego compararlos con los valores experimentales obtenidos en los ensayos (puntos amarillos en Figura 17).

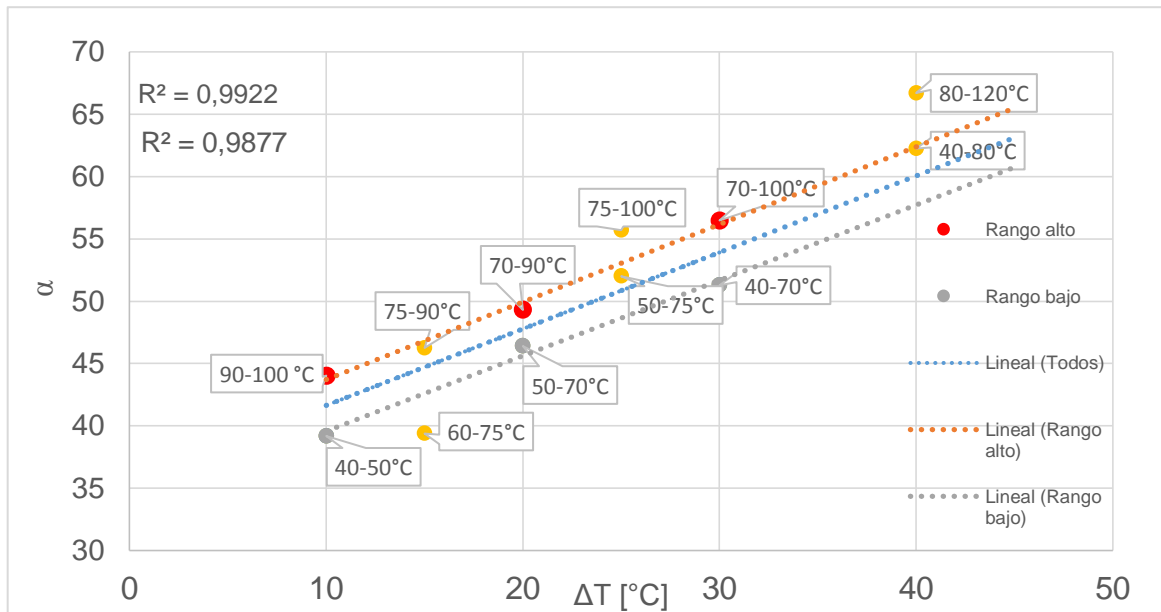


Figura 17. Interpolación con valores experimentales de “rango alto” (color rojo), otra interpolación con toda la nube de puntos, y luego la interpolación con los valores experimentales de “rango bajo” (color gris). Están además los valores experimentales correspondientes a los intervalos medios $\Delta T=15, 25$ y 40°C para su comparar con la interpolación realizada.

Tabla 8. Valor de α obtenido de interpolación en los puntos $\Delta T=15, 25$ y 40°C en los diferentes rangos y el respectivo valor de α experimental.

SP	$\Delta T[^{\circ}\text{C}]$	α interpolación			α experimental
		Rango alto	Rango Bajos	Todos los ptos.	
60-75	15	46,82	42,6	44,71	39,38
75-90	15	46,82	42,6	44,71	46,25
50-75	25	53,05	48,65	50,85	52
75-100	25	53,05	48,65	50,85	55,7
80-120	40	62,39	57,72	60,05	66,71
40-80	40	62,39	57,72	60,05	62,25

Se calculó el error relativo porcentual asociado a cada punto en la Tabla 9 para decidir cuál de las tres interpolaciones posee una mejor aproximación a los resultados experimentales.

Tabla 9. Error relativo porcentual de los valores α experimentales respecto a los obtenidos mediante cada interpolación.

	$\Delta T [^{\circ}C]$	Error relativo porcentual %		
		Rango alto	Rango Bajos	Todos los ptos.
60-75	15	15,9	8,2	11,9
75-90	15	1,2	7,9	3,4
50-75	25	2,0	6,9	2,3
75-100	25	5,0	14,5	9,5
80-120	40	6,9	15,6	11,1
40-80	40	0,2	7,8	3,7

De acuerdo a los resultados expuestos en la Tabla 9, se aprecia una disminución en el error relativo porcentual de los valores experimentales asociados a la interpolación con rango alto de temperatura. Esto se interpreta como que los valores que toma el factor de calibración y, por tanto, la conductividad térmica de la muestra patrón se predicen con mayor exactitud a temperaturas de los set-point sobre los 70°C.

Se determinó el valor esperado de la conductividad térmica de la muestra patrón utilizando las interpolaciones mostradas en la sección anterior del módulo up-grade. Dicho cálculo tiene por objetivo cuantificar la desviación estándar típica en las mediciones de K, calculada respecto a la media de los valores K_{muestra} en cada interpolación.

Tabla 10. Valor de conductividad térmica calculada a partir de la interpolación realizada con el factor de calibración α en el rango alto de set-point. La desviación estándar σ de estos datos es $12.4 \left[\frac{W}{K \cdot m}\right]$. Con error relativo porcentual promedio de 2.5% de la incertidumbre respecto al k nominal del cobre.

Rango	ΔT [°C]	$K_{\text{muestra}} \left[\frac{W}{K \cdot m}\right]$	Error rel. %
90-100	10	382,2	0,7%
75-90	15	389,8	1,2%
70-90	20	390,0	1,3%
75-100	25	366,7	4,8%
70-100	30	382,8	0,6%
80-120	40	360,1	6,5%

Tabla 11. Valor de conductividad térmica calculada a partir de la interpolación realizada con el factor de calibración α en el rango bajo de set-point. La desviación estándar σ de estos datos es $21.8 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$. Con el error relativo porcentual promedio de 4.2% de la incertidumbre respecto al k nominal del cobre.

Rango	ΔT [°C]	$K_{muestra} \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$	Error rel. %
40-50	10	388,8	0,99%
60-75	15	416,4	8,16%
50-70	20	378,5	1,69%
50-75	25	360,2	6,44%
40-70	30	387,9	0,75%
40-80	40	357,0	7,27%

4.2 Resultados comparativos

Después de estos ensayos y el análisis de los resultados expuestos anteriormente, se decidió incorporar un enfriador Peltier modelo TC1-12607 en un extremo del aparato, para evaluar la estabilidad en las mediciones hechas con estas nuevas condiciones de *up-grade*.

Tabla 12. Especificaciones Técnicas del enfriador Peltier TC1-12607.

Tamaño	40x40 mm
Opera desde	0 ~ 15.2 V y 0 ~ 6 A
Consumo de energía máximo	60 W



Figura 19. Montaje Experimental con celda Peltier incorporado.



Figura 18. Celda Peltier modelo TC1-12607

A continuación se presentan resultados obtenidos en la medición de conductividad térmica en muestras de cobre puro, y aleaciones de molibdeno, cobre, titanio. Estas mediciones se realizaron con un enfriador Peltier en un extremo del módulo para explorar una mejora en los resultados anteriores. El valor de la conductividad térmica de las aleaciones en principio se desconoce y se tomará como referencia el comportamiento del cobre. Como una primera aproximación, suponemos que la conductividad térmica de las aleaciones, se relacionan con las proporciones de cada elemento en la muestra.

Tabla 13. Ensayo de calibración con sistema de refrigeración para muestra de cobre puro, a diferentes temperaturas SP.

Temperatura SP	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	$K_{\text{experimental}} [\text{W/K}\cdot\text{m}]$
20-50	30	15,82
22-59	38	15,40
24-69	46	15,85
25-79	55	15,74
27-89	63	15,75
28-99	71	15,33

Graficando los datos de la Tabla 13 se observa el efecto del enfriador en la medición de la conductividad térmica en la muestra de cobre.

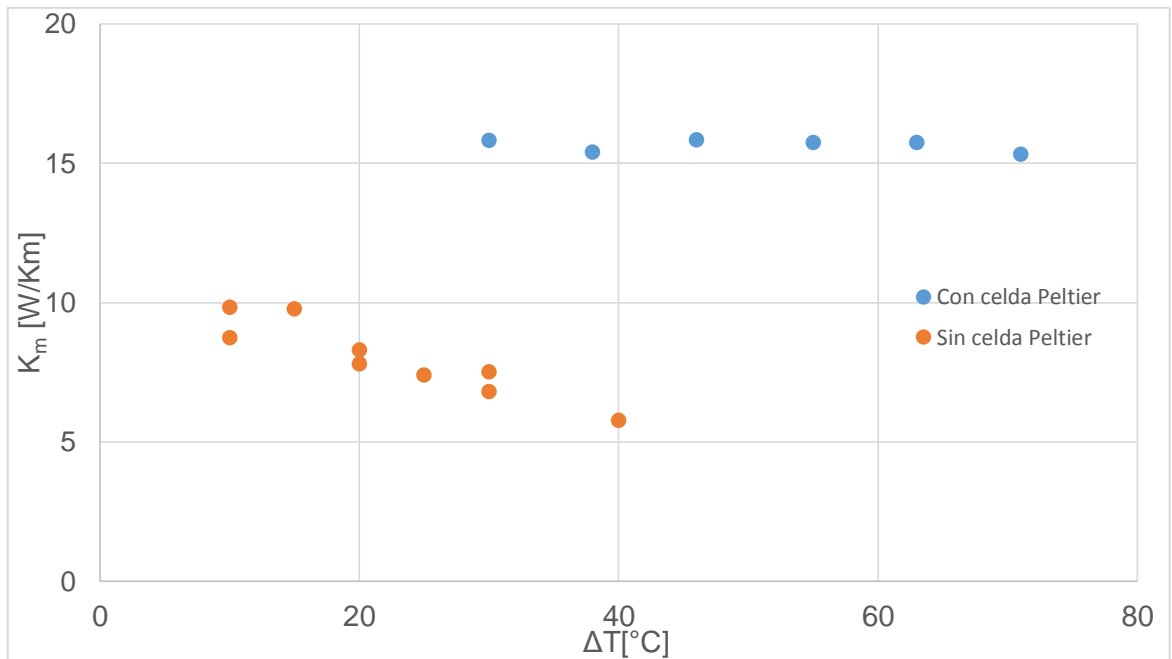


Figura 20. Ensayos de calibración para determinar conductividad térmica de aleaciones con diferentes proporciones de cobre.

En el gráfico de la Figura 20 se pueden apreciar los valores de la conductividad térmica del cobre sin ponderar por el factor de calibración. Los puntos naranjos corresponden a los valores experimentales del aparato sin la celda Peltier, donde se aprecia una variación de acuerdo a la diferencia de temperatura como se mencionaba en la sección anterior. Por otro lado, los puntos azules corresponden a los valores experimentales de la conductividad térmica del cobre sin ponderar por el factor de calibración con la incorporación de la celda Peltier, los cuales poseen una tendencia relativamente constante.

El promedio de $K_{\text{experimental}}$ en el rango de temperatura operativo de 20-120°C tiene un valor de 15,6 con una desviación estándar σ de 0.20. El producto con el factor de calibración obtenido de la ecuación 3.1, se obtuvo el valor de la conductividad térmica del cobre resultando en 385,05 $[\frac{W}{Km}]$. El error es igual a tres veces la desviación estándar ponderado con el factor de calibración α .

CONCLUSIONES

1. Se diseñó, construyó y calibró un dispositivo capaz de medir conductividad térmica de materiales metálicos con régimen estacionario de temperatura y flujo de calor axial.
2. En el modelo matemático, se estableció como variable la temperatura monitoreada por los termopares a lo largo del módulo y los parámetros geométricos que participan en la medición de conductividad térmica. Además, en este modelo se consideraron marginales las pérdidas de calor por convección/radiación.
3. En el *set-up* de dos calefactores en el aparato determinó que el factor de calibración para la muestra de cobre puro no es constante para diferentes rangos de temperatura SP. En donde, se predican mejor la respuesta del aparato a SP superiores a 70°C. Para mejorar esto se realizó un cambio en las condiciones experimentales.
4. La incorporación de un enfriador Peltier en reemplazo un calefactor en el dispositivo, entregó resultados más estables y precisos. Lo que implica, que el tratamiento de los datos experimentales es menos complejo. Es decir, consideramos que el rango operativo del módulo con la celda Peltier es de 20-120°C, y valor de la conductividad térmica del cobre entregado es 385,05 [$\frac{W}{Km}$].

Trabajos Futuros:

1. Evaluar respuesta en otros materiales metálicos, además de aislantes como cerámicos y en semiconductores.
2. Acoplar un sistema de medición de voltaje, para caracterizar eficiencia en materiales termoeléctricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burheim, O., Vie, P., Pharoah, J., & Kjelstrup, S. (2007). *Ex situ measurements of through-plane thermal conductivities in a polymer electrolyte fuel cell*. Kingston, Canada: ELSEVIER.

Choy, C. L., Kwok, K. W., Leung, W. P., & Lau, F. P. (1994). *Sci.PartB:Polym.Phys.32(8)*.

E.Bell, L. (Abril de 2016). Cooling, Heating, Generating Power and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems.

García, M. (2009). *Estudio del efectro de aleantes sobre la conductividad térmica del cobre*. México DF.

International Rectifier. (s.f.). Obtenido de

<http://www.infineon.com/dgdl/irfz44n.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b3575220b>].

Largo, J., & Solana, J. (2011). *Física Estadística*. Universidad de Cantabria.

M.Robert, H. (26 de Mayo de 1981). A Transient Hot Wire Thermal Conductivity Apparatus for Fluids. *Journal of research of the national Bureau of Standards*.

P., F., David P., & De Witt. (1999). Fundamentos de transferencia de calor.

RaySky Scientific Instruments Co. Ltd. (s.f.). *Labgeni*. Obtenido de <http://www.labgeni.com/>

Redrejo, J. L. (s.f.). Desarrollos de Sistemas de Regulación y Control . En I. S. Almendralejo.

Spinnler, M. (2004). Heat Mass Transfer. *ELSEVIER*, 1305-1312.

Terry M, T., & Subramanian, M. (2006). *Thermoelectric ;aterials Phenomena, and Applications: A Bird's Eeye View*.

Tesis.uson.mx. (s.f.). Obtenido de [<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7609/Capitulo3.pdf>]

ANEXO

Ajustes parámetros PID

El método utilizado para determinar los parámetros del controlador PID fue mediante el método del escalón o Ziegler – Nichols, el cual consiste en observar la respuesta del sistema a una señal de control del 100% en forma de escalón, elaborando un gráfico de la temperatura vs. Tiempo. Este se considera suficiente en el momento en que la temperatura ya no crece con el máximo de velocidad que pudo alcanzar cuando la potencia es máximo y se tiene $I=0$ y $D=0$. Entonces se obtendrá de esta forma un gráfico similar al de la Figura 17. (Redrejo)

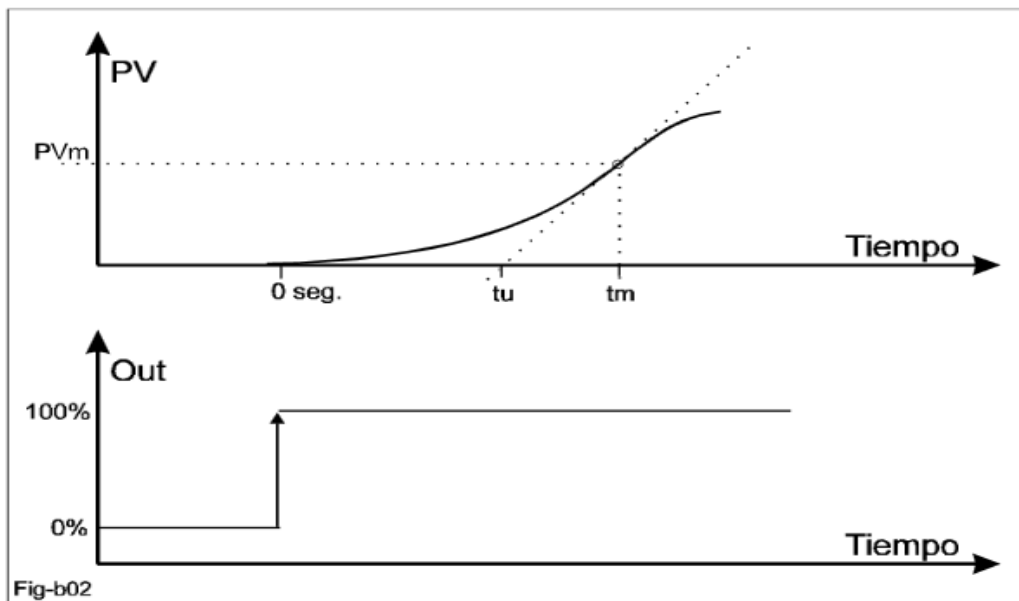


Figura 21. Proceso ajuste de parámetros PID mediante el método del escalón, en donde se realiza mediciones de PVm (Process Value measured) vs Tiempo. En este trabajo se presentan mediciones de temperatura en el tiempo.

Sean (t_m, PV_m) las coordenadas de ese punto. Se traza una recta tangente al punto (t_m, PV_m) y que corte el eje del tiempo en un tiempo T_u . Luego, para determinar los parámetros óptimos:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{PV_m}{t_m - t_u} \quad (5.1)$$

$$P = \frac{1.7V_{m\acute{a}x}t_u}{S_p} \quad (5.2)$$

$$I = \frac{5000}{t_u} \quad (5.3)$$

$$D = \frac{t_u}{2} \quad (5.4)$$

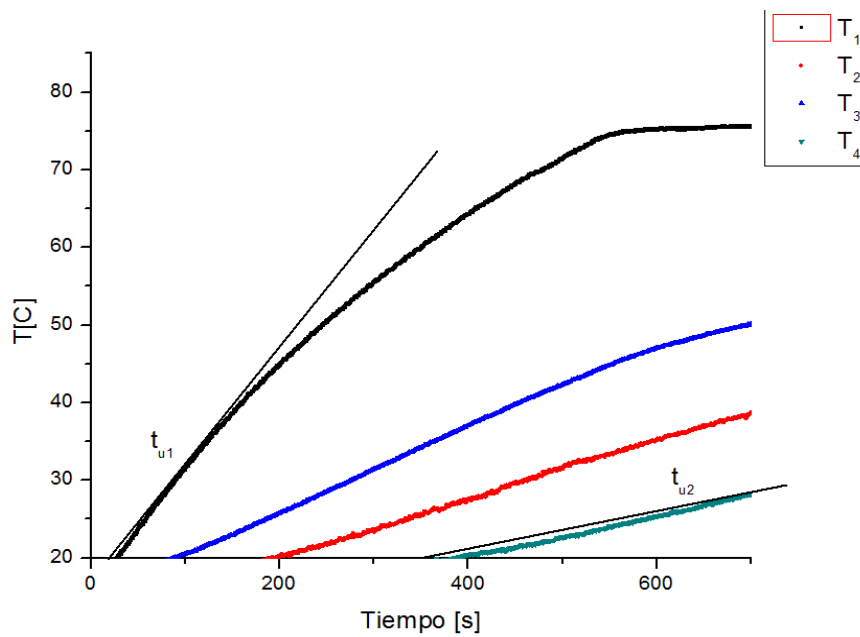


Figura 22. Gráfico T [°C] vs tiempo [s]. Se determinó las coordenadas (t_m, PV_m) y t_u, en los sPara los sensores superior (t_{u1}) e inferior (t_{u2}).

Tabla 14. Valores de los puntos (t_m , PV_m) y t_u en ambos calefactor de acuerdo a la Figura 18.

	PV_m [°C]	t_m [s]	t_u [s]
Calefactor ₁	33	91	25
Calefactor ₂	28	68	370

Reemplazando los valores expuestos en la Tabla 18 en las ecuaciones (5.1), (5.2), (5.3) y (5.4) se obtienen los parámetros PID del sistema.

Tabla 15. Parámetros PID obtenidos a partir del método del escalón con datos experimentales. Para el módulo sin-upgrade.

	P	I	D
Calefactor ₁	27	200	13
Calefactor ₂	73	14	185

Valoración económica en la construcción del aparato

En la sección anterior se observó que los dispositivos similares, fabricados por empresas dedicadas al rubro, ofrecen módulos de alta gama tecnológica a precios bastante elevados. Parte de la motivación de este trabajo es poder construir un aparato, con una menor versatilidad, pero que pueda medir conductividad térmica en materiales sólidos con un menor costo asociado a su construcción respecto a los valores de referencia mostrados anteriormente. En la Tabla 19 se indica el ítem que compone el montaje total del dispositivo con el valor monetario asociado a cada uno.

Tabla 16. Costo de fabricación del módulo, en el cual se incluyen el valor de los materiales estructurales tales como el bronce y el aislante. Sensores y componentes electrónicos y el valor del maquinado de las piezas para realizar el ensamblaje del dispositivo.

	Costo económico
Materiales Estructurales: Estructura de bronce Armazón aislante de Teflón	\$50.000
Sensores y Componentes electrónicos Tarjeta recolección datos ARDUINO Sensores de Temperatura Calefactores cerámicos Conectores CLK Implementos de laboratorio	\$200.000
Mano de obra Taller mecánico Asesoría en diseño e implementación de PID.	\$200.000
Valor total	\$450.000

Cabe recordar que este trabajo está evaluando la respuesta de un prototipo de dispositivo restringido en cuanto a versatilidad, esperando tener una respuesta relativamente similar a los dispositivos ofrecidos en el mercado. Sin embargo, a lo que apunta esta comparación, es que con una cantidad significativamente menor de dinero es posible obtener la conductividad térmica de materiales sólidos, o al menos se puede evaluar la respuesta del dispositivo para materiales metálicos.