

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

*“Diseño y Construcción de un Equipo Medidor de Conductividad Térmica”*

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Kevin Roy Alvarado Vera

Jonathan Ricardo Rueda Palacios

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**Año: 2018**

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, especialmente a mi hermano perruno que ya no está en este mundo. Todo este esfuerzo es para ti.

*Kevin Alvarado Vera*

Quiero dedicar esta tesis a Dios por acompañarme en cada uno de los pasos que doy, pese a las adversidades que se presentan en el camino, nunca permitió que me rindiera. A mis padres, en especial a mi madre Beatriz Palacios por su apoyo incondicional para seguir avanzando, a mis familiares por siempre insistir en mi superación profesional, Ericka Villota mujer maravillosa quien está siempre ahí en las buenas y en las malas, a mi compañero de tesis por toda la dedicación y apoyo.

*Jonathan Rueda*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a familiares que me apoyaron todo el tiempo, especialmente a mi padre, madre y hermanos. También agradezco a todos esos amigos que me dieron ánimos de seguir y profesores que forjaron mi camino.

*Kevin Alvarado Vera*

Quiero comenzar agradeciendo a la ESPOL por haberme abierto las puertas para ser un profesional, agradezco a mis maestros por cada uno de sus consejos y conocimientos compartidos.

A mis compañeros, amigos que fui haciendo en mis años de estudios, gracias por las experiencias vividas. A mis padres por su apoyo económico e incondicional.

Agradezco a Air Clean S.A por prestarnos sus instalaciones.

Finalmente agradezco a mis tutores y coordinador de tesis por la paciencia y por dejar plasmar mis conocimientos e investigación, para que en un futuro puedan ser compartidos con otras personas.

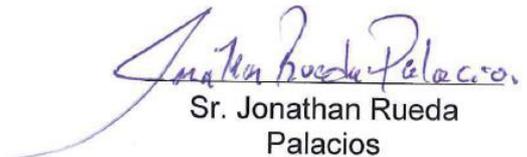
*Jonathan Rueda*

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Kevin Roy Alvarado Vera* y *Jonathan Ricardo Rueda Palacios*, damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio, con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Sr. Kevin Alvarado Vera



Sr. Jonathan Rueda  
Palacios

## EVALUADORES



Ing. Rodolfo Paz Mora, MSc.



Ing. Victor Velasco Galarza, Mg.



Ing. Mayken Espinoza, PhD.



Ing. Guillermo Soriano, PhD.

## RESUMEN

En el presente documento se desarrolla el proyecto de Diseño y Construcción de un Equipo Medidor de Conductividad Térmica en Estado Estable de Placa Plana. Este método de medición que se utilizó es la técnica de mayor eficiencia para realizar ensayos sobre materiales aislantes térmicos; para el efecto, se construyó un prototipo cuyo diseño consta de cuatro conjuntos fundamentales conforme a las características establecidas: calentamiento, enfriamiento, control y adquisición de datos, estructura y soporte.

Al respecto, la construcción del equipo es sencilla, de fácil manejo y de mediciones confiables, cuyo método se basó en la *Ley de Fourier* aplicada en la conducción de calor en estado estable. Por medio de resistencias de Ni- Cr, se alimentó de calor a las placas de aluminio de la sección calentadora, mientras que en la sección de enfriamiento, su temperatura disminuye debido al trabajo que realizan las celdas de Peltier.

Con Arduino Mega 2560 se controlaron los parámetros de alimentación del sistema, así como se establecieron de manera programada las limitaciones del equipo, para que el proceso de ensayo se realice bajo los requerimientos que se establecieron.

Mediante PLX-DAQ, se realiza una conversión de lenguaje de programación de Arduino a gráficas y tablas de Excel.

En cuanto a su diseño general se utilizaron las normas ISO 8302, ASTM C177 Y BS EN-12667, las cuales sirvieron de guía al momento de establecer los requerimientos y limitaciones; finalmente, se desarrolló el equipo medidor de conductividad térmica y se realizó la validación haciendo un ensayo sobre poliuretano rígido, el cual dio un coeficiente de conductividad de  $0.026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  con un error del 7%.

**Palabras Clave:** Aislante térmico, placa plana caliente, resguardo térmico, conductividad térmica, estado estable.

## **ABSTRACT**

*In this document, the Design and Construction of a Thermal Conductivity Measurement Equipment in a Stable Flat Plate State is developed, this measurement method that will be used, is the most efficient technique to perform tests with thermal insulating materials, a prototype will be manufacture whose design constituted of four fundamental groups according to the established characteristics: Heating, cooling; control and acquisition of data; structure and support.*

*The construction of the equipment is single, easy to use and reliable measurements, whose method was based on the Fourier Law applied in the conduction of heat in a stable state. By means of Ni-Cr resistances, the aluminum plates of the heating section were fed with heat, while in the cooling section their temperature is lowered by the work carried out by the Peltier cells.*

*With Arduino Mega 2560, the power parameters of the system were controlled, as well as the limitations of the equipment were established, so that the testing process was carried out under the requirements that were established. By means of PLX-DAQ, which is a data acquisition system, an Arduino programming language conversion is made to Microsoft Office Excel charts and tables.*

*In the general design, the ISO 8302, ASTM C177 and BS EN-12667 standards were used, which served as a guide when establishing the specified requirements and limitations.*

*Finally, the equipment was developed, and the validation was carried out by making a test on rigid polyurethane, which gave a conductivity coefficient of  $0.026 \text{ W / m} \cdot \text{K}$  with an error of 7%.*

**Keywords:** *Thermal insulation, hot flat plate, thermal guard, thermal conductivity, steady state.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del proyecto .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General .....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Conducción de calor .....	3
1.4.2 Placa plana .....	5
1.4.3 Medición de conductividad térmica.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. METODOLOGÍA .....	9
2.1 Metodología para diseñar el Medidor de Conductividad Térmica.....	9
2.2 Diseño conceptual.....	12
2.2.1 Alternativas de Diseño .....	13
2.2.2 Determinación de Requerimientos para la selección del medidor .....	18
2.2.3 Selección de alternativas para el diseño del equipo medidor. ....	19

2.2.4	Requerimientos específicos de diseño .....	25
2.2.5	Combinación de componentes para constituir el medidor. ....	27
2.3	Diseño detallado.....	34
2.3.1	Cálculos Térmicos .....	37
2.3.2	Diseño y cálculo de Celdas Peltier.....	48
2.3.3	Diseño de Estructura y Soporte .....	51
2.3.4	Sistema electrónico y de adquisición de datos .....	56
2.3.5	Procedimiento de utilización del equipo.....	57
CAPÍTULO 3.....		60
3.	RESULTADOS y ANÁLISIS.....	60
3.1	Calibración con relación a la interface del Microcontrolador Arduino .....	60
3.2	Validación del Equipo Medidor de Conductividad Térmica.....	61
3.3	Análisis de resultados.....	64
3.3.1	Análisis de resultados de validación .....	64
3.3.2	Análisis de errores .....	66
3.4	Análisis de Costos.....	68
3.4.1	Costos de diseño y fabricación .....	68
3.4.2	Análisis de Costos de operación.....	71
CAPÍTULO 4.....		72
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
4.1	Conclusiones.....	72
4.2	Recomendaciones.....	73
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

## **ABREVIATURAS**

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
C.O.P	The coefficient of performance (coeficiente de desempeño)
EN	EUROPÄISCHE NORM (Norma Europea)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GHP	Guarded Hot Plate
ISO	International Organization for Standardization
LABET	Laboratorio de ensayos térmicos

## SIMBOLOGÍA

$A_t$	Área de flujo de la sección medidora
$b$	Ancho de tubo cuadrado
$cm$	Centímetro
$Cu$	Cobre
$Cr$	Cromo
$^{\circ}C$	Grados Celsius
$dT$	Diferencial de temperatura
$dx$	Diferencial de longitud en dirección del flujo de calor
$e$	Espesor del espécimen (muestra a medir)
$E$	Tensión eléctrica
$\dot{E}$	Energía térmica
$F$	Fuerza
$h$	Convección térmica
$H$	Flujo de calor
$H_a$	Altura
$I$	Corriente
$k$	Conductividad térmica
$K$	Kelvin
$L$	Longitud
$m$	Metro
$mm$	Milímetro
$mg$	Miligramo
$Ni$	Níquel
$P$	Potencia eléctrica
$P_A$	Presión
$P_e$	Perímetro
$q''$	Flujo de calor por unidad de superficie (densidad superficial de calor)
$r$	Distancia radial
$R''_{LC}$	Resistencia de contacto
$R$	Resistencia eléctrica
$\acute{R}$	Resistencia eléctrica por unidad de longitud
$R_t$	Resistencia térmica

T	Temperatura
$T_m$	Temperatura media
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
V	Voltio
W	Vatio
Y	Espesor de unidad de calentamiento
$\Omega$	Ohm
$\Delta T$	Diferencia de temperatura
$\Delta x$	Diferencia de longitud en dirección del flujo de calor
$\nabla T$	Gradiente de temperatura
t	Espesor de perfiles de estructura
$I_z$	Momento de inercia
$M_z$	Momento ejercido por F
d	Distancia brazo del momento de F
$\sigma_{max}$	Esfuerzo máximo
$\eta$	Factor de seguridad
$S_y$	Esfuerzo de fluencia
$\bar{X}$	Media aritmética
s	Desviación estándar de la muestra
n	Cantidad de datos de la muestra de mediciones
t	Espesor de estructura
$A_{te}$	Área sólida transversal del tubo rectangular

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Conducción de calor a través de un espécimen plano de espesor $\Delta x$ .....	4
Figura 1.2 Transferencia de calor a través de una pared plana. ....	6
Figura 2.1 Metodología para el diseño del medidor de conductividad térmica (1/3).....	10
Figura 2.2 Metodología para el diseño del medidor de conductividad térmica (2/3).....	11
Figura 2.3 Metodología para el diseño del medidor de conductividad térmica (3/3).....	12
Figura 2.4 Esquema del medidor de conductividad térmica con geometría esférica. ....	14
Figura 2.5 Vista de corte longitudinal del medidor de conductividad térmica .....	16
Figura 2.6 Medidor de conductividad térmica de placa plana.....	18
Figura 2.7 Esquema de componentes principales del equipo de medición .....	35
Figura 2.8 Estructura base del equipo medidor .....	37
Figura 2.9 Esquema de parrilla calentadora en sección principal de medición .....	38
Figura 2.10 Esquema de parrilla calentadora en sección de resguardo térmico .....	39
Figura 2.11 Esquema de parrilla calentadora en sección de resguardo auxiliar.....	39
Figura 2.12 Relación de triángulo para obtención de la longitud de alambre Ni-Cr.....	40
Figura 2.13 Esquema de conjunto parcial del equipo medidor .....	42
Figura 2.14 Esquema resistivo de conjunto parcial del equipo.....	43
Figura 2.15 Gráfico de curva del coeficiente de desempeño (Celdas Peltier) .....	49
Figura 2.16 Gráfico de desempeño estándar (Celdas Peltier).....	50
Figura 2.17 Gráfico de desempeño estándar (Celdas Peltier).....	51
Figura 2.18 Esquema de la fuerza aplicada sobre la muestra.....	52
Figura 2.19 Detalle donde se realiza el cálculo del esfuerzo.....	53
Figura 2.20 Sección rectangular del tubo a utilizar .....	53
Figura 2.21 Esquema de traslado de fuerza hacia la base.....	54
Figura 3.1 Curva de conversión de voltaje a interface de programación.....	61
Figura 3.2 Gráfica de Conductividad térmica vs. Tiempo (ensayo con poliuretano).....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Matriz de evaluación de criterios de selección .....	21
Tabla 2.2 Resultado de ponderación de criterios de selección.....	21
Tabla 2.3 Alternativas de medidores de conductividad térmica en estado estable.....	22
Tabla 2.4 valores de calificación para las alternativas.....	22
Tabla 2.5 Calificación de alternativas .....	22
Tabla 2.6 Evaluación y selección de alternativa mediante ponderaciones .....	23
Tabla 2.7 Sistemas de medición de conductividad térmica. ....	24
Tabla 2.8 Sugerencias para límites en tamaño de equipo.....	25
Tabla 2.9 Requerimientos específicos para el diseño del equipo.....	26
Tabla 2.10 Tabla morfológica para selección de los componentes del equipo.....	27
Tabla 2.11 Ponderación en la selección de placa metálica .....	28
Tabla 2.12 Matriz de selección de material para la placa caliente.....	29
Tabla 2.13 Tabla de ponderación para selección de resistencia eléctrica.....	30
Tabla 2.14 Matriz de selección de resistencia eléctrica.....	30
Tabla 2.15 Ponderación de criterios para selección de aislante eléctrico .....	31
Tabla 2.16 Calificación de los tipos de aislantes eléctricos .....	32
Tabla 2.17 Ponderación para la selección de sistema de adquisición de datos.....	33
Tabla 2.18 Calificación del sistema de adquisición de datos.....	33
Tabla 2.19 Listado de componentes y conductividad térmica de cada material.....	46
Tabla 2.20 Datos técnicos de geometría y temperatura del sistema de medición.....	47
Tabla 2.21 Datos para el cálculo de valores de operación de la celda de Peltier.....	48
Tabla 2.22 Detalles de material utilizado para la estructura de soporte del equipo.....	52
Tabla 2.23 Componentes del sistema de control y adquisición de datos .....	56
Tabla 3.1 Conversión de voltaje a interface de programación.....	60
Tabla 3.2 Datos de validación de ensayo en poliuretano .....	62
Tabla 3.3 Media aritmética y desviación estándar.....	65
Tabla 3.4 Variables estadísticas obtenidas del ensayo con poliuretano.....	65
Tabla 3.5 Resultado del ensayo sobre poliuretano rígido.....	66
Tabla 3.6 Error porcentual de la validación del equipo .....	67
Tabla 3.7 Incertidumbre de las mediciones .....	68
Tabla 3.8 Lista de materiales y componentes para la construcción .....	69
Tabla 3.9 Lista de servicios de proceso .....	70

Tabla 3.10 Costos de mano de obra .....	70
Tabla 3.11 Costo total de construcción del equipo .....	70
Tabla 3.12 Costo del consumo energético .....	71

## ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Ensamblaje del equipo
- PLANO 2 Lista de materiales para el ensamblaje del equipo
- PLANO 3 Estructura de soporte del equipo
- PLANO 4 Soporte de la unidad calentadora
- PLANO 5 Placas de aluminio para la unidad calentadora y enfriadora
- PLANO 6 Parrillas de Ni-Cr
- PLANO 7 Aislamiento térmico
- PLANO 8 Esquema de la parte electrónica del equipo

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

En el uso razonable de los recursos energéticos utilizados en distintas áreas de investigación, construcción civil y climatización, se deben realizar ensayos sobre las muestras para determinar la calidad de los materiales, por lo que se requiere diseñar y construir un equipo medidor de conductividad térmica.

Con respecto a las muestras que son analizadas, en algunos casos se desconocen las características físicas, tales como: conductividad y resistencia térmica.

Los equipos de este tipo tienen precios elevados en el mercado, esto es un limitante en las áreas que requieren de su uso, adicionalmente se debe agregar que, en el país no se cuentan con ofertas de empresas que fabriquen esta clase de medidores, por lo que se recurre a la importación.

Los distintos laboratorios donde se realizan investigaciones con materiales que constituyen sistemas de conversión de energía y de construcción civil con mejoras de eficiencia térmica, tienen la problemática de no contar con una amplia disposición de estos equipos para una oportuna medición de conductividad térmica, ya que el tiempo de medición en algunos materiales puede ser de hasta 24 horas.

### 1.2 Justificación del proyecto

La mayoría de los materiales que son utilizados y creados en el país, son del área de construcción civil, las empresas desean mejorar sus productos siempre en búsqueda del confort para los clientes. incluyendo el ahorro energético. Con esto se trata de explicar que se requieren mediciones de características físicas, entre ellas, la conductividad térmica.

Con respecto a las mediciones, las cuales se practican en laboratorios especializados de la ESPOL, se realizan investigaciones utilizando probetas de distintos materiales; sin embargo, no cuentan con disponibilidad oportuna del equipo necesario para realizar los ensayos de medición, ya que como se ha mencionado con anterioridad, para obtener resultados confiables, hay mediciones que tardan hasta aproximadamente un día.

Se debe considerar la dificultad para adquirir este tipo de equipo por los precios elevados y su fabricación fuera del país. Por lo mencionado, se propone diseñar y construir el prototipo de un equipo, para medir la conductividad térmica en estado estable.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar y construir el prototipo de un equipo medidor, para determinar la conductividad térmica en estado estable de placa plana.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar la estructura del soporte, postura y fijación.
2. Realizar la selección de los componentes, para el sistema de placa caliente y de igual manera para el de placa fría.
3. Construir un prototipo con materiales localmente accesibles, considerando un razonable costo-beneficio en cuanto a efectividad de medición requerida y resultados confiables.
4. Implementar un sistema de control de temperatura.
5. Anexar un sistema de adquisición de datos.
6. Realizar pruebas de mediciones en materiales con características conocidas, para la validación del equipo.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Conducción de calor

La transferencia de energía desde partículas mayormente energizadas en una sustancia hacia partículas adyacentes con menos energía, se le llama Conducción; la misma que puede darse en materiales sólidos, líquidos y gaseosos.

En materiales en estado sólido, la conducción resulta por la combinación de las vibraciones de las moléculas; además, del transporte de energía por parte de los electrones libres (Incropera, Lavine, Dewitt, & Bergman, 2008). En conclusión, la conducción de calor se da desde especímenes de mayor a menor temperatura, donde bajo condiciones de estado estable y unidimensional sin generación de energía, el flujo de calor es una constante en la dirección de la transferencia.

#### Conducción unidireccional de calor en estado estable

La razón de la conducción de calor que atraviesa un entorno va a depender de la geometría que tenga este y del material que esté fabricado, de igual manera del gradiente de temperatura que atraviesa en él, es decir:

$$H = -k \cdot A_t \cdot \nabla T \quad (W) \quad (1.1)$$

Donde:

H=Flujo de calor (W)

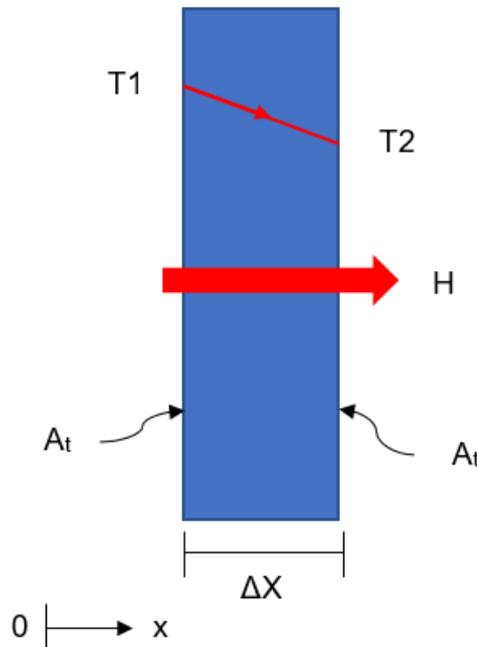
$A_t$ = Área de transferencia de calor ( $m^2$ )

$k$ : Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )

$\nabla T$ : Gradiente de temperatura ( $K/m$ )

La Ecuación 1.1 mostrada es llamada **Ley de Fourier**, se utiliza para determinar la conducción de calor, donde la constante **k** es la conductividad térmica, la cual da proporcionalidad a la ecuación; **k** es la medida del material que indica la capacidad de conducir calor y

$\nabla T$  es el gradiente de temperatura (la razón de cambio de temperatura con respecto a la dirección del flujo de calor).



**Figura 1.1 Conducción de calor a través de un espécimen plano de espesor  $\Delta x$ .**

Fuente: (Cengel, 2007)

### **Conductividad térmica**

La conductividad térmica es una característica propia de cada material; los materiales acumulan calor en distintas formas, debido a esto se ha determinado la propiedad de calor específico  $C_p$ , la cual indica la capacidad que posee un material para guardar energía térmica. Así mismo, la conductividad térmica  $k$  es la dimensión que posee un material para trasladar calor (Cengel, 2007).

A causa de una mayor conductividad térmica, la conducción de flujo de calor aumenta, para un gradiente de temperatura preestablecido; es necesario recalcar, que es mayor la conductividad de un material sólido en comparación con un líquido o gaseoso.

### 1.4.2 Placa plana

Para la conducción de calor en una placa plana, la temperatura se encuentra en función solo de la coordenada  $x$ , y el calor se transfiere únicamente en esa dirección al ser analizado teóricamente.

Se debe considerar las condiciones dentro de la placa plana; en primer lugar, determinar la distribución de temperatura, ya que con esta se puede extraer la tasa de transferencia de calor por conducción.

Para determinar la distribución de temperatura en la placa, se debe resolver la ecuación de calor con las apropiadas condiciones iniciales y de borde en estado estable; asumiendo que el flujo se da en una sola dirección, en este caso en la dirección  $x$ , la ecuación da como resultado lo siguiente:

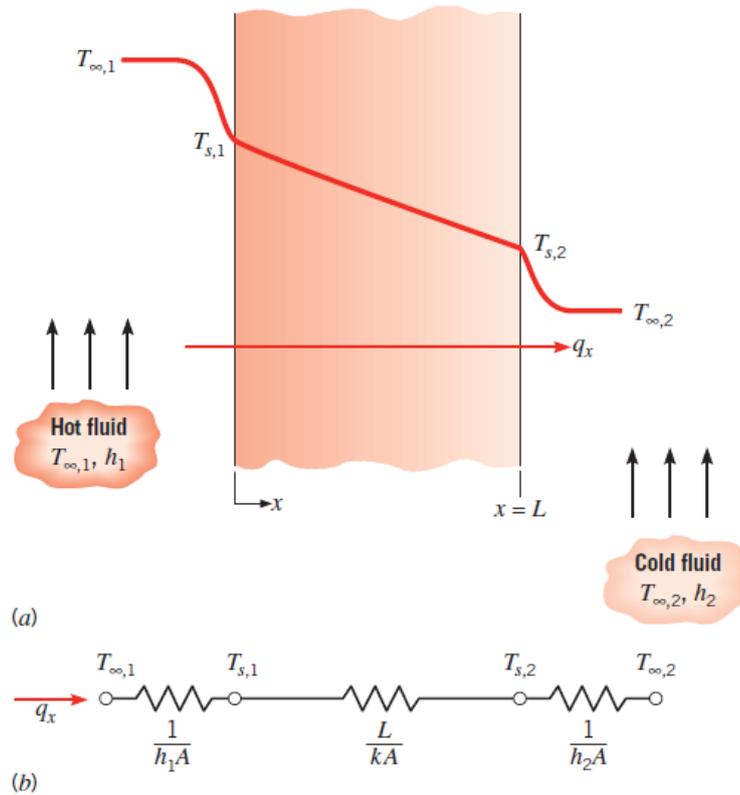
$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (1.2)$$

Donde:

$dT$ : diferencial de temperatura (K)

$dx$ : diferencial de longitud en dirección del flujo de calor (m)

$k$ : Conductividad térmica (W/m·K)



**Figura 1.2 Transferencia de calor a través de una pared plana.**

(a) distribución de temperatura. (b) Circuito de equivalencia térmica.

Fuente: (Incropera, Lavine, Dewitt, & Bergman, 2008)

De aquí, a partir de la Ecuación (1.1) se infiere que, en estado estable, para la conducción unidireccional en el sistema de un espécimen plano sin una generación de calor interna, se considera al flujo de calor como si el mismo fuera una constante e independiente de  $x$ ; además, se asume constante la conductividad térmica.

### Resistencia de contacto

La realidad de la resistencia finita de contacto se da en principio a los efectos ocasionados por la rugosidad de los materiales. Los puntos de contacto se mezclan con pequeños espacios que están llenos de aire; por lo cual, esto interfiere en la conducción como tal.

$$R''_{LC} = \frac{T_A - T_B}{q''} \quad (1.3)$$

Donde:

$R''_{Lc}$ : Resistencia de contacto ( $m^2 \cdot K/W$ )

$T_A$ ;  $T_B$ : Temperaturas de los especímenes en contacto (K)

$q''$ : Flujo de calor por unidad de superficie ( $W/m^2$ )

Esta resistencia se la puede reducir en los sólidos, aumentando el área de contacto, incrementando la presión de las juntas o disminuyendo la rugosidad del acople. También pueden ser utilizadas sustancias intersticiales cuya conductividad térmica exceda la del aire, grasa térmica y metales blandos son materiales recomendados para cumplir este objetivo (Cengel, 2007).

### 1.4.3 Medición de conductividad térmica

#### **Método de medición en estado estable**

La temperatura de un sistema en estado estable se mantiene mediante una fuente de calor constante, en la práctica se utiliza un calentador eléctrico. La diferencia de temperatura se la mide a una distancia de separación entre dos puntos del espécimen que se analiza.

Los métodos de medición más comunes en estado estable son: los axiales y radiales, estos dan la clasificación de geometría en la que se realiza la transferencia de calor mediante conducción.

La metodología de medición, haciendo uso de flujo axial, ya tiene mucho tiempo de haber sido establecido. Este método ha logrado proporcionar consistencia en resultados más precisos.

#### **Placa caliente con resguardo térmico**

Este método es adaptable y utilizado generalmente para la medición de conductividad térmica de materiales aislantes, polímeros, vidrio y cerámicos. Pueden operar en rango de temperatura entre 80 K y 800 K con incertidumbre de 2% en las mediciones de conductividad térmica (Buck & Rudtsch, 2006).

Este instrumento de medición se compone de dos placas; una caliente y una fría, este conjunto a su vez lleva un sistema de resguardo calentador y el respectivo aislamiento térmico, con lo que se asegura de rodear la placa caliente principal para evitar la pérdida de calor a los alrededores, lo que da un entorno adiabático.

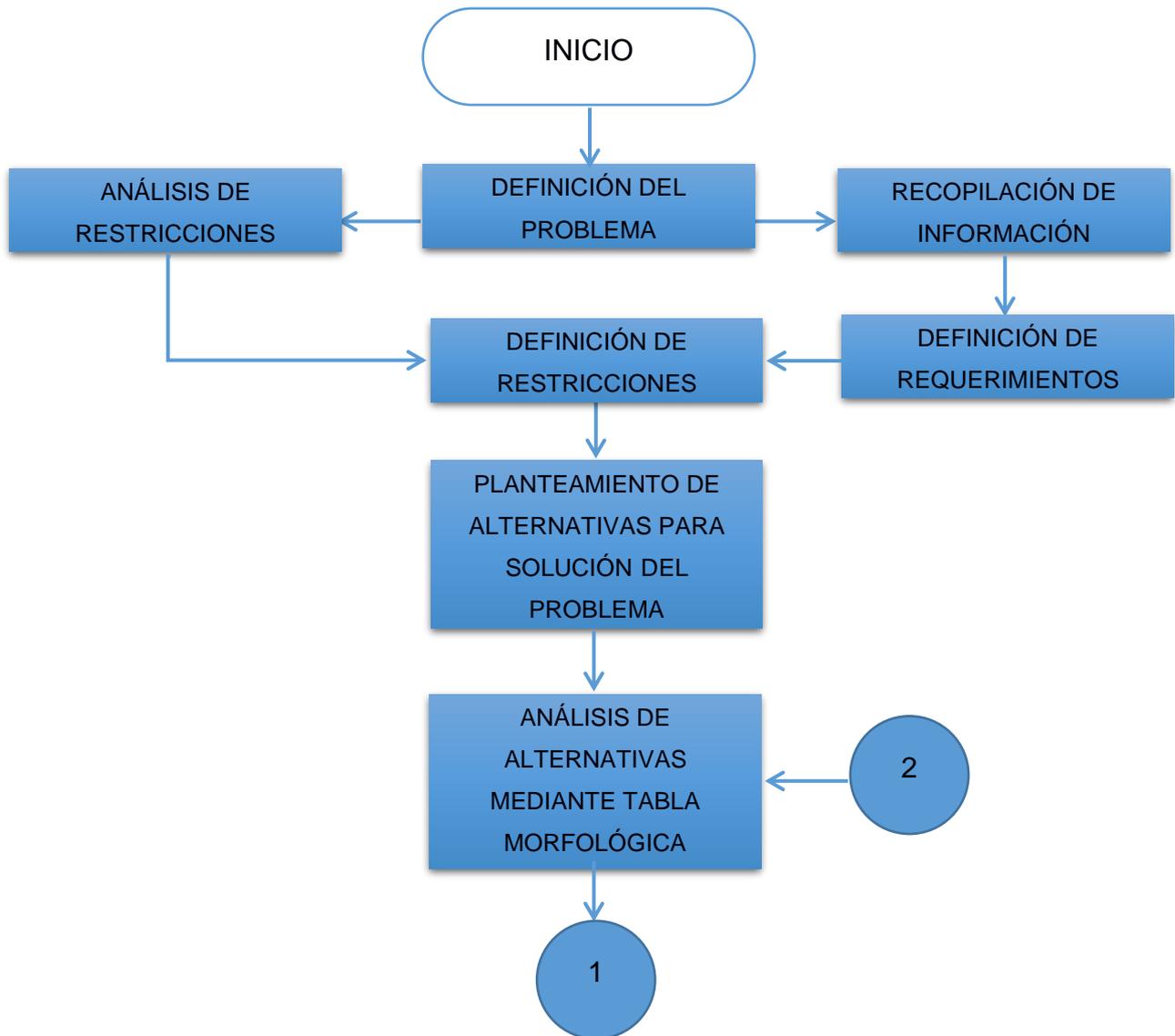
# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

Para la elaboración del equipo de medición de conductividad térmica, se debe contar con una amplia gama de componentes, para lo cual se diseña la parte mecánica; estructural, térmica; además, se selecciona el sistema de control de temperatura y adquisición de datos. Por lo tanto, en el capítulo presente se considera la selección y el diseño conceptual de los diversos componentes que conforman el equipo de medición.

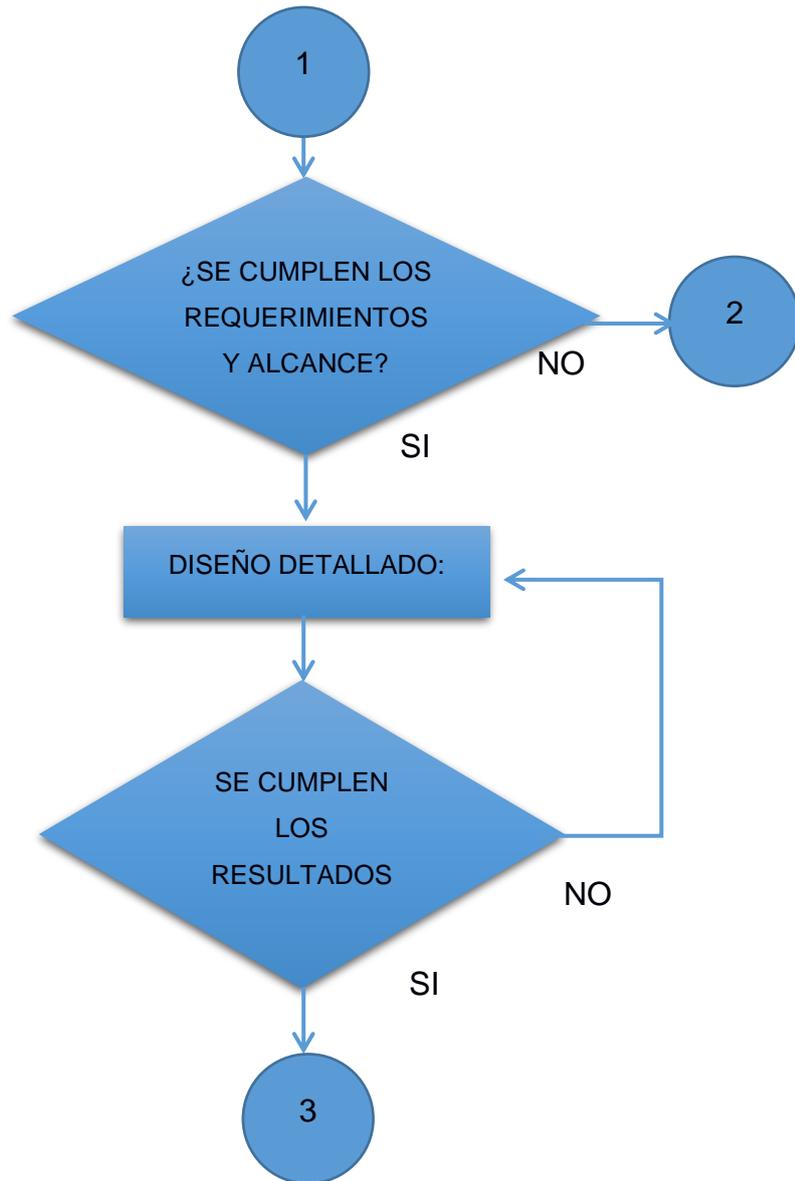
### 2.1 Metodología para diseñar el Medidor de Conductividad Térmica

Se describe a continuación el proceso que se emplea en el diseño del equipo de medición de conductividad térmica en estado estable. La mayoría de los textos guías en diseño en ingeniería, expresan que los problemas a resolver son de amplio rango, con esto se trata de explicar que existen varias soluciones para el diseño en mención, sin embargo, se debe guiar en base a una metodología adecuada para realizar el diseño, de esta forma se puede lograr el alcance esperado y cumplir con los objetivos propuestos.



**Figura 2.1 Metodología para el diseño del medidor de conductividad térmica (1/3)**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)



**Figura 2.2 Metodología para el diseño del medidor de conductividad térmica (2/3).**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)



**Figura 2.3 Metodología para el diseño del medidor de conductividad térmica (3/3).**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

## 2.2 Diseño conceptual

### Introducción

La ley de Fourier da solución en su ecuación diferencial, ya que se emplean condiciones adecuadas de borde en la misma, esto da acceso a que se solucione el problema de conducción de calor en estado estable y unidireccional, en lo que se refiere a mediciones sobre geometrías cilíndricas, esféricas y planas.

Con el conocimiento de las soluciones de la ley de Fourier, estas se podrán utilizar en dispositivos de toma de medidas de conductividad térmica; en las

geometrías previamente mencionadas para esto, el requisito principal es que la transferencia de calor debe estar en estado estable y unidireccional (Jakob, 1964).

### **2.2.1 Alternativas de Diseño**

En esta parte del capítulo se toma en consideración las alternativas de diferentes medidores de conductividad térmica en estado estable, para obtener la solución del problema que se planteó en la parte inicial de este documento, se debe diseñar un equipo de medición de conductividad térmica, que esté constituido de manera básica por cuatro sistemas: el de estructura y soporte; sistema de transferencia de calor, control de temperatura y el sistema de adquisición de datos.

Antes de enunciar las alternativas, es necesario enfatizar que, en la conducción en estado estable unidireccional, el flujo de calor es constante a lo largo del recorrido, esto se debe a que en este estado no hay acumulación ni pérdida de calor dentro del espécimen, o a su vez la temperatura en cada punto de él es constante en el tiempo; se asume también que la conductividad térmica  $k$ , es independiente de la temperatura para establecer la condición antes mencionada (Mcbe, Smith, & Harriot, 2007).

A continuación, se detallan las alternativas de medidores de conductividad térmica en estado estable.

#### **Medición de conductividad térmica, en un cuerpo contenedor con geometría esférica**

Esta forma de medición data del año 1860 y fue planteado por Pécelet, el aparato de medición (Figura 2.4), se compone de dos esferas de metal concéntricas, las cuales tienen un espesor delgado para evitar la capacidad calorífica del conjunto; las piezas de este tipo de medidor son móviles para la facilidad del montaje y desmontaje para cada análisis que se realiza. En la parte interior consta con una esfera más pequeña, la cual contiene una

resistencia que aporta el calor y temperatura requerida para realizar la medición de conductividad térmica del espécimen que se coloca dentro de la esfera mayor y sobre la esfera pequeña. Cabe recalcar que el material a testear debe ser homogéneo, para ello se realiza la medición de temperatura  $T_1$  y  $T_2$  a una distancia radial  $r_1$  y  $r_2$  con los respectivos medidores, en la mayoría de los casos termocuplas, de manera que se consigue la conductividad térmica con la siguiente ecuación:

$$H = E * I = k * 4\pi * \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{1+r_1} - \frac{1}{1+r_2}} \quad (2.1)$$

Donde:

$E$ : Tensión aplicada en conectores de la resistencia (V)

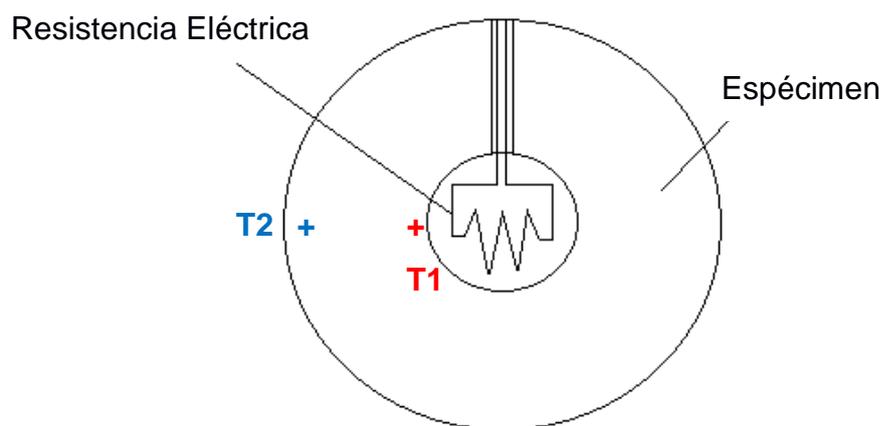
$I$ : Corriente que viaja a través de la resistencia (A)

$H$ : Fflujo de calor (W)

$T_1, T_2$ : Temperaturas medidas en el espécimen (K)

$r_1, r_2$ : Distancias radiales de medición de temperatura (m)

$k$ : Conductividad térmica (W/m· K)



**Figura 2.4 Esquema del medidor de conductividad térmica con geometría esférica.**

Fuente: (Cedillo, 2015)

### **Medición de conductividad térmica en un cuerpo contenedor con geometría cilíndrica**

Este método de medición es similar al que se mencionó anteriormente. Utilizando un par de cilindros de manera concéntrica, se coloca entre estos el espécimen a ser analizado, como se puede apreciar en la (Figura 2.5). La resistencia calefactora se coloca dentro del cilindro de menor diámetro.

Se utiliza termocuplas para tomar las mediciones de la diferencia de temperatura, este método es empleado para realizar mediciones de conductividad térmica en materiales aislantes: sólidos, líquidos, gases, materiales metálicos a elevadas temperaturas y de construcción civil.

La disimilitud que este posee con el método anterior está en la pérdida de calor en los extremos de los cilindros. La forma de dar solución al problema es: haciendo que estos cilindros concéntricos sean lo suficientemente largos, calentando toda la longitud y tomando las mediciones de conductividad en el eje neutro de los cilindros concéntricos.

La temperatura del calentador se la obtiene midiendo de manera indirecta la resistencia eléctrica y conociendo el coeficiente de variación con respecto a la temperatura.

Entonces, el valor de la conductividad térmica se obtiene despejando  $k$  de la siguiente ecuación:

$$H = E * I = k * L * 2\pi * \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (2.2)$$

Donde:

$E$ : tensión aplicada en conectores de la resistencia (V)

$I$ : Corriente que viaja a través de la resistencia (A)

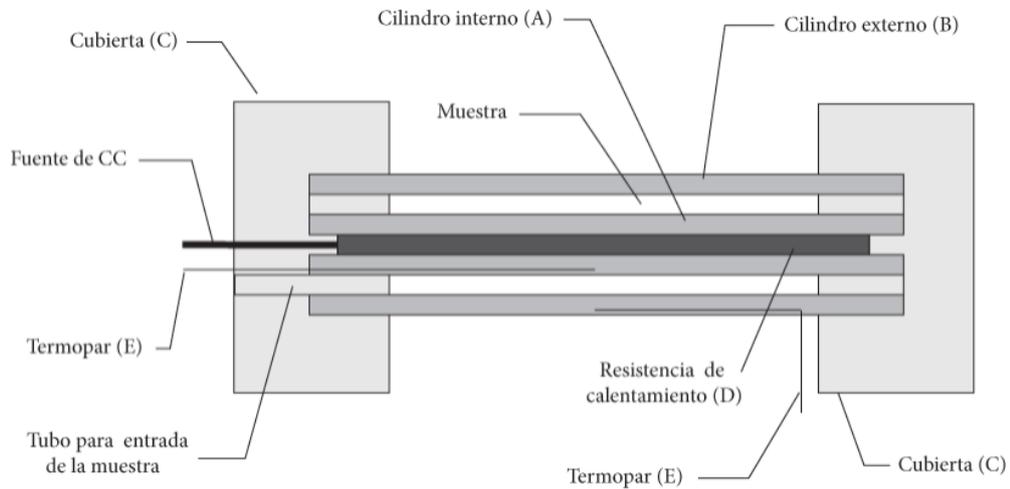
$H$ : Flujo de calor (W)

$T_1, T_2$ : Temperaturas medidas en el espécimen (K)

$r_1, r_2$ : Distancias radiales de medición de temperatura (m)

$L$ : Longitud del cilindro (m)

$k$ : Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )



**Figura 2.5 Vista de corte longitudinal del medidor de conductividad térmica**

Medidor de conductividad térmica con geometría cilíndrica

Fuente: (Bellet, Sengelin, & Thieriot, 1975)

### **Medición de conductividad térmica haciendo uso de geometría plana**

El método de medición de conductividad térmica que se muestra a continuación es generalmente utilizado para obtener la conductividad térmica en estado estable, para materiales sólidos ya sean metálicos o no.

El equipo consta de una estructura metálica, de conveniencia aislada eléctricamente y de un tamaño apropiado; en la parte superior va una placa calefactora, en la parte inferior se ubica una placa fría y en el medio de las placas mencionadas, se coloca el material que se desea analizar (Jakob, 1964).

Este tipo de medición con geometría plana se complementa con un resguardo térmico (placa caliente con resguardo o GHP por sus siglas en ingles), el cual lo hace el método más eficaz para obtener la conductividad

térmica de materiales aislantes. GHP precisa que la diferencia de temperatura sea constante encima de un espesor que se conoce de una probeta, esto tiene como objetivo primario controlar el flujo de calor que atraviesa la muestra. La importancia que tiene el resguardo térmico en este método es asegurar el flujo de calor unidireccional. Luego de ser alcanzada la estabilidad térmica, las placas caliente y fría tienen temperaturas estables, entonces la conductividad térmica se logra al obtener la diferencia de temperatura a través del espesor de la probeta (Yüksel, 2010).

La conductividad térmica se determina desde la inserción de los valores de flujo de calor, la diferencia de temperatura a través del grosor del espécimen y mediante el área de transferencia de calor, cabe recalcar que estas mediciones se deben realizar bajo el perfil de estado estable en toda la muestra. Para esto se hace uso de la **Ley de Fourier** que se muestra a continuación en su ecuación resultante:

$$H = E * I = k * A_t \frac{T_1 - T_2}{e} \quad (2.3)$$

Donde:

E: Tensión aplicada en conectores de la resistencia (V)

I: Corriente que viaja a través de la resistencia (A)

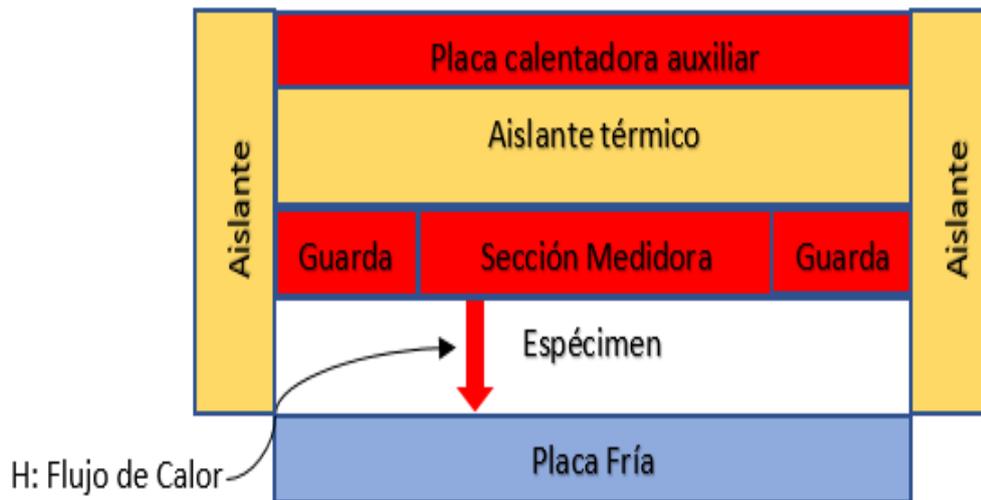
H: Flujo de calor (W)

$T_1, T_2$ : Temperaturas medidas en el espécimen (K)

e: Espesor de la muestra (m)

k: Conductividad térmica (W/m· K)

$A_t$ : Área de transferencia de calor (m<sup>2</sup>)



**Figura 2.6 Medidor de conductividad térmica de placa plana.**

Fuente: (Czichos, saito, & Smith, 2006)

## 2.2.2 Determinación de Requerimientos para la selección del medidor

En el diseño conceptual, es de gran interés definir los requerimientos, así como las restricciones que se deben considerar para la realización de este, en el caso del diseño de un aparato de medición de conductividad térmica, estas exigencias y limitaciones servirán de guía durante el proceso de diseño. A continuación, se plantean los requerimientos de acuerdo con la especificación del problema:

### Costos

Los valores en la construcción al finalizar deben ser bajos, en comparación con los equipos medidores importados, ya sean de origen europeos, americanos o asiáticos. Para disminuir los costos de fabricación se debe escoger componentes y materiales del mercado local.

### Número de componentes

Los componentes indispensables son: estructura y soporte, sistema de calentamiento y enfriamiento, sensores de temperatura, sistema de adquisición de datos. Estos tienen como función asegurar que el diseño tenga un funcionamiento correcto.

### **Tamaño y Geometría**

Debido que el uso del medidor va dirigido a laboratorios, las dimensiones finales del equipo tienen su importancia por el espacio que debe ocupar en el lugar de trabajo.

### **Diferencia de temperatura de trabajo**

Esto se define mediante el material que se analice. Con ayuda de la placa caliente y el sistema de enfriamiento se puede obtener una amplia diferencia de temperatura. Además, es importante tener claro que se debe trabajar por debajo de la temperatura de fusión del material de la placa caliente. Más adelante, en requerimientos específicos de diseño se enlistan este y otros factores limitantes.

### **Mantenimiento**

Es de importancia realizar los mantenimientos preventivos y correctivos al medidor de conductividad térmica, para esto se debe contar con componentes que sean de sencillo montaje y desmontaje; fácil limpieza y acceso a cada componente.

### **Seguridad y medio ambiente**

La tendencia de los nuevos diseñadores considera de forma principal normas ambientales en sus trabajos. Por tal motivo, se busca que las partes de cada conjunto del equipo causen poco impacto en el medio ambiente y que a su vez no pongan en riesgo la seguridad del operador, teniendo en cuenta la frase “De la cuna a la cuna” para la selección y diseño de los componentes del sistema.

#### **2.2.3 Selección de alternativas para el diseño del equipo medidor.**

Se muestra el proceso para realizar la selección de las alternativas planteadas para el sistema. Esto es de gran importancia, debido a que nos permite reducir las múltiples soluciones del problema de diseño a una.

Una vez especificadas las condiciones necesarias de los diferentes medidores de conductividad térmica en estado estable, son analizadas para poder seleccionar, mediante el método ponderado, la mejor propuesta de diseño. Para esto se analizan los siguientes criterios de selección:

- Tamaño
- Costos generales
- Cantidad de componentes
- Facilidad de construcción
- Mantenimiento

Como condiciones, a la solución más viable que se logre establecer, se ha impuesto que esta no deberá demandar inversiones excesivas, considerar espacio físico reducido y además de que será lo suficientemente capaz de evitar la pérdida de calor suministrado al momento de realizar los ensayos.

### **Criterios de ponderación**

A continuación, se muestra los siguientes criterios y ponderaciones pertinentes:

Criterio A > Criterio B	Valor igual a 1
Criterio B = Criterio A	Valor igual a 0.5
Criterio A < Criterio B	Valor igual a 0

La ponderación y análisis de criterios de selección se realiza en la siguiente Tabla 2.1

**Tabla 2.1 Matriz de evaluación de criterios de selección**

<b>Criterio B</b>		<b>Costos generales</b>	<b>Cant. de componentes</b>	<b>Aislamiento térmico</b>	<b>Mantenimiento</b>		
<b>Criterio A</b>	<b>Tamaño</b>					<b>Suma</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Tamaño</b>		0	0.5	0	0	0.5	0.04
<b>Costos generales</b>	1		0.5	0	0.5	2	0.19
<b>Cantidad de componentes</b>	0.5	0.5		0.5	0.5	2	0.19
<b>Facilidad de construcción</b>	1	1	0.5		0.5	3	0.29
<b>Mantenimiento</b>	1	0.5	1	0.5		3	0.29

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 2.2 Resultado de ponderación de criterios de selección**

<b>Criterios</b>	<b>Ponderación (%)</b>
<b>Tamaño</b>	4
<b>Costos Generales</b>	19
<b>Cantidad de componentes</b>	19
<b>Facilidad de construcción</b>	29
<b>Mantenimiento</b>	29
<b>Total</b>	100

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Una vez realizada la ponderación de criterios, la cual se detalla en la Tabla 2.2, se asigna valores de calificación a cada alternativa como se muestra en la Tabla 2.4, considerando 1 para la menor importancia y 5 para la mayor importancia.

**Tabla 2.3 Alternativas de medidores de conductividad térmica en estado estable**

<b>Tipo de medidor de conductividad térmica</b>	<b>Alternativa</b>
Medidor de placa plana	A
Medidor cilíndrico	B
Medidor esférico	C

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 2.4 valores de calificación para las alternativas**

<b>Calificación</b>	<b>Equivalencia</b>
5	Excelente
4	Muy buena
3	Buena
2	Regular
1	Insuficiente

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 2.5 Calificación de alternativas**

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Ponderación (%)</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
<b>Tamaño</b>	4	4	3	2
<b>Costos generales</b>	19	3	3	4
<b>Cantidad de componentes</b>	19	5	5	3
<b>Facilidad de construcción</b>	29	4	3	5
<b>Mantenimiento</b>	29	5	4	3

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 2.6 Evaluación y selección de alternativa mediante ponderaciones**

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Ponderación (%)</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
<b>Tamaño</b>	4	0.16	0.12	0.08
<b>Costos generales</b>	19	0.57	0.57	0.76
<b>Cantidad de componentes</b>	19	0.95	0.95	0.57
<b>Facilidad de construcción</b>	29	1.16	0.87	1.45
<b>Mantenimiento</b>	29	1.45	1.16	0.87
<b>Puntaje sobre 5</b>		<b>4.29</b>	<b>3.67</b>	<b>3.73</b>

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Al realizar la comparación de las calificaciones ya ponderadas de cada alternativa evaluada en la Tabla 2.6, se concluye que la alternativa A (Medidor de conductividad térmica de placa plana) es la mejor opción para realizar el diseño del equipo medidor de conductividad térmica.

Para la alternativa seleccionada existen varios métodos con distintos criterios y diferentes características, las cuales se detallan en la Tabla 2.7, en la misma se indican ventajas y desventajas de los equipos listados.

**Tabla 2.7 Sistemas de medición de conductividad térmica.**

<b>Método de medición</b>	<b>Rango de temperatura de medición</b>	<b>Incertidumbre en resultados</b>	<b>Materiales recomendados para analizar</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Placa caliente con resguardo térmico	80 a 800 K	2 al 5%, para mediciones de 0.0001 a 2 (W/m· K)	Aislantes sólidos y materiales opacos	Mayor exactitud en resultados	Tiempo de medición relativamente largos, recomendado para materiales de baja conductividad térmica
Cilíndrico de medición axial	4 a 1000 K	2% en todo tipo de medición	Metales	Rango de temperatura	Tiempo de medición relativamente largos
Medidor mediante flujo de calor	90 a 1300 K	3 al 10% para mediciones de 0.007 a 1 (W/m· K) de forma axial	Aislantes, plásticos, vidrios, cerámicos y polímeros	De construcción y operación simple	Mayor incertidumbre
Calor directo	400 a 3000 K	2 al 10% para mediciones de 10 a 200 (W/m· K)	Metales, cables y varillas de conductores eléctricos	Medición rápida	Únicamente para conductores eléctricos

Fuente: (Buck & Rudtsch, 2006)

Se deben considerar las sugerencias de límites, tales como: el tamaño del equipo, diferencia de temperatura de trabajo, entre otras características establecidas, las mismas que se enlistan en la Tabla 2.8 y 2.9.

**Tabla 2.8 Sugerencias para límites en tamaño de equipo**

Descripción de la sugerencia (se asume placas cuadradas)	Valor de arista (m)
Tamaño del equipo para análisis de aislantes en general	0.3 a 0.5
Tamaño del equipo para análisis de materiales homogéneos	0.2
Tamaño del equipo para evaluación de espesores > 5 cm de las muestras	1

Fuente: (ISO 8302, 1991)

Para cumplir con las condiciones necesarias generales especificadas anteriormente; de manera puntal el que hace referencia al tamaño del equipo, se selecciona por recomendación de la Tabla 2.8, el valor de 0.3 m para el ancho de las placas planas; con esto las dimensiones de las probetas serán menores, lo cual disminuye costos de operación, de tal manera se puede considerar los requerimientos específicos que se enlistan en la Tabla 2.9 en base a la limitación de las dimensiones geométricas.

#### **2.2.4 Requerimientos específicos de diseño**

Los requisitos mostrados en la Tabla 2.9, son indispensables para lograr un diseño estandarizado; de manera que se debe regir bajo la guía y sugerencias de las normas de diseño de aparatos de medición de conductividad térmica de placa plana con resguardo térmico, que se mencionan a continuación:

- ISO 8302:1991 “Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Guarded hot plate apparatus”
- BS EN 12667: 2001 “Thermal Performance of Building Materials and Products. Determination of Thermal Resistance by means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods”

- ASTM C-177: 2013 “Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.”

**Tabla 2.9 Requerimientos específicos para el diseño del equipo**

<b>Requerimientos específicos para el diseño del equipo medidor de conductividad térmica de placa plana con resguardo térmico</b>	
Ancho total de las placas en el equipo (mm)	300
Ancho de la sección de medición (mm)	150
Ancho de la placa (anillo cuadrado) de resguardo térmico para cada arista (mm)	75
Ancho de la ranura de separación entre el área de medición y la placa de resguardo (mm)	2
Espesor de la unidad de calentamiento: placa metálica (Al con 150 W/m· K) (mm)	5
Espesor total de la resistencia calefactora (mm)	3
Mínima conductividad térmica de la muestra (W/m· K)	0.015
Máxima conductividad térmica de la muestra (W/m· K)	0.5
Máximo espesor de la muestra (mm)	45
Mínimo espesor de la muestra (mm)	20
Tolerancia de la planicidad de la muestra (mm)	0.08
Diferencia de temperatura mínima a través de la muestra (K)	10
Diferencia de temperatura máxima a través de la muestra (K)	40
Flujo de calor máximo (W)	6
Espesor de la placa de enfriamiento de Al (mm)	15
Diferencia de temperatura mínima entre sección calentadora y sección de enfriamiento (°C)	20
Diferencia de temperatura máxima entre sección calentadora y sección de enfriamiento (°C)	40

Fuente: (BS EN- 12667, 2001)

### 2.2.5 Combinación de componentes para constituir el medidor.

Luego de seleccionar el tipo de medidor a diseñar, se debe realizar la tabla morfológica, analizar las distintas combinaciones de componentes y así decidir la mejor alternativa para la construcción del equipo, considerando los requerimientos establecidos en la sección anterior.

**Tabla 2.10 Tabla morfológica para selección de los componentes del equipo**

<b>Funciones</b>	<b>Medios</b>			
<b>Placas para sistema calentador</b>	Aluminio	Cobre		
<b>Placa Fría</b>	Aluminio	Cobre		
<b>Resistencia Calefactora</b>	Nicromo	resistencia plana de acero	resistencia plana flexible	
<b>Disipación de calor</b>	Natural	Forzada con disipadores y ventiladores	Forzada con disipadores, celdas Peltier y ventiladores	
<b>Aislantes</b>	Madera contrachapa	Corcho	Poliuretano	Poliestireno
<b>Aislante eléctrico</b>	Silicona	Pegamento epóxico	Cinta de fibra de vidrio	
<b>Medición de temperatura</b>	Termocupla tipo T	Termocupla tipo K	Termistor	
<b>Soporte y sujeción de muestra</b>	Tornillo sin fin	Palanca	Peso muerto	
<b>Microcontrolador y Adquisición de datos</b>	Arduino Mega	National Instruments		

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

En la Tabla 2.10 se muestra las distintas alternativas de componentes, tales variables (más adelante se fija la combinación seleccionada), se colocan en la tabla, ya que las normas utilizadas indican los materiales y componentes para la construcción del equipo de medición de conductividad térmica en estado estable.

## Selección de placa para el sistema de calentamiento y enfriamiento

Las alternativas son: placa de aluminio y placa de cobre.

**Tabla 2.11 Ponderación en la selección de placa metálica**

<b>Criterio B</b>	<b>Costos generales</b>	<b>Conductividad térmica</b>	<b>Mantenibilidad</b>	<b>Suma</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Criterio A</b>					
<b>Costos generales</b>		0.5	0.5	1	0.33
<b>Conductividad térmica</b>	0.5		1	1.5	0.5
<b>Fácil mantenimiento</b>	0.5	0		0.5	0.17

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

A continuación, se procede a realizar la calificación, basándose en los puntajes que se han estimado en la Tabla 2.4 y multiplicando por el porcentaje ponderado.

**Tabla 2.12 Matriz de selección de material para la placa caliente**

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Ponderación (%)</b>	<b>Placa de aluminio</b>	<b>Placa de cobre</b>
<b>Costos generales</b>	33	1.65	0.33
<b>Conductividad térmica</b>	50	1.5	2.5
<b>Mantenibilidad</b>	17	0.68	0.68
Puntaje sobre 5		3.83	3.51

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Tomando en consideración la matriz de selección, se utiliza la placa de aluminio como placa caliente; de igual manera se usa el mismo material para el sistema de placa fría, ya que los criterios a considerar son los mismos. Cabe recalcar que la norma de construcción BS EN-12667 y la norma ASTM C-177 nos indica usar placas de calentamiento ya sean de Cobre o Aluminio.

#### **Selección de la resistencia eléctrica para el sistema de calentamiento**

Se realiza la selección de la resistencia para el sistema de calentamiento, las alternativas a comparar son la resistencia de Ni- Cromo, Platinas de Acero y Resistencia flexible polimérica.

**Tabla 2.13** Tabla de ponderación para selección de resistencia eléctrica

<b>Criterio B</b>	<b>Costos generales</b>	<b>Durabilidad</b>	<b>Facilidad de instalación</b>	<b>Uniformidad</b>	<b>Suma</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Criterio A</b>						
<b>Costos generales</b>		0.5	1	0	1.5	0.27
<b>Durabilidad</b>	0.5		1	0.5	1.5	0.27
<b>Facilidad de instalación</b>	0.5	0		0.5	0.5	0.09
<b>Uniformidad</b>	1	0.5	0.5		2	0.36

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 2.14** Matriz de selección de resistencia eléctrica

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Ponderación (%)</b>	<b>Nicromo</b>	<b>Platina de acero</b>	<b>Resistencia flexible</b>
<b>Costos generales</b>	27	1.35	0.54	0.27
<b>Durabilidad</b>	27	0.81	0.81	0.81
<b>Fácil instalación</b>	9	0.09	0.27	0.45
<b>Uniformidad</b>	36	0.72	1	1.8
Puntaje sobre 5		2.97	2.62	3.33

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

La resistencia resultante en la matriz de selección es la flexible polimérica, se debe considerar el fácil acceso para la compra local de este componente, además de adquirir las medidas especificadas de diseño que se enlistan en la Tabla 2.9. Entonces para facilidad de adquisición se toma el segundo resultado con mayor puntuación en la Tabla 2.14, el cual resulta ser la resistencia de Ni-Cr, de igual manera esta cumple con los requerimientos de potencia y temperatura a transferir. Este material es económico y fácil de adquirir en el mercado local, el inconveniente se da al momento de la instalación, ya que esta se realiza de forma manual y la uniformidad no es perfecta, más adelante se muestra los arreglos de esta resistencia para el sistema de calentamiento.

### **Selección del aislante y sujeción eléctrica para el sistema de calentamiento**

Se realiza la selección de un tipo de aislante eléctrico, para que la resistencia calentadora no actúe directamente sobre la placa, y así evitar accidentes eléctricos en el equipo y errores de mediciones en las termocuplas.

**Tabla 2.15 Ponderación de criterios para selección de aislante eléctrico**

<b>Criterio B</b>	<b>Costos generales</b>	<b>Conductividad térmica</b>	<b>Resistencia a altas temperaturas</b>	<b>Flexibilidad</b>	<b>Suma</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Criterio A</b>						
<b>Costos generales</b>		0	0	0.5	0.5	0.08
<b>Conductividad térmica</b>	1		0.5	0.5	2.0	0.33
<b>Resistencia a altas temperaturas</b>	1	0.5		1	2.5	0.42
<b>Flexibilidad</b>	0.5	0.5	0		1	0.17

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 2.16 Calificación de los tipos de aislantes eléctricos**

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Ponderación (%)</b>	<b>Silicón</b>	<b>Resinas epóxico</b>
<b>Costos generales</b>	8	0.08	0.32
<b>Conductividad térmica</b>	33	1.32	0.66
<b>Resistencia a altas temperaturas</b>	42	2.1	0.42
<b>Flexibilidad</b>	17	0.85	0.17
Puntaje sobre 5		4.35	1.57

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

La conductividad térmica del aislante eléctrico debe de ser aceptable, dependiendo los tipos de silicón puede variar de 0.2 a 6 W/m·K (Momentive Performance Materials Inc., 2011).

### **Selección del sistema de control de temperatura y adquisición de datos**

Las variantes que se deben analizar son: Arduino Mega y National Instruments.

**Tabla 2.17 Ponderación para la selección de sistema de adquisición de datos**

<b>Criterio B</b>	<b>Costos generales</b>	<b>Resolución</b>	<b>Compatibilidad</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Velocidad de adquisición</b>	<b>Suma</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Criterio A</b>							
<b>Costos generales</b>		0	0.5	0.5	0	1	0.10
<b>Resolución</b>	1		1	1	0.5	3.5	0.35
<b>Compatibilidad</b>	0.5	0		0.5	0	1	0.10
<b>Facilidad de uso</b>	0.5	0	0.5		0	1	0.10
<b>Velocidad de adquisición</b>	1	0.5	1	1		3.5	0.35

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 2.18 Calificación del sistema de adquisición de datos**

<b>Criterios de Selección</b>	<b>% de Ponderación</b>	<b>National Instruments</b>	<b>Arduino</b>
<b>Costos generales</b>	10	0.3	1.4
<b>Resolución</b>	35	1.75	0.5
<b>Compatibilidad</b>	10	0.3	0.5
<b>Facilidad de uso</b>	10	0.3	1.4
<b>Velocidad de adquisición</b>	35	1.4	0.5
<b>Puntaje sobre 5</b>		4.05	4.30

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Como se muestra en la Tabla 2.18, resulta conveniente utilizar el Arduino Mega, ya que este componente utiliza un software libre y posee características aceptables a lo que en control y adquisición de datos se refiere, cabe enfatizar que el Arduino Mega tiene una amplia variedad de subcomponentes para diversas aplicaciones que sean necesarias en el sistema para el cual es seleccionado.

## **2.3 Diseño detallado**

### **Sección Medidora y Sección de resguardo Térmico**

En el interior de la sección medidora conformada por dos placas de aluminio de 148 x 148 mm y espesor de 6 mm, se encuentra una resistencia eléctrica de 14.50  $\Omega$ .

La sección de resguardo térmico se constituye de dos marcos de aluminio de 300 x 300 mm y 6mm de espesor, con un vacío en el centro, de medidas 152x152 mm; al igual que la sección medidora esta consta en el centro del conjunto con una resistencia eléctrica de 22.20  $\Omega$ .

Para una mayor información, observar la Tabla 2.20, en ella se puede obtener los componentes con las características del diseño del conjunto calentador.

### **Placa de calentamiento auxiliar y Placa Fría**

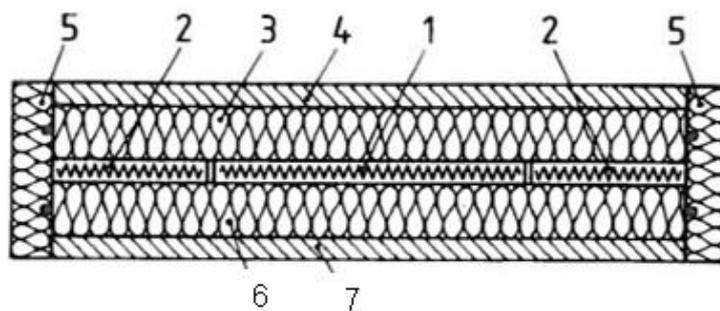
El calentador auxiliar se constituye de dos placas de aluminio de 300x300 mm y 6 mm de espesor, entre ellas se coloca una resistencia eléctrica de 18.70  $\Omega$ , mientras que la placa fría se conforma por un sistema más elaborado que consta de:

- Una placa de aluminio de 300x300 mm y 6 mm de espesor
- 9 extensiones de aluminio de 40x40 mm y 6 mm de espesor
- 9 celdas de Peltier cuya parte enfriadora se ubica de lado de la placa de aluminio.
- 9 disipadores de calor (material aluminio)
- 9 ventiladores

Este sistema de enfriamiento asocia la conducción y la convección de calor, el cual, luego de pasar por el espécimen es desechado al ambiente por medio de disipadores y ventiladores.

Para evitar el contacto eléctrico entre las resistencias y las placas de aluminio, se utilizó silicón gris, que a su vez es utilizado como adhesivo para la unión de estas, la rendija entre la sección medidora y sección de resguardo térmico; se limita por la norma EN-12667, 2001 a una separación de 2 mm como se puede observar en la Tabla 2.9.

En la Figura 2.4, se logra visualizar un esquema detallado del conjunto más importante del equipo de medición



**Figura 2.7 Esquema de componentes principales del equipo de medición**

Fuente: (ISO 8302, 1991)

Donde:

- 1: Unidad de calentamiento de sección de medición.
- 2: Unidad de calentamiento de guarda.
- 3: Aislamiento auxiliar.
- 4: Unidad de calentamiento auxiliar.
- 5: Aislamiento de borde.
- 6: Especimen.
- 7: Unidad de enfriamiento

### **Ensamble del conjunto Calentador**

El ensamble de las placas de aluminio, resistencias y en conjunto total con corcho; madera y poliuretano se lo realiza con pegamento epóxico resistente a altas temperaturas y silicón con una conductividad térmica mínima de (0.22 W/m· K), además de colocar apoyos de sujeción con pegamento epóxico en el perímetro del conjunto de calentamiento, para dar mayor estabilidad sin hacer uso de pernos.

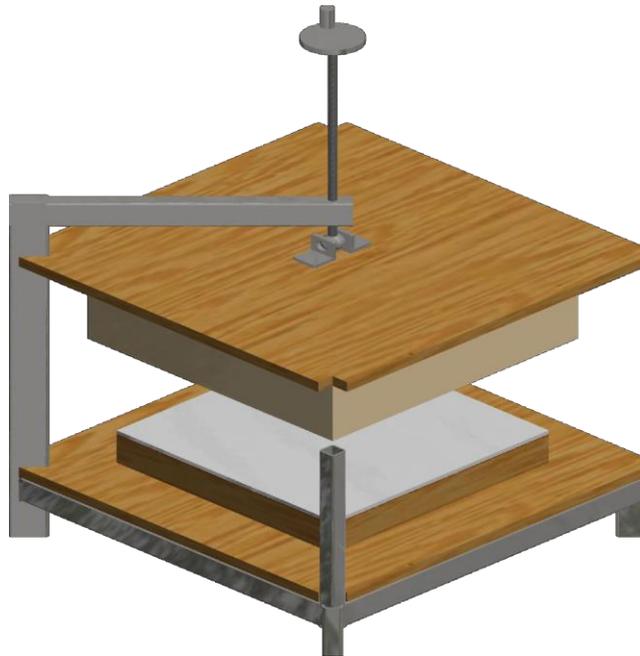
### **Ensamble del conjunto de enfriamiento**

Ensamblar el conjunto de enfriamiento es más simple que el ensamble anteriormente realizado. Se debe unir a la placa enfriadora las celdas Peltier, en un arreglo uniforme con una separación de 4.5 cm entre bordes, sobre las celdas van adheridos los disipadores y sobre estos los ventiladores. Todas las uniones son adheridas con silicón gris el mismo que se utiliza en el conjunto calentador.

Se puede observar parte de este conjunto ensamblado en la Figura 2.9 de la sección 2.3.1.

### **Estructura**

La estructura base (Figura 2.8) se constituye de tubo rectangular (40 x 20 x 2 mm) metálico, sobre ella se ubica una subestructura semejante a un tornillo prensa de banco, ya que consta de una parte fija y otra móvil cuyo desplazamiento debe ser paralelo ayudado por las guías y el eje roscado con manivela. En la parte fija se encuentra la unidad de enfriamiento mientras que la móvil está conformada por la unidad de calentamiento. El desplazamiento mencionado permite ajustar la distancia que corresponde al espesor de la muestra y además mantiene el paralelismo entre conjuntos incluyendo el espécimen a ser medido, lo cual es requerido por las normas de diseño utilizadas.



**Figura 2.8 Estructura base del equipo medidor**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

### **2.3.1 Cálculos Térmicos**

#### **Diseño de la parrilla de calentamiento.**

Anteriormente se realizó la selección de la resistencia eléctrica, en la cual se obtuvo alambre de Ni- Cr para darle forma a las tres parrillas de calentamiento.

La cantidad de alambre de Ni- Cr se estima dependiendo de la resistencia y voltaje requerido, por lo que se puede iniciar con la siguiente ecuación:

$$P = E * I = \frac{E^2}{R} \quad (2.4)$$

Donde:

*P*: Potencia eléctrica suministrada (W)

*E*: Voltaje (V)

*I*: Corriente suministrada (A)

*R*: Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )

Según las tablas que son proporcionadas por los distintos distribuidores, la resistencia depende de la longitud del alambre, observar en anexo B-Tabla B1.

A continuación, se estima la resistencia mediante la ecuación que relaciona longitud con resistencia eléctrica:

$$R = \acute{R} * L \quad (2.5)$$

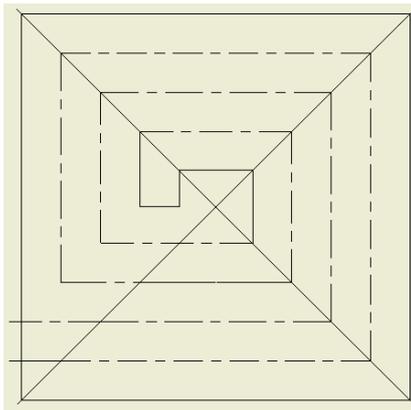
Donde:

$\acute{R}$ = Resistencia eléctrica por unidad de longitud ( $\Omega/m$ )

$L$ = Longitud (m)

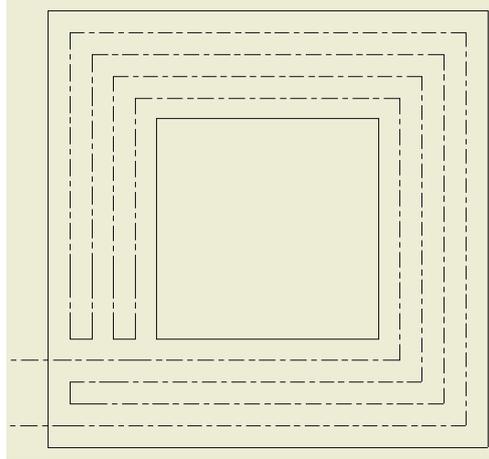
Dependiendo de la densidad de alambre requerido para transmitir el flujo de calor necesario en la placa de aluminio se debe estimar la longitud.

Los 3 elementos de calentamiento; Guarda, Sección de medición y calentador auxiliar, tendrán diferentes longitudes de alambre de Ni- Cr, las cuales se representan en las siguientes figuras:



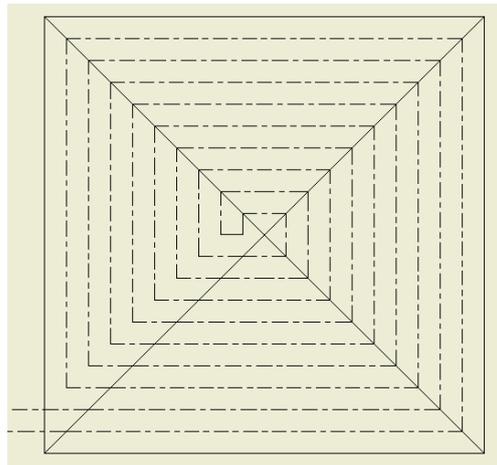
**Figura 2.9 Esquema de parrilla calentadora en sección principal de medición**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)



**Figura 2.10 Esquema de parrilla calentadora en sección de resguardo térmico**

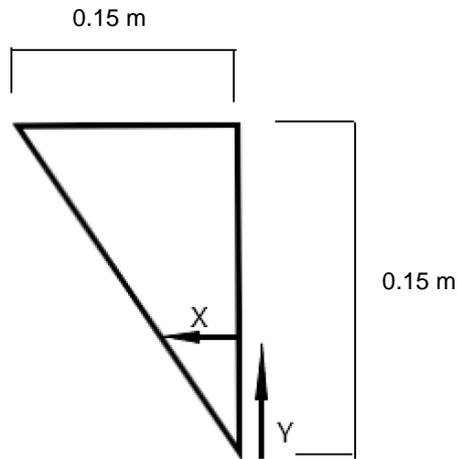
Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)



**Figura 2.11 Esquema de parrilla calentadora en sección de resguardo auxiliar**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

La separación entre alambre es de 0.015 m, por lo que se puede realizar una aproximación de la longitud a utilizar usando una relación de triángulos.



**Figura 2.12 Relación de triángulo para obtención de la longitud de alambre Ni-Cr**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

$$\frac{Y}{X} = \frac{0.15}{0.15} = 1 \quad (2.6)$$

En las distintas secciones se repite 8 veces esta relación de triángulo, por lo siguiente:

$$Y = 8 * X \quad (2.7)$$

De la siguiente presentación para las veces que se repita la espiral al formar las parrillas calentadoras se tiene:

$$L = 8 * \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.8)$$

En el Anexo A, Tabla A1, se puede verificar los resultados obtenidos para las longitudes de los diferentes arreglos de parrillas calentadoras en base a las distintas secciones.

Se asume que toda la potencia eléctrica se convierte en flujo de calor, por lo cual, en la Ecuación 2.4, se puede despejar:

$$H = \frac{E^2}{L * \dot{R}} \quad (2.9)$$

Es necesario indicar, que la norma de construcción BS EN-12667: 2001 exige entregar como máximo 6W de flujo de calor a la muestra por la sección medidora, tomando en cuenta la densidad de flujo de calor en las secciones auxiliar y de guarda, se plantean las siguientes ecuaciones:

$$q''_{cp} = q''_g = q''_{ca} = q''_i \quad (2.10)$$

$$q''_i = \frac{H_i}{A_{ti}} \quad (2.11)$$

Donde:

$q''_{cp}$ : Flujo de calor por unidad de superficie de sección medidora (W/m<sup>2</sup>)

$q''_g$ : Flujo de calor por unidad de superficie de sección de guarda (W/m<sup>2</sup>)

$q''_{ca}$ : Flujo de calor por unidad de superficie de sección auxiliar (W/m<sup>2</sup>)

$H_i$ : Flujo de calor subíndice hace referencia a cada sección calentadora (W)

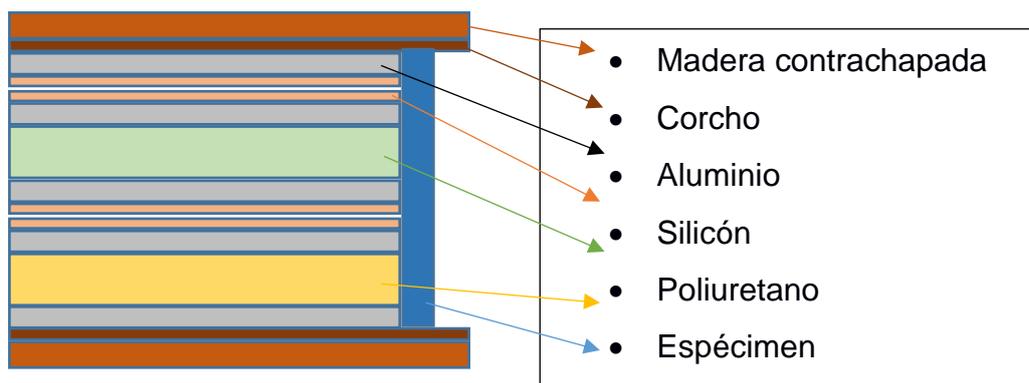
$A_{ti}$ : Área perpendicular al flujo de calor subíndice hace referencia a cada sección calentadora (m<sup>2</sup>)

Tabulando los datos que da los diámetros de alambres óptimos para Ni-Cromo 20/80, en el cálculo de longitud se obtienen resultados óptimos en cuanto a costo y maniobrabilidad a la hora de trabajarlas en moldes para realizar las parrillas.

En el Anexo A, Tabla A2, se obtiene los resultados de los cálculos teóricos de alambre de Ni- Cromo para corroborar la longitud previamente obtenida por geometría.

## Diseño y cálculos del sistema con relación al flujo de calor suministrado, disipado y perdido por los bordes

Debido a que en el calentador no se requieren elevadas temperaturas, por motivo de que los materiales que constituyen el equipo puedan verse afectados, se estima que no supere los 60°C la temperatura de la unidad calentadora.



**Figura 2.13 Esquema de conjunto parcial del equipo medidor**

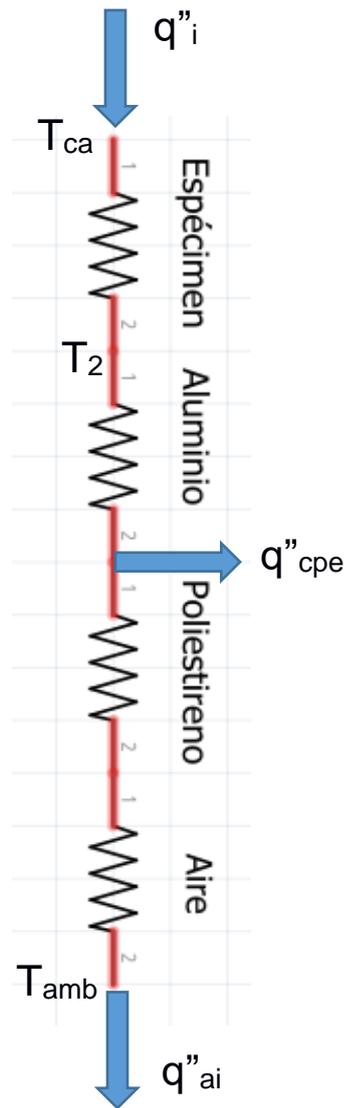
Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

La resistencia eléctrica de Ni-Cr, estará protegida por silicón para evitar que la electricidad afecte las lecturas en las termocuplas.

## Representación y cálculo del sistema como resistencias térmicas del conjunto

Para el cálculo Se asume:

- Condiciones de estado estable.
- Conducción unidireccional (perpendicular a la mayor área transversal de la muestra)
- Resistencia térmica de contacto insignificante.
- Intercambio de radiación despreciable.
- Propiedades homogéneas.



**Figura 2.14 Esquema resistivo de conjunto parcial del equipo**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Al realizar un balance de energía:

$$\dot{E}_i = \dot{E}_s \quad (2.12)$$

$$H_{ca} + H_{cp} = H_{cpe} + H_{cc} + H_{cf} + H_{Ab} \quad (2.13)$$

Conociendo:

$$H = \frac{\Delta T_{a-b}}{\sum R_{a-b}} \quad (2.14)$$

Donde:

$\dot{E}_i$ : Energía térmica en punto i (W)

$\dot{E}_s$ : Energía térmica en punto s (W)

H: Flujo de calor (W)

$\Delta T_{a-b}$ : diferencia de temperatura entre una separación a - b (K)

$R_{t_{a-b}}$ : Resistencia térmica entre una separación a - b (K/W)

Se asume en principio, que la pérdida de calor por el aislamiento de bordes es despreciable, más adelante se corroborará mediante el cálculo de la Ecuación 2.18 dicha pérdida (ISO 8302, 1991).

Se debe asumir que la diferencia de temperatura entre el calentador auxiliar y el de sección medidora es cero, para evitar el flujo de calor entre ambas unidades.

Se resuelve la siguiente ecuación para obtener el flujo de calor que es absorbido por las celdas de Peltier:

$$H_{cpe} = A_{cpe} * \left( q''_i - \frac{T_{ca} - T_{amb}}{R_{t_{cd}} + R_{t_{cv}}} \right) \quad (2.15)$$

Donde:

$q''_i$ : Densidad de flujo de calor total suministrado por conjunto calentador (W/m<sup>2</sup>)

$A_{cpe}$ : Área transversal al flujo de las celdas Peltier (m<sup>2</sup>)

$H_{cpe}$ : Flujo de calor absorbido por las celdas Peltier (W)

$T_{ca}$ : Temperatura del conjunto calentador (°C)

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente (°C)

$R_{t_{cd}}$ : Resistencia térmica conductiva (K/W)

$R_{t_{cv}}$ : Resistencia térmica convectiva (K/W)

Se debe analizar las resistencias térmicas conocidas, entonces:

$$R_{t_{cd}} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (2.16)$$

$$R_{t_{cv}} = \frac{1}{h_i \cdot A} \quad (2.17)$$

Donde:

$k$ : Conductividad térmica del material (W/m. K)

$h_i$ : Convección térmica del medio  $i$  (W/m<sup>2</sup>. K)

$A_i$ : Área normal a la transferencia de calor (m<sup>2</sup>)

$L$ : longitud transversal del material (m)

$R_{t_{cv}}$  y  $R_{t_{cd}}$  ya especificados en la ecuación 2.14.

Para la resolución de las ecuaciones 2.16 y 2.17 se debe tomar los valores de la conductividad y convección térmica, así como los valores del área y espesor, los cuales se enlistan en la Tabla 2.19.

**Tabla 2.19 Listado de componentes y conductividad térmica de cada material**

<b>Materiales</b>	<b>Conductividad Térmica (mW/m-K)</b>	<b>Espesor General (mm)</b>	<b>Área general (m<sup>2</sup>)</b>
Madera contrachapada	45.00	10.00	0.09
Corcho	50.00	1.00	0.09
Aluminio	1.50 x10 <sup>5</sup>	5.00	0.09
Silicona	2.20 x10 <sup>2</sup>	1.00	0.09
Poliuretano	28.00	45.00	0.09
Thermolon	29.00	15.00	
Celdas de Peltier		3.00	16.00x10 <sup>-4</sup>
Poliestireno	41.00	9.00	75.60x10 <sup>-3</sup>

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Es necesario recalcar que, el calor retirado de manera convectiva natural por la unidad fría únicamente corresponde al área en el que no se encuentre las celdas del Peltier, además, se debe considerar las peores condiciones (ISO 8302, 1991) de tal manera, se asume una convección natural del aire  $h_{ai} \approx 5.00 (W/m^2 \cdot K)$  (Incropera, Lavine, Dewitt, & Bergman, 2008).

Al despejar  $H_{cpe}$  de la Ecuación 2.15, el calor necesario que las celdas de Peltier debe retirar es:

$$H_{cpe} \approx 20.05 (W)$$

### **Pérdida de flujo de calor por los bordes**

Según la norma ISO 8302, se determina el calor perdido en los bordes mediante la siguiente ecuación:

$$H_{ab} = \frac{Pe}{R_{te}} \cdot \left[ \frac{y}{4} \cdot (T_1 - T_2) + \left( e + \frac{y}{2} \right) \cdot (T_m - T_{amb}) \right] \quad (2.18)$$

Donde:

$P_e$ : Es el perímetro en el borde de la muestra (m)

$R_{te}$ : Resistencia térmica del aislamiento del borde ( $K \cdot m^2/W$ )

$y$ : Espesor de la unidad de calentamiento (m)

$e$ : Espesor del espécimen de prueba (m)

$T_1 - T_2$ : Diferencia de temperatura entre las caras del espécimen (K)

$T_m$ : Temperatura media en el espécimen (K). Es igual a  $(T_1 + T_2) / 2$

$T_{amb}$ : Temperatura del ambiente (K)

Para la resolución de la Ecuación 2.18 son necesarios algunos datos, los cuales se pueden tomar de la Tabla 2.20.

**Tabla 2.20 Datos técnicos de geometría y temperatura del sistema de medición**

Detalle	Valor
Espesor del calentador (mm)	3.00
Espesor de la unidad de calor (mm)	75.00
Perímetro externo de la guarda (mm)	$1.20 \times 10^3$
Temperatura máxima en unidad caliente (K)	313.20 (40°C)
Diferencia de temperatura máxima entre placas (K)	40.00
Temperatura ambiente (K)	295.20 (23°C)

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

En el Anexo A, Tabla A3, se puede analizar los resultados teóricos de las ecuaciones 2.15, que corresponde al resultado del flujo de calor absorbido por las celdas de Peltier ( $H_{cpe}$ ) y 2.18 que define el valor del calor perdido en los bordes ( $H_{ab}$ ).

Se pretende que esta diferencia de temperatura sea  $T_m - T_{amb} = 0$  para que la pérdida de calor en los bordes sea despreciable.

Es necesario recalcar que la norma ISO 8302 indica que, de no cumplirse la siguiente desigualdad:

$$(T_e - T_m)/\Delta T < 0.05 \quad (2.19)$$

Donde:

$T_e$ : Temperatura en el borde medio superior del espécimen (K)

$T_m$ : Temperatura media del espécimen (K)

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura en el espécimen (K)

Se debe añadir un aislamiento térmico en el borde.

### 2.3.2 Diseño y cálculo de Celdas Peltier

Dado que se debe llevar el área de enfriamiento, de la celda de Peltier a una temperatura mínima aproximada de 10°C, es prescindible calcular la potencia necesaria para poder cumplir con la magnitud de temperatura requerida.

Se asume que la temperatura en la superficie caliente en la celda de Peltier puede llegar a 27°C con una diferencia de temperatura de 17°C, considerando un factor de seguridad del 25 al 50% en base a lo estipulado (Thermonamic, 2016).

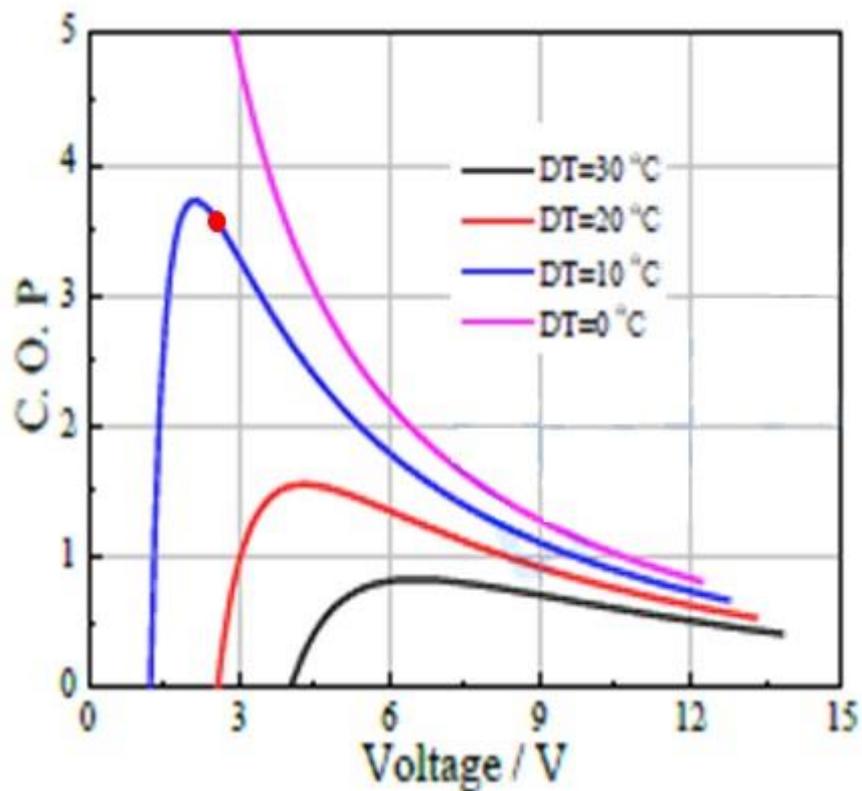
**Tabla 2.21 Datos para el cálculo de valores de operación de la celda de Peltier**

Detalle	Valor
Mínima temperatura (°C)	10
Diferencia de temperatura base (°C)	17
Flujo de calor absorbido por una celda de Peltier (w)	2.5

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Con los datos presentes en la Tabla 2.21 se procede a realizar la selección de parámetros de operación de la celda de Peltier.

Ya mencionado los parámetros de trabajo en el párrafo anterior, se realiza la selección en el gráfico (Figura 2.15) en base a los parámetros establecidos.



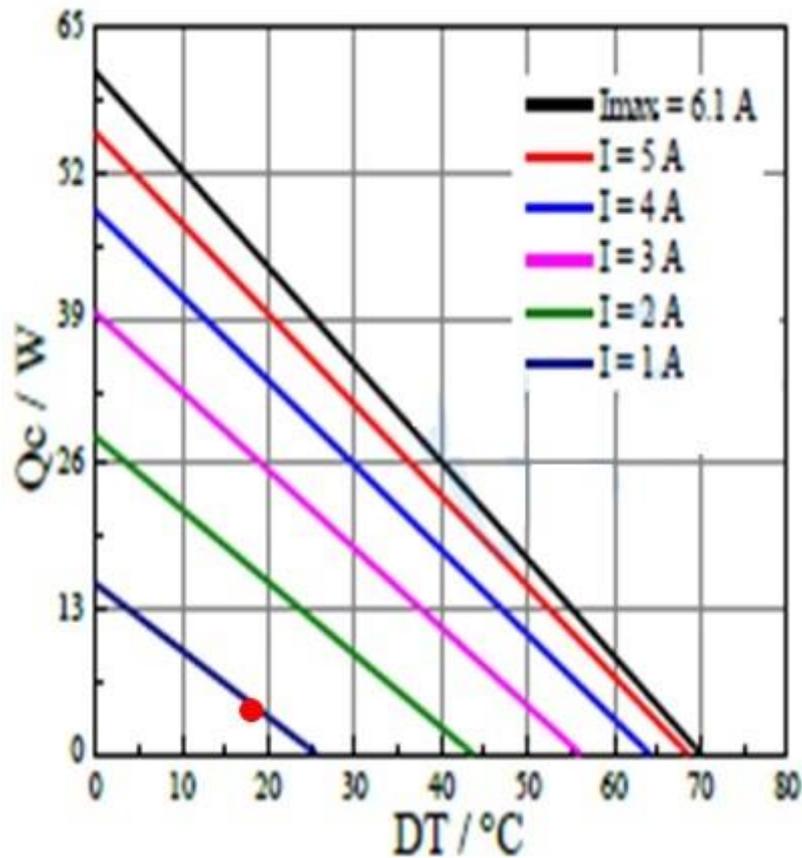
**Figura 2.15 Gráfico de curva del coeficiente de desempeño (Celdas Peltier)**

Respecto a la diferencia de temperatura y voltaje de trabajo

Fuente: (Thermonamic, 2016)

El gráfico muestra el punto color rojo, donde se indica el Coeficiente de Desempeño  $C.O.P. \approx 0.35$ , entonces el voltaje de alimentación necesario para el funcionamiento de la celda es de  $\approx 2.50V$ .

Se debe continuar con la selección de corriente eléctrica necesaria para el funcionamiento de la celda de Peltier en base a los parámetros especificados de trabajo, se considera el grafico de la Figura 2.16.

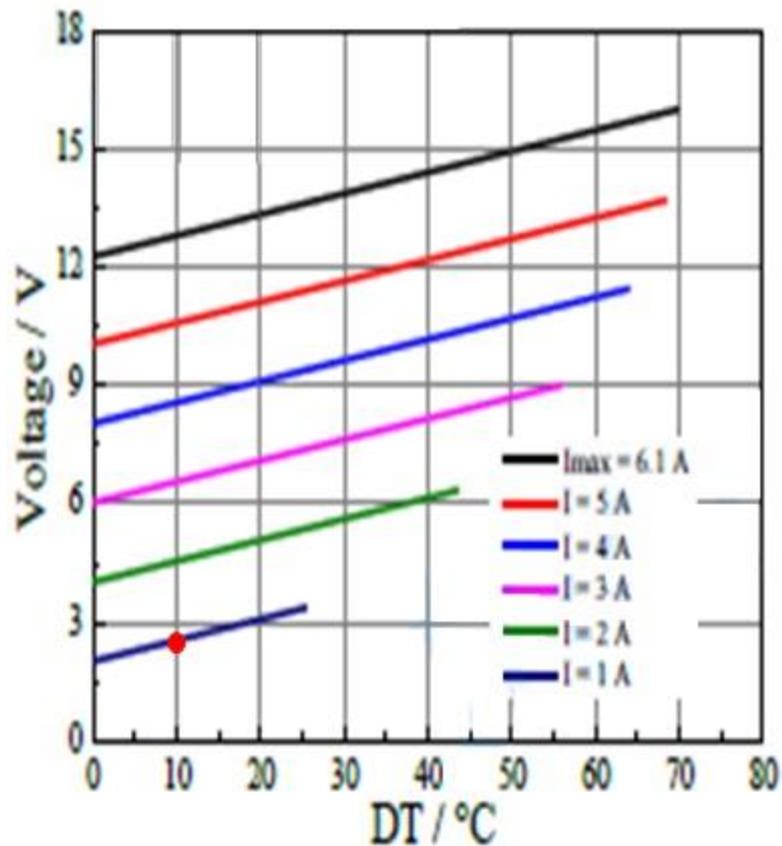


**Figura 2.16 Gráfico de desempeño estándar (Celdas Peltier)**

Respecto a la relación de amperaje con  $Q_c = H_{cpe}$  en función de  $DT = \Delta T$

Fuente: (Thermonamic, 2016)

El gráfico muestra una línea roja, donde la intersección con la diferencia de temperatura ( $DT = \Delta T$ ) y el calor absorbido ( $H_{cpe}$ ; ambos ya establecidos) da como resultado el amperaje  $I \approx 1 A$  necesario para el funcionamiento en base a la capacidad requerida de la celda de Peltier.



**Figura 2.17 Gráfico de desempeño estándar (Celdas Peltier)**

Respecto al voltaje y diferencia de temperatura

Fuente: (Thermonamic, 2016)

Se obtiene el voltaje necesario con respecto a la diferencia de temperatura DT establecida anteriormente de la celda de Peltier, el cual resulta  $V \approx 2.50$  V.

Con los resultados obtenidos mediante el proceso realizado, se puede determinar que cada celda de Peltier necesita de una potencia eléctrica teórica de 2.50 W, en el Anexo A en la Tabla A4 se puede dar lectura de los resultados teóricos y prácticos obtenidos en esta sección de diseño de Celdas de Peltier.

### 2.3.3 Diseño de Estructura y Soporte

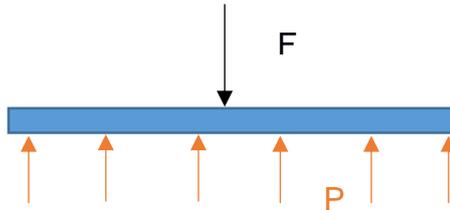
Para el cálculo estructural, se debe considerar los materiales y dimensiones de estos, que se enlistan en la Tabla 2.22 a continuación.

**Tabla 2.22 Detalles de material utilizado para la estructura de soporte del equipo**

Detalle	Valor
Material	A 36
Geometría del material	Rectangular
Dimensiones (mm)	40x20x2
Área de la muestra (m <sup>2</sup> )	0.09

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Según la norma ISO 8302, el máximo esfuerzo recomendado para ejercer presión sobre la muestra es de 2.5 kPa, entonces:



**Figura 2.18 Esquema de la fuerza aplicada sobre la muestra**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

$$P_A = \frac{F}{A} \quad (2.20)$$

Donde:

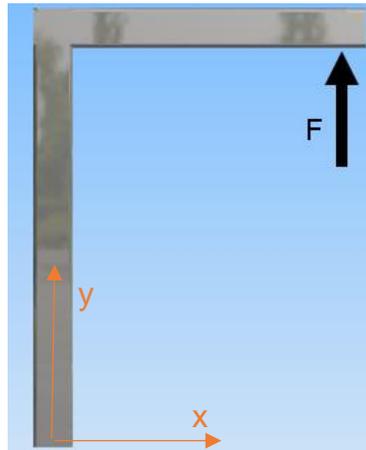
$P_A$ : Presión (kPa)

$A_t$ : Área de la muestra (m<sup>2</sup>)

F: Fuerza ejercida sobre la muestra (N)

### **Diseño de esfuerzo máximo**

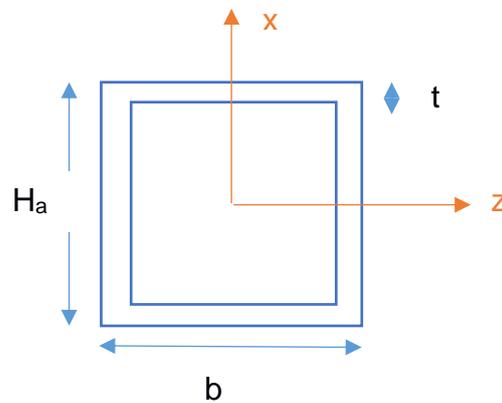
La fuerza F que ha sido calculada previamente, se transmite a la estructura de soporte, es en ese lugar donde se va a asumir el empotramiento en la base, tal como se puede visualizar en la Figura 2.19.



**Figura 2.19 Detalle donde se realiza el cálculo del esfuerzo**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

A simple vista se puede entender que los máximos esfuerzos se encuentran en la base. Se utiliza sección rectangular, ya que este tipo de material es fácil de encontrar en el mercado local. Véase en la Figura 2.19.



**Figura 2.20 Sección rectangular del tubo a utilizar**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Para continuar con los cálculos, es necesario obtener la inercia de la geometría del material, se lo resuelve a continuación

$$I_z = \frac{b \cdot H^3 - b_0 \cdot H_0^3}{12} = \frac{b \cdot H^3 - (b - 2 \cdot t) \cdot (H - 2 \cdot t)^3}{12} \quad (2.21)$$

$$A_{Total} = A_{te} - A_{te0} = b \cdot H_a - (b - 2 \cdot t) \cdot (H - 2 \cdot t) \quad (2.22)$$

Donde:

$H_a$ : Altura (m)

$b$ : Ancho (m)

$t$ : Espesor de estructura (m)

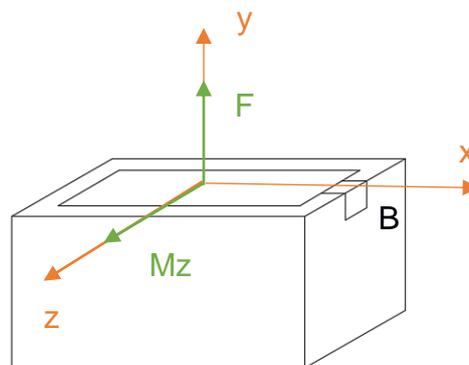
$I_z$ : Momento de inercia (m<sup>4</sup>)

$A_{te}$ : Área sólida transversal del tubo rectangular (m<sup>2</sup>)

Fuente: (Hibbeler, 2012)

### Traslación de fuerza hacia la base de análisis del esfuerzo máximo

Se puede observar como referencia la Figura 2.21.



**Figura 2.21 Esquema de traslado de fuerza hacia la base**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

$$M_z = F \cdot d \quad (2.23)$$

Donde:

$d$ : distancia del brazo del momento de F (m)

$M_z$ : Momento de F en el eje z (N· m)

El esfuerzo máximo se encuentra en el punto B, justo antes del empotramiento. Véase Figura 2.19

$$\sigma_{max} = \frac{M_z \cdot c}{I_z} + \frac{F}{A} \quad (2.24)$$

Fuente: (Hibbeler, 2012)

Dependiendo del material a utilizar (en este caso acero A 36) se puede establecer un factor de seguridad.

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad (2.25)$$

Donde:

$c$ : Distancia desde el punto de referencia hasta el punto de análisis (m)

$\eta$ : Factor de seguridad

$S_y$ : Esfuerzo de fluencia (MPa)

$\sigma_{max}$ : Esfuerzo máximo aplicado (MPa)

Se selecciona el tubo rectangular de acero A36, con las medidas de sección transversal 40 x 20 x 2 mm y esfuerzo de fluencia  $S_y = 250.00$  MPa, lo cual es suficiente para soportar la presión ejercida máxima de 2.50 kPa con su respectiva reacción de esfuerzo máximo de 33.21MPa, sobre la muestra que se desea analizar (Hibbeler, 2012).

En el Anexo A, Tabla A5, se detallan los resultados del diseño estructural.

### 2.3.4 Sistema electrónico y de adquisición de datos

En esta sección se muestra los componentes del sistema electrónico y de adquisición de datos con las características de interés para el proyecto en curso.

#### Sistema Electrónico.

Es necesario para el análisis de los resultados, adquirir las lecturas en un equipo que pueda permitir obtener los valores tabulados y gráficos en una interface amigable para el operador.

En el Anexo C, Figura C8, se muestra un diagrama de bloques del sistema electrónico: control de parámetros y adquisición de datos.

**Tabla 2.23 Componentes del sistema de control y adquisición de datos**

Detalle	Descripción	Imagen del Componente
HC – SR04	Sensor de distancia de ultrasonido	
Alimentación Vcc	5 V	
Frecuencia	40 kHz	
Rango de medición	20 a 4.00x10 <sup>3</sup> mm	
MAX6675	Módulo de conversión digital para termocupla tipo K	
Alimentación Vcc	3 a 5.5 V	
Rango de medición	0 a 1024°C	
Resolución	0.25°C	
RHT03	Sensor de temperatura y humedad	
Alimentación Vcc	3.3 a 6 V	
Rango de medición	0 a 100% RH	
Resolución	1%RH	
Rango de medición	-40 a 80°C	
Resolución	1°C	

Continuación de tabla 2.23		
HX711	Transmisor de celda de carga	
Alimentación Vcc Conversión de analógico a la digital	2.6 a 5.5 V 24 bit	
TIP 122 (NPN)	Transistor de potencia	
Voltaje Colector-Emisor (máximo) Voltaje Colector Base (máximo) Voltaje Emisor-Base (máximo)	100V 100V 5.0V	
Arduino Mega 2560 R3	Microcontrolador	
Alimentación Vcc Cantidad de entradas analógicas Memoria Flash Frecuencia	9 a 12 V 16 256K 16 MHz	
Celda Peltier Tec1-12706	Módulo Termoeléctrico	
Alimentación Vcc Potencia Nominal Diferencial de temperatura	12 a 16 V 72W 66 a 75°C	

Fuente: (ALLDATASHEET.COM, 2018)

### 2.3.5 Procedimiento de utilización del equipo

En esta sección se trata el procedimiento que debe ser aplicado para obtener mediciones confiables, y de esa manera mostrar los resultados obtenidos en las pruebas que se efectúan sobre diversos materiales.

En el diseño y construcción de equipos, es de utilidad realizar una secuencia de pruebas y calibraciones, para poder determinar la exactitud y el error con la que se cuenta a la hora de obtener las mediciones deseadas.

Se desea que el equipo pueda ser operado por cualquier persona con conocimientos básicos en ensayos sobre materiales, para esto se elabora un pequeño algoritmo para certificar que todas las medidas sean correctamente obtenidas y los valores sean totalmente confiables.

Para realizar la prueba de conductividad térmica se debe proceder según indica la norma ASTM C- 177:

1. Se toman medidas de la muestra de un área de 300x300 mm y un espesor de entre 20 a 45 mm.
2. Se sitúa el espécimen en la placa fría, debe ser colocado totalmente paralela para evitar mediciones erróneas.
3. Mediante el sistema de prensa, se ajusta paralelamente sobre la muestra la unidad calentadora, de tal forma se registre una presión de 2.50 kPa, esta presión se estima mediante unos transductores de celda de carga colocados en la base del equipo.
4. Con las termocuplas instaladas en el equipo, las cuales tienen como propósito determinar las diferencias de temperaturas necesarias para las tomas de medidas, se verifica que la temperatura entre la sección medidora y la sección de resguardo térmico se mantenga con una diferencia de temperatura de hasta 0.2 °C (ASTM, 2013). De igual manera se debe tener la medida de la temperatura en la placa fría.
5. Se realiza el registro de las distintas mediciones tomadas en el espécimen, hasta que llegue al punto de estabilización (Paez, 2015).

6. Realizar el respectivo registro de dimensiones geométricas del espécimen que se debe analizar:
  - e: Espesor de la muestra (m)
  - $A_t$ : Área de la sección medidora ( $m^2$ )
  - a: Arista (m)
  
7. Se realiza el registro de los distintos datos eléctricos:
  - E: Voltaje en la sección medidora (V)
  - R: Resistencia eléctrica del conjunto de la sección medidora ( $\Omega$ )  
Estos datos son necesarios para realizar el cálculo de la potencia eléctrica que debe generar el flujo de calor. La potencia entregada se la determina mediante la Ecuación 2.4.
  - P: Potencia eléctrica (W)

El equipo Medidor de Conductividad Térmica de Placa Plana, se diseña y construye, de tal manera que la totalidad de la potencia eléctrica con la cual se alimenta se convierta en flujo de calor.

Este flujo de calor mencionado es unidireccional (en sentido axial), ya que idealmente no existe una diferencia de temperatura entre la sección medidora y la sección de resguardo térmico.

Al alcanzar el estado estable en el sistema, se registran las temperaturas del ensayo de validación sobre la muestra de poliuretano rígido.

En el Anexo A, Tabla A6, se evidencia el registro de las temperaturas de prueba de estabilización.

A partir de la Ley de Fourier plasmada en la ecuación 2.3, se calcula el coeficiente de conductividad térmica ( $k$ ), despejando de la ecuación a la cual se hace mención.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Calibración con relación a la interface del Microcontrolador Arduino

Para que la interface del lenguaje de programación entienda la cantidad de voltaje de alimentación que ingresa al sistema de calentamiento, es necesario realizar una conversión, esta se realiza de manera experimental, dando valores de 0 a 255 en el lenguaje C++ que utiliza Arduino, mientras esto se traduce en valores de voltaje de 0 a 9.37 V.

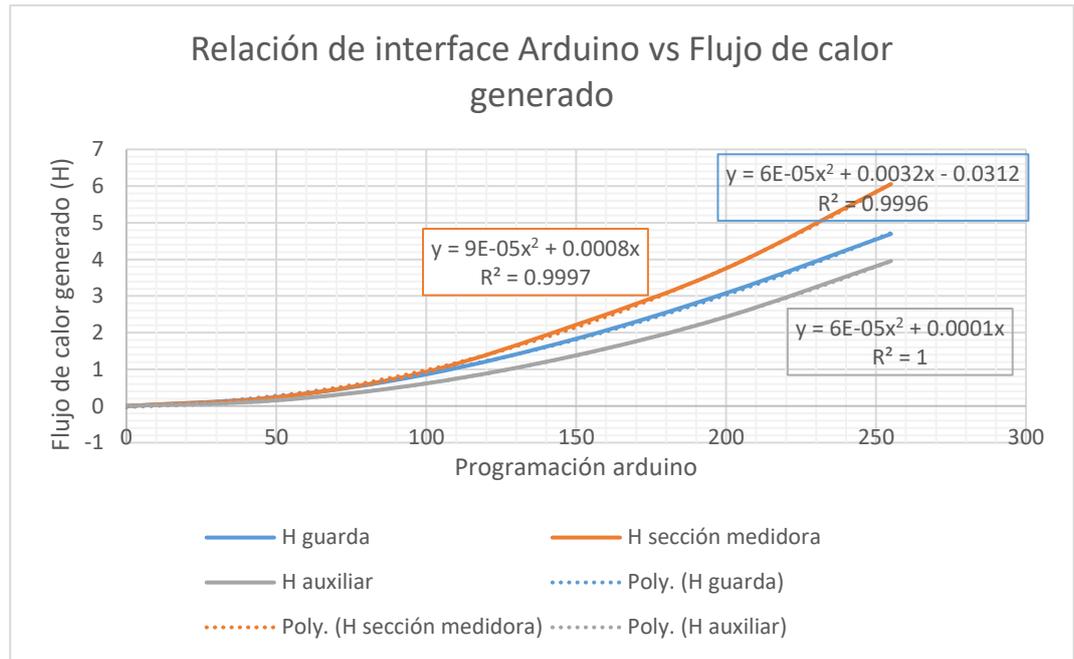
Se muestra resultados de los cálculos prácticos en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Conversión de voltaje a interface de programación**

Voltaje guarda (V)	Voltaje central (V)	Voltaje auxiliar (V)	Voltaje celdas (V)	Valores para Arduino	H guarda (mW)	H central (mW)	H auxiliar (mW)
0	0	0	0.10	0	0	0	0
2.12	1.85	1.85	2.32	50	$2.40 \times 10^2$	$2.36 \times 10^2$	$15.40 \times 10^{-2}$
4.02	3.68	3.70	4.36	100	$8.64 \times 10^2$	$9.34 \times 10^2$	$61.7 \times 10^{-2}$
5.86	5.67	5.54	6.18	150	$18.36 \times 10^2$	$22.17 \times 10^2$	$13.82 \times 10^2$
7.59	7.38	7.35	7.69	200	$30.81 \times 10^2$	$37.56 \times 10^2$	$24.33 \times 10^2$
9.37	9.37	9.37	9.19	255	$46.95 \times 10^2$	$60.55 \times 10^2$	$39.55 \times 10^2$

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

En base a la calibración de voltaje realizada, se muestra un gráfico en el cual se puede observar el comportamiento de las curvas resultantes.



**Figura 3.1 Curva de conversión de voltaje a interface de programación**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

### 3.2 Validación del Equipo Medidor de Conductividad Térmica

Para realizar la validación del equipo de medición, se debe utilizar un material cuya conductividad térmica sea conocida. Como referencia, se toma el poliuretano expandido rígido.

En la Tabla 3.2 se enlistan los resultados en estado estable de la prueba realizada sobre la muestra de poliuretano, en el Anexo A, Tabla A6, se encuentra de forma completa los resultados del análisis.

En la gráfica de la Figura 3.2, se muestra la conductividad térmica versus el tiempo que transcurre hasta el alcance de estabilidad térmica, con un flujo constante de  $H=0.22W$ .

**Tabla 3.2 Datos de validación de ensayo en poliuretano**

<b>Hora de medición</b>	<b>T Placa fría (°C)</b>	<b>T Placa caliente (°C)</b>	<b>Conductividad Térmica (W/m·K)</b>
17:46:32	26.10	33.55	2.60E-02
17:47:21	26.22	33.55	2.65E-02
17:48:09	26.20	33.70	2.59E-02
17:48:58	26.00	33.65	2.54E-02
17:49:47	26.30	33.58	2.67E-02
17:50:36	26.07	33.68	2.55E-02
17:51:25	26.22	33.70	2.60E-02
17:52:14	26.30	33.58	2.67E-02
17:53:02	26.35	33.72	2.63E-02
17:53:51	26.22	33.60	2.63E-02
17:54:40	26.30	33.60	2.66E-02
17:55:29	26.27	33.58	2.66E-02
17:56:18	26.27	33.53	2.68E-02
17:57:07	26.35	33.55	2.69E-02
17:57:55	26.15	33.60	2.60E-02
17:58:44	26.27	33.60	2.65E-02
17:59:33	26.47	33.60	2.72E-02
18:00:22	26.30	33.68	2.63E-02
18:01:11	26.42	33.63	2.69E-02
18:02:00	26.20	33.58	2.63E-02
18:02:48	26.35	33.58	2.69E-02
18:03:37	26.45	33.52	2.74E-02
18:04:26	26.60	33.40	2.85E-02
18:05:15	26.10	33.65	2.57E-02
18:06:04	26.37	33.63	2.68E-02
18:06:53	26.42	33.58	2.71E-02
18:07:41	26.55	33.68	2.72E-02
18:08:30	26.45	33.63	2.70E-02
18:09:19	26.27	33.75	2.60E-02
18:10:08	26.57	33.68	2.73E-02
18:10:57	26.30	33.70	2.62E-02
18:11:46	26.52	33.78	2.68E-02
18:12:34	26.62	33.65	2.76E-02
18:13:23	26.45	33.65	2.69E-02
18:14:12	26.37	33.55	2.70E-02
18:15:01	26.40	33.67	2.67E-02
18:17:27	26.47	33.70	2.69E-02
18:18:16	26.45	33.38	2.80E-02
18:19:05	26.32	33.73	2.62E-02
18:19:54	26.35	33.40	2.75E-02
18:21:32	26.30	33.50	2.69E-02
18:23:09	26.30	33.55	2.68E-02
18:23:58	26.17	33.65	2.60E-02
18:24:47	26.30	33.55	2.68E-02
18:25:36	26.27	33.55	2.67E-02
18:26:25	26.42	33.68	2.68E-02
18:27:13	26.02	33.60	2.56E-02

Continuación de Tabla 3.2			
18:28:02	26.07	33.70	2.54E-02
18:28:51	26.22	33.60	2.63E-02
18:29:40	26.27	33.40	2.72E-02
18:30:29	26.15	33.47	2.65E-02
18:31:18	26.12	33.53	2.62E-02
18:32:06	26.32	33.47	2.71E-02
18:32:55	26.22	33.53	2.66E-02
18:33:44	26.18	33.52	2.64E-02
18:34:33	26.35	33.68	2.65E-02
18:35:22	26.25	33.80	2.57E-02
18:36:11	26.40	33.70	2.66E-02
18:36:59	26.17	33.72	2.57E-02
18:38:37	26.27	33.58	2.66E-02
18:39:26	26.17	33.57	2.62E-02
18:40:15	26.37	33.65	2.67E-02
18:42:41	26.25	33.45	2.69E-02
18:43:30	26.35	33.50	2.71E-02
18:44:19	26.15	33.55	2.62E-02

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Ya mencionado con anterioridad, la conductividad térmica se la obtiene del despeje de  $k$  en la ecuación 2.3 que se refiere a la Ley de Fourier.

Con los datos obtenidos y mostrados en la Tabla 3.2 se calcula el promedio  $\bar{X}$  y su respectiva desviación estándar  $s$ .

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (3.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

Donde:

$\bar{X}$ : Media aritmética

$x$ : Datos de la muestra

$s$ : Desviación estándar de la muestra

$n$ : Cantidad de datos de la muestra

Fuente: (Paez, 2015)

En la Tabla 3.3 se indican los valores de media aritmética y desviación estándar, con estos valores se puede analizar que los datos que se obtuvieron en las mediciones de conductividad térmica (Tabla 3.2) han sido calculados correctamente.

Se realiza un análisis estadístico más profundo, donde se muestran los límites de confianza para corroborar la exactitud del resultado que se obtuvo.

Se estiman los límites bilaterales con un nivel de confianza del 95%, lo cual se realiza por medio de la desigualdad 3.3, y sus resultados se muestran en la Tabla 3.4.

$$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

### 3.3 Análisis de resultados

#### 3.3.1 Análisis de resultados de validación

Los resultados obtenidos indican que la prueba de medición de conductividad térmica está en el rango establecido, ya que la muestra de poliuretano que se ha seleccionado es un material conocido y ampliamente utilizado, su valor de conductividad térmica teórico bordea los  $2.80 \times 10^{-2}$  W/m. K (Touloukian, 1970).

El resultado que se obtuvo en el prototipo construido es de  $2.65 \times 10^{-2}$  (W/m. K), en base a las mediciones del equipo y al valor referenciado de la muestra.

La Tabla 3.2 muestra los resultados de la prueba realizada sobre la muestra de poliuretano, con estos se realizan los cálculos estadísticos de media aritmética, desviación estándar e intervalo de confianza, que se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Media aritmética y desviación estándar**

Detalle	Descripción	Resultado (W/m. K)
$\bar{x}$	Media aritmética de la muestra	$2.65 \times 10^{-2}$
S	Desviación estándar de la muestra	$6.34 \times 10^{-4}$

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

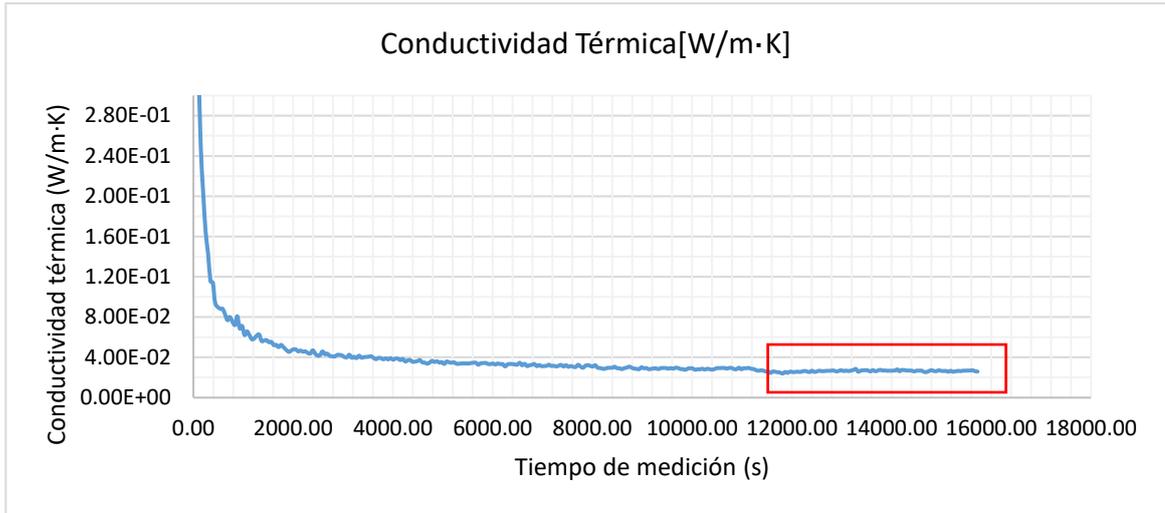
**Tabla 3.4 Variables estadísticas obtenidas del ensayo con poliuretano**

Detalle	Descripción	Valor (W/m. K)
A	Significancia	$5.00 \times 10^{-2}$
n-1	Grados de libertad	69
$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$	Punto crítico	1.99
$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$	Límite de confianza inferior	$2.63 \times 10^{-2}$
$\bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$	Límite de confianza superior	$2.66 \times 10^{-2}$

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

En la Tabla 3.3 y 3.4, se consideraron los valores de las mediciones realizadas a la muestra de poliuretano rígido, estos valores obtenidos oscilan entre  $2.63 \times 10^{-2}$  y  $2.66 \times 10^{-2}$  W/m. K, mientras que el valor tabulado del poliuretano es de  $2.80 \times 10^{-2}$  W/m. K (Touloukian, 1970), por lo cual se considera una exactitud aceptable.

Se puede estimar en el gráfico de la figura 3.2, la curva de la conductividad térmica del poliuretano en el tiempo de estabilización encerrado en el rectángulo de color rojo.



**Figura 3.2 Gráfica de Conductividad térmica vs. Tiempo (ensayo con poliuretano)**

Fuente: propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla 3.5 Resultado del ensayo sobre poliuretano rígido**

T de placa fría (°C)	T de placa caliente (°C)	Conductividad (W/m·K)	Calor generado (W)
26.25	33.50	$2.6 \times 10^{-2}$	0.22

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

### 3.3.2 Análisis de errores

#### Error porcentual

El error porcentual obtenido se muestra en la siguiente Tabla 3.6, es notable que el error es aceptable para las mediciones resultantes en el prototipo construido, no obstante, en recomendaciones se enfatiza que esto se puede mejorar, al obtener un error aproximado de 5% y poder cumplir en su totalidad la sugerencia de la norma ISO 8302.

**Tabla 3.6 Error porcentual de la validación del equipo**

Descripción	Resultado (W/m·K)
Valor experimental	$2.60 \times 10^{-2}$
Valor Teórico	$2.80 \times 10^{-2}$
Error %	7%

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

### **Errores determinados e indeterminados en las pruebas de medición**

Los errores que son encontrados, tanto en las mediciones de las temperaturas, así como en la conductividad térmica, se dan en gran parte con un equipo experimental que puede realizar la simulación de las condiciones requeridas, por el modelo específico de la ecuación de conducción de calor (Ecuación 2.3), estos errores se definen como determinados e indeterminados:

- **Error en la medición del área de flujo de calor:** El error es mínimo, como ya se mencionó anteriormente, se toma el área de medición de  $148 \times 148 \text{ mm} \pm 0.15\text{mm}$ , en teoría este valor se considera para el cálculo, pero físicamente no se cuenta con esa tolerancia en específico.
- **Error en el tiempo de medición:** Este se da ya que se asume un tiempo de estabilidad para agilizar el ensayo, cabe recalcar que la estabilidad de la temperatura depende de un flujo de calor constante, a través del espécimen de ensayo.
- **Error en la cantidad de flujo de calor:** esto se debe a que, para el cálculo, se asume que toda la potencia de alimentación se transforma en calor por unidad de tiempo, a su vez se asume que todo ese calor fluye a través del espécimen.
- **Error de suposición del estado estable:** no puede ser alcanzado idealmente durante las mediciones.

Para los resultados obtenidos en el ensayo de validación del equipo, utilizando el poliuretano rígido, se obtuvo un error del 7%, se asume que el procedimiento para el ensayo fue realizado correctamente, como también los equipos electrónicos se encuentran debidamente calibrados.

Ya calculados los parámetros estadísticos con anterioridad se presenta la incertidumbre de los datos obtenidos en el ensayo de validación realizado.

**Tabla 3.7 Incertidumbre de las mediciones**

Descripción	Resultado (W/m· K)
Incertidumbre	$\pm 3.00 \times 10^{-4}$

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

El valor resultante obtenido para el poliuretano rígido es de  $0.026 \pm 0.300 \times 10^3$  (W/m·K) comparando con la conductividad térmica establecida en algunas fuentes bibliográficas y normalizadas se encuentra con un valor alrededor de 0.028 (W/m·K).

### **3.4 Análisis de Costos**

#### **3.4.1 Costos de diseño y fabricación**

Se realiza un análisis de costo, en base a los precios de los componentes que constituyen el equipo de medición de conductividad térmica, soporte y sujeción; además, de herramientas con las cuales no se disponía, servicios de mecanizado entre otros procesos efectuados.

Por otra parte, se incluye remuneración al talento humano (ingeniería y mano de obra técnica).

## Lista de materiales y componentes:

**Tabla 3.8 Lista de materiales y componentes para la construcción**

<b>Descripción</b>	<b>Valor (\$)</b>
Plancha de aluminio	130.00
Resistencia Ni- Cr	50.00
Termocuplas tipo K	90.00
Celdas de Peltier	65.00
Ventiladores 12V	20.00
Modulo celda de peso	25.00
Modulo sensor de peso	15.00
Arduino mega 2560 R3	25.00
Sensor de proximidad	20.00
Corcho	15.00
Madera contrachapada	20.00
Silicona gris (Gasket)	20.00
Poliuretano rígido	28.00
Poliestireno expandido	5.00
Thermolon	20.00
Cinta aislante de fibra de vidrio	30.00
Tubo cuadrado de acero A36	18.50
Esparrago A304	15.00
Tuercas pesadas A304	1.00
Rodamiento de bolas	5.00
Papel de lija	10.00
Disco de zirconio	9.00
Disco de corte	9.00
Disco esmerilador	10.00
<b>Costo total</b>	<b>\$ 655.50</b>

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

La lista que se muestra, de materiales y componentes fue adquirida dentro del mercado local en un valor total de \$ 655.50.

**Tabla 3.9 Lista de servicios de proceso**

Descripción	Valor (\$)
Corte con guillotina	7.00
Fresado de placas de aluminio	40.00
Cepillado de placas de aluminio	50.00
<b>Costo Total</b>	<b>\$ 97.00</b>

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

El total de costos de servicios es de \$97.00, el cual se realizó en un taller particular, el mismo que cuenta con las herramientas necesarias.

A continuación, se realiza un análisis de costos de mano de obra en cuanto al diseño y construcción del equipo.

**Tabla 3.10 Costos de mano de obra**

Descripción	Cantidad	Tiempo Estimado (Días)	Costo Hora (\$)	Hombre-Hora	Costo Total (\$)
Ingeniero	1	5	15.00	40	607.60
Técnico	1	7	6.00	56	354.48
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>21.00</b>	<b>96</b>	<b>962.08</b>

Fuente: (Ministerio Ecuatoriano del Trabajo , 2018)

**Tabla 3.11 Costo total de construcción del equipo**

Descripción	Valor (\$)
Costos de materia prima	655.50
Costos de mano de obra	962.08
Costos de servicios	97.00
<b>Costo total de construcción</b>	<b>\$ 1,714.58</b>

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

El total de costo en materiales y componentes; servicios y mano de obra, se estimó un resultado de \$ 1,714.58, como valor del equipo, cabe recalcar que los costos se pueden elevar al realizar modificaciones para mejorar

tanto diseño y construcción, este incremento se puede analizar en trabajos futuros.

### 3.4.2 Análisis de Costos de operación

Se calcula el costo energético de operación, este cálculo entrega como resultado la relación costo/día:

- Costo del Kilovatio-Hora (kWh) para el sector industrial:  $0.09 \frac{\$}{\text{kWh}}$
- Potencia suministrada al equipo= 0.1 kW

Costo del consumo energético del equipo se puede estimar en la Tabla 3.12

**Tabla 3.12 Costo del consumo energético**

Detalle	Valor
Potencia suministrada (kW)	0.1
Potencia consumida (kWh/día)	2.4
Costo del consumo (\$/día)	0.22

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

Se calculó un costo de operación de \$ 0.22, por cada medición de muestra, considerando el peor de los casos con un tiempo estimado de 24 horas.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

1. Se logró desarrollar un equipo medidor del coeficiente conductivo térmico de tipo placa plana, para realizar ensayos sobre muestras de materiales que sean aislantes térmicos.
2. Mediante los cálculos de transferencia de calor se pudo establecer los parámetros máximos para lograr el flujo de calor de la sección medidora  $H=6W$  y una densidad de flujo de calor  $q'' = 266.7W/m^2$  para la guarda y el calentador auxiliar, así como el flujo de calor unidireccional de  $4.18 W$  a través del espécimen, para obtener mediciones aproximadas de  $0.015$  a  $0.5 W/m \cdot K$ .
3. El equipo cumple con las estandarizaciones sugeridas en las distintas normas de construcción utilizadas (ISO 8302:1991, BS EN 12667:2001 y ASTM C117:2013); no obstante, solo se realizó el ensayo de validación en el poliuretano ( $k=0.026$  obtenido del ensayo de validación) y el poliestireno, estableciéndose un error porcentual del 7% en su validación, cumpliendo con una medición confiable.
4. En cuanto al sistema de control y adquisición de datos, el Arduino es un eficiente microcontrolador, pero a su vez los sensores utilizados en él generan ruido electrónico, por lo que se realiza la toma de una cantidad considerablemente grande de mediciones para trabajar con promedios y así poder disminuir los datos falsos provocados por el ruido eléctrico.
5. Las gráficas obtenidas se ven afectadas por el ruido eléctrico mencionado, eso dificulta poder observar una estabilidad total pero no obstante esa pequeña debilidad, el equipo obtiene mediciones aceptables, ya que la metodología y condiciones para la realización de los ensayos se las

practica tal como sugieren las normas utilizadas para así poder asumir un estado estable y un flujo unidireccional de calor.

6. El costo del diseño y construcción del prototipo de \$1,800.00 es notablemente pequeño, frente al costo comercial de distintas marcas que están en el rango de \$12,000.00 a \$60,000.00 (Lambda-Meßtechnik GmbH Dresden, 2018), ya sean de origen chino o alemán. Con esto se demuestra la viabilidad del proyecto, cumpliendo con un buen costo-beneficio, en cuanto a resultados confiables.

## **4.2 Recomendaciones**

1. Mejorando el error en las medidas resultantes, el equipo de medición de conductividad térmica puede llenar ese vacío de disponibilidad en distintos laboratorios que lo requieran.
2. Realizar los cortes de las placas de aluminio, utilizando una fresadora para asegurar la planicidad requerida.
3. El sistema de movilidad del conjunto calentador se debe mejorar, con el fin de tener mayor desplazamiento vertical, ya sea mediante la implementación de un tornillo de potencia con un paso de rosca mayor, en comparación con el utilizado en el diseño actual.
4. Se recomienda utilizar resistencias calefactoras planas y flexibles, de tal forma que el calor suministrado sea uniforme y no exista complicaciones técnicas al momento del ensamble; de igual manera, mantener las placas planas de aluminio limpias y evitar golpes en las mismas, para no afectar las mediciones por causa de la rugosidad, así como ejercer la presión necesaria de 2.5 kPa sobre la muestra para tener lecturas adecuadas.
5. Calibrar el microcontrolador de manera periódica, para disminuir el error que aportan los componentes electrónicos en cada ensayo.

6. En lo que respecta, al conjunto electrónico de la placa fría, se recomienda utilizar un sistema con mayor eficiencia en comparación con las celdas de Peltier utilizadas.
7. Realizar los ensayos en ambientes controlados, donde no se supere los 24°C; así como, cumplir con los requerimientos geométricos, para el caso de muestras que no cumplan con las medidas geométricas, por lo que se aconseja realizar guardas de poliestireno.
8. Referente a los ensayos, se debe realizar mediciones de validación en un material cuyo coeficiente de conductividad térmica sea aproximadamente 0.26 (W/m·K) obedeciendo al valor intermedio del rango de medición del equipo que es de 0.015 a 0.5 (W/m·K), de esa manera poder obtener errores con mayor precisión.

# BIBLIOGRAFÍA

- ALLDATASHEET.COM. (2018). *Electronic Components Datasheet Search*. Obtenido de ALLDATASHEET.COM: <http://www.alldatasheet.com>
- Alvarado, K., & Rueda, J. (2018). Proyecto Integrador "Diseño y Construcción de un Equipo Medidor de Conductividad Térmica en Estado Estable". *Diseño y Construcción de un Equipo Medidor de Conductividad Térmica en Estado Estable*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
- ASTM. (2013). *ASTM-C177 "Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus"*. EE.UU: ASTM.
- Bellet, Sengelin, & Thieriot. (1975).
- BS EN- 12667. (2001). *BS EN- 12667 "Thermal Performance of Building Materials and Products. Determination of Thermal Resistance by means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods"*. UK: EN.
- Buck, W., & Rudtsch, S. (2006). *Springer Handbook of Metrology and Testing "8. Thermal Properties"*. Berlin: T. Saito; L. Smith; H. Czichos.
- Cedillo, C. (2015). "Diseño y fabricación de un equipo para la medición de la conductividad térmica en líquidos mediante el método transiente del hilo caliente. *Proyecto de Graduación "Diseño y fabricación de un equipo para la medición de la conductividad térmica en líquidos mediante el método transiente del hilo caliente"*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa; Un enfoque Práctico*. Reno, Nevada, EE.UU: Mc. Graw Hill.
- Czichos, saito, & Smith. (2006). *Springer Handbook of Materials Measurement Method*. New York: Springer Science & Business Media.
- Hibbeler, R. (2012). *Análisis Estructural*. Pearson.
- Incropera, Lavine, Dewitt, & Bergman. (2008). *Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa*. New Jersey: Jhon Wiley and Sons.
- ISO 8302. (1991). *ISO-8302 "Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Guarded hot plate apparatus"*. EE.UU: ISO.
- Jakob, M. (1964). *Heat Transfer V.1*. New York: Jhon Wile and Sons Inc.

- Mcabe, Smith, & Harriot. (2007). *Operaciones Unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill.
- Ministerio Ecuatoriano del Trabajo . (2018). *Tablas de salarios mínimos sectoriales 2018*. Obtenido de Ministerio del Trabajo: <http://www.trabajo.gob.ec/>
- Momentive Performance Materials Inc. (2011). Thermal Management Brochure. *Thermal Management Brochure*. New York, USA.
- Paez, C. T. (2015). Análisis, Desarrollo y Evaluación de Aislantes Térmicos. *Análisis, Desarrollo y Evaluación de Aislantes Térmicos*. ESPE, Quito.
- Thermonamic. (2016). *Especificaciones del modulo termoeléctrico*. Obtenido de [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn): <http://www.thermonamic.com.cn>
- TOPE international CO. (2010). *TOPE*. Obtenido de <http://www.topeintl.com/alambre-de-nicrom.html>
- Touloukian, Y. (1970). *Thermal Conductivity Nonmetallic Solids*. New York: IFI/Plenum.
- Yüksel, N. (2010). The investigation of structure and operating parameters effect on the heat transfer coefficient in porous structures. *The investigation of structure and operating parameters effect on the heat transfer coefficient in porous structures thesis*. Uludag University, Bursa.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

**Tabla A1 Cálculo geométrico de alambre de Ni- Cr**

<b>Sección de aplicación en el equipo</b>	<b>Calibre (mm)</b>	<b>Núm. De vueltas en la espiral</b>	<b>Longitud total (m)</b>
Medición	0.3	4	1.2
Guarda	0.5	4	3.6
Auxiliar	0.6	9	5.4

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A2 Cálculo teórico y selección de alambre de Ni- Cr**

<b>Diámetro (mm) de Alambre Ni- Cr 80/20</b>	<b>Resistencia por unidad de longitud (<math>\Omega/M</math>)</b>	<b>Potencia de alimentación máxima (V)</b>	<b>Longitud máxima a 6w (m)</b>
0.02	3483.8	12	0.01
0.04	857.1	12	0.03
0.06	385.5	12	0.06
0.08	216.9	12	0.11
0.1	138.8	12	0.17
0.12	96.38	12	0.25
0.18	42.83	12	0.56
0.2	34.7	12	0.69
0.3	15.42	12	1.56
0.4	8.67	12	2.77
0.8	2.16	12	4.32
1.2	0.96	12	6.23

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A3 Resultados teóricos de las ecuaciones 2.13 y 2.16**

Detalle	Valor
Flujo de calor removido por las celdas de Peltier (W)	20.05
Calor perdido en el borde (W)	$55.67 \times 10^{-3}$
Densidad de flujo de calor suministrado por el conjunto calentador (W/m <sup>2</sup> )	$2.67 \times 10^2$

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A4 Resultados teóricos del diseño de magnitudes de operación de las celdas Peltier**

Detalle	Valor teórico	Valor practico
C.P.O	≈0.35	
Voltaje de alimentación (V)	2.50	4.00
Corriente de alimentación (A)	1.00	1.50
Calor removido por Celda Peltier (W)	2.50	-
Potencia de alimentación necesaria para cada celda (W)	2.50	6.00
Potencia Eléctrica total (9 celdas) (W)	22.50	54.00

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A5 Resultados relevantes del diseño estructural**

Detalle	Valor
Momento de Inercia $I_z$ (m <sup>4</sup> )	$5.30 \times 10^{-7}$
Momento en eje z $M_z$ (N.m)	101.25
Área transversal (m <sup>2</sup> )	$2.24 \times 10^{-4}$
Fuerza aplicada (N)	225
Esfuerzo máximo (MPa)	4.82
Esfuerzo máximo/2 (MPa)	2.41
Esfuerzo de fluencia $S_y$ (MPa)	250

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A6 Registro de temperaturas de prueba de estabilización sobre poliuretano**

Temperatura	Detalle	Valor (°C)
T <sub>1</sub>	Sección medidora	33.50
T <sub>2</sub>	Sección de enfriamiento	26.25

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A7 Datos de validación de ensayo en poliuretano**

<b>Hora de medición</b>	<b>T Placa fría (°C)</b>	<b>T Placa caliente (°C)</b>	<b>T Ambiente (°C)</b>	<b>Conductividad Térmica (W/m·K)</b>
17:43:16	25.93	33.57	28.80	2.54E-02
17:44:05	26.07	33.72	28.70	2.54E-02
17:44:54	26.05	33.57	29.00	2.58E-02
17:45:43	26.07	33.70	29.00	2.54E-02
17:46:32	26.10	33.55	28.60	2.60E-02
17:47:21	26.22	33.55	28.60	2.65E-02
17:48:09	26.20	33.70	28.60	2.59E-02
17:48:58	26.00	33.65	28.60	2.54E-02
17:49:47	26.30	33.58	28.80	2.67E-02
17:50:36	26.07	33.68	29.00	2.55E-02
17:51:25	26.22	33.70	28.70	2.60E-02
17:52:14	26.30	33.58	28.80	2.67E-02
17:53:02	26.35	33.72	28.60	2.63E-02
17:53:51	26.22	33.60	28.60	2.63E-02
17:54:40	26.30	33.60	28.60	2.66E-02
17:55:29	26.27	33.58	28.60	2.66E-02
17:56:18	26.27	33.53	28.60	2.68E-02
17:57:07	26.35	33.55	28.60	2.69E-02
17:57:55	26.15	33.60	28.60	2.60E-02
17:58:44	26.27	33.60	28.60	2.65E-02
17:59:33	26.47	33.60	28.60	2.72E-02
18:00:22	26.30	33.68	28.60	2.63E-02
18:01:11	26.42	33.63	28.60	2.69E-02
18:02:00	26.20	33.58	28.60	2.63E-02
18:02:48	26.35	33.58	28.60	2.69E-02
18:03:37	26.45	33.52	28.60	2.74E-02
18:04:26	26.60	33.40	28.60	2.85E-02
18:05:15	26.10	33.65	28.60	2.57E-02
18:06:04	26.37	33.63	28.60	2.68E-02
18:06:53	26.42	33.58	28.60	2.71E-02
18:07:41	26.55	33.68	28.60	2.72E-02
18:08:30	26.45	33.63	28.60	2.70E-02
18:09:19	26.27	33.75	28.60	2.60E-02
18:10:08	26.57	33.68	28.60	2.73E-02
18:10:57	26.30	33.70	28.60	2.62E-02
18:11:46	26.52	33.78	28.60	2.68E-02
18:12:34	26.62	33.65	28.60	2.76E-02
18:13:23	26.45	33.65	28.60	2.69E-02
18:14:12	26.37	33.55	28.60	2.70E-02
18:15:01	26.40	33.67	28.60	2.67E-02
18:17:27	26.47	33.70	28.50	2.69E-02
18:18:16	26.45	33.38	28.60	2.80E-02
18:19:05	26.32	33.73	28.60	2.62E-02
18:19:54	26.35	33.40	28.50	2.75E-02
18:21:32	26.30	33.50	28.60	2.69E-02
18:23:09	26.30	33.55	28.30	2.68E-02
18:23:58	26.17	33.65	28.50	2.60E-02

Continuación de tabla A7				
18:24:47	26.30	33.55	28.20	2.68E-02
18:25:36	26.27	33.55	28.40	2.67E-02
18:26:25	26.42	33.68	28.60	2.68E-02
18:27:13	26.02	33.60	28.50	2.56E-02
18:28:02	26.07	33.70	28.60	2.54E-02
18:28:51	26.22	33.60	28.60	2.63E-02
18:29:40	26.27	33.40	28.60	2.72E-02
18:30:29	26.15	33.47	28.50	2.65E-02
18:31:18	26.12	33.53	28.30	2.62E-02
18:32:06	26.32	33.47	28.20	2.71E-02
18:32:55	26.22	33.53	28.50	2.66E-02
18:33:44	26.18	33.52	28.30	2.64E-02
18:34:33	26.35	33.68	28.30	2.65E-02
18:35:22	26.25	33.80	28.50	2.57E-02
18:36:11	26.40	33.70	28.50	2.66E-02
18:36:59	26.17	33.72	28.50	2.57E-02
18:38:37	26.27	33.58	27.70	2.66E-02
18:39:26	26.17	33.57	28.40	2.62E-02
18:40:15	26.37	33.65	28.20	2.67E-02
18:42:41	26.25	33.45	28.00	2.69E-02
18:43:30	26.35	33.50	28.10	2.71E-02
18:44:19	26.15	33.55	28.10	2.62E-02

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A8 Variables estadísticas de los resultados**

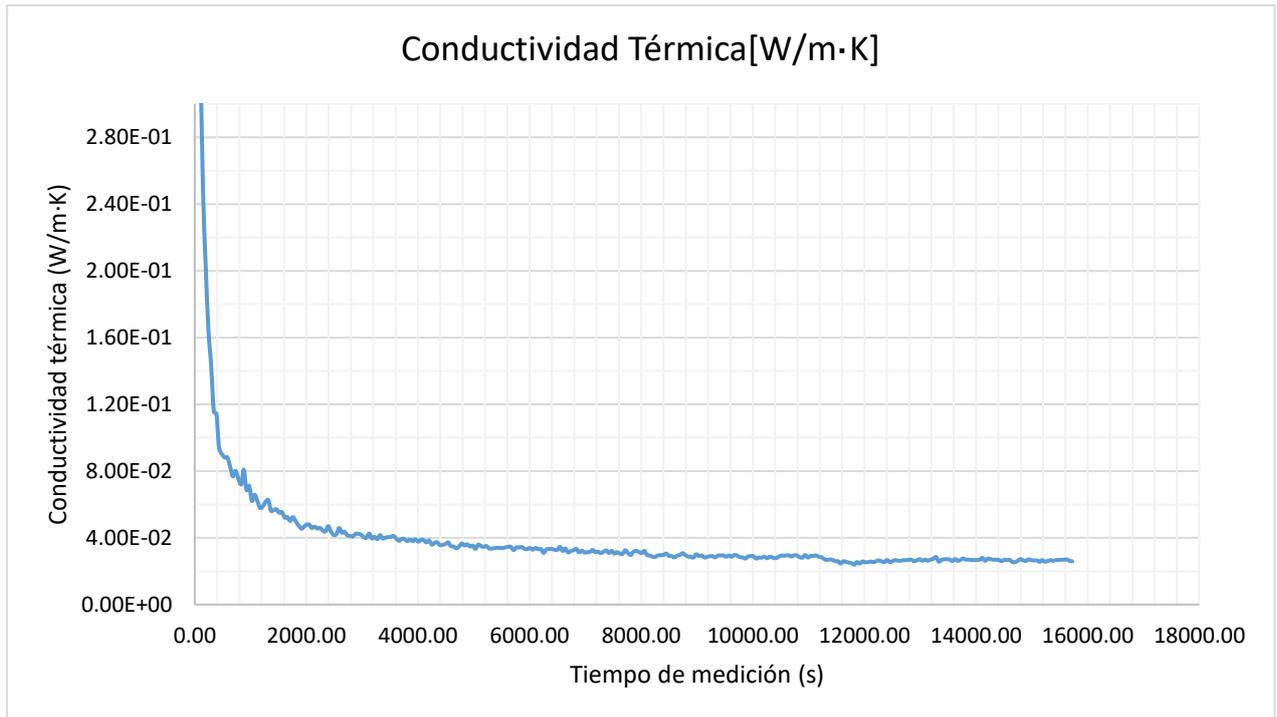
n-1	Grados de libertad	69
$t_{\frac{\alpha}{2}n-1}$	Punto crítico	1.99
$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$	Límite de confianza inferior	$2.63 \times 10^{-2}$
$\bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$	Límite de confianza superior	$2.66 \times 10^{-2}$

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

**Tabla A9 Resultado del ensayo sobre poliuretano rígido**

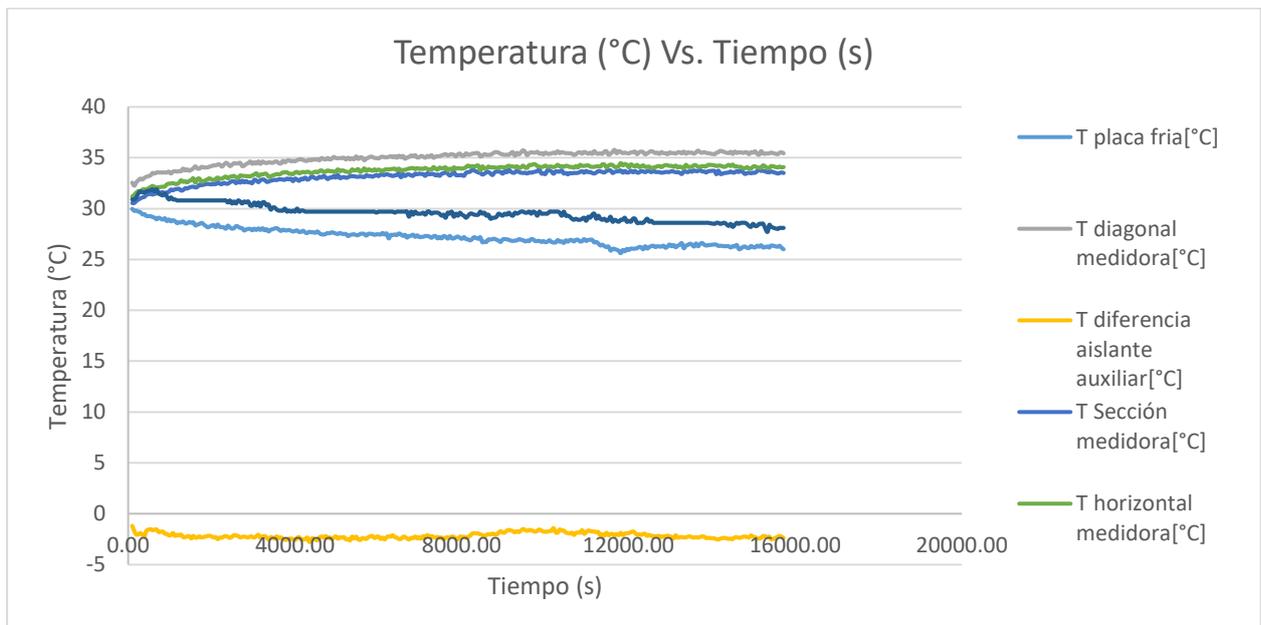
T de placa fría (°C)	T de placa caliente (°C)	Flujo de calor generado (W)	Conductividad (W/m·K)
26.25	33.50	0.22	$2.6 \times 10^{-2}$

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)



**Figura A1 Gráfica de Conductividad térmica vs. Tiempo de estabilización del ensayo sobre poliuretano**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)



**Figura A2 Gráfico de estabilización de la temperatura respecto al tiempo**

Fuente: Propia (Alvarado & Rueda, 2018)

# ANEXO B

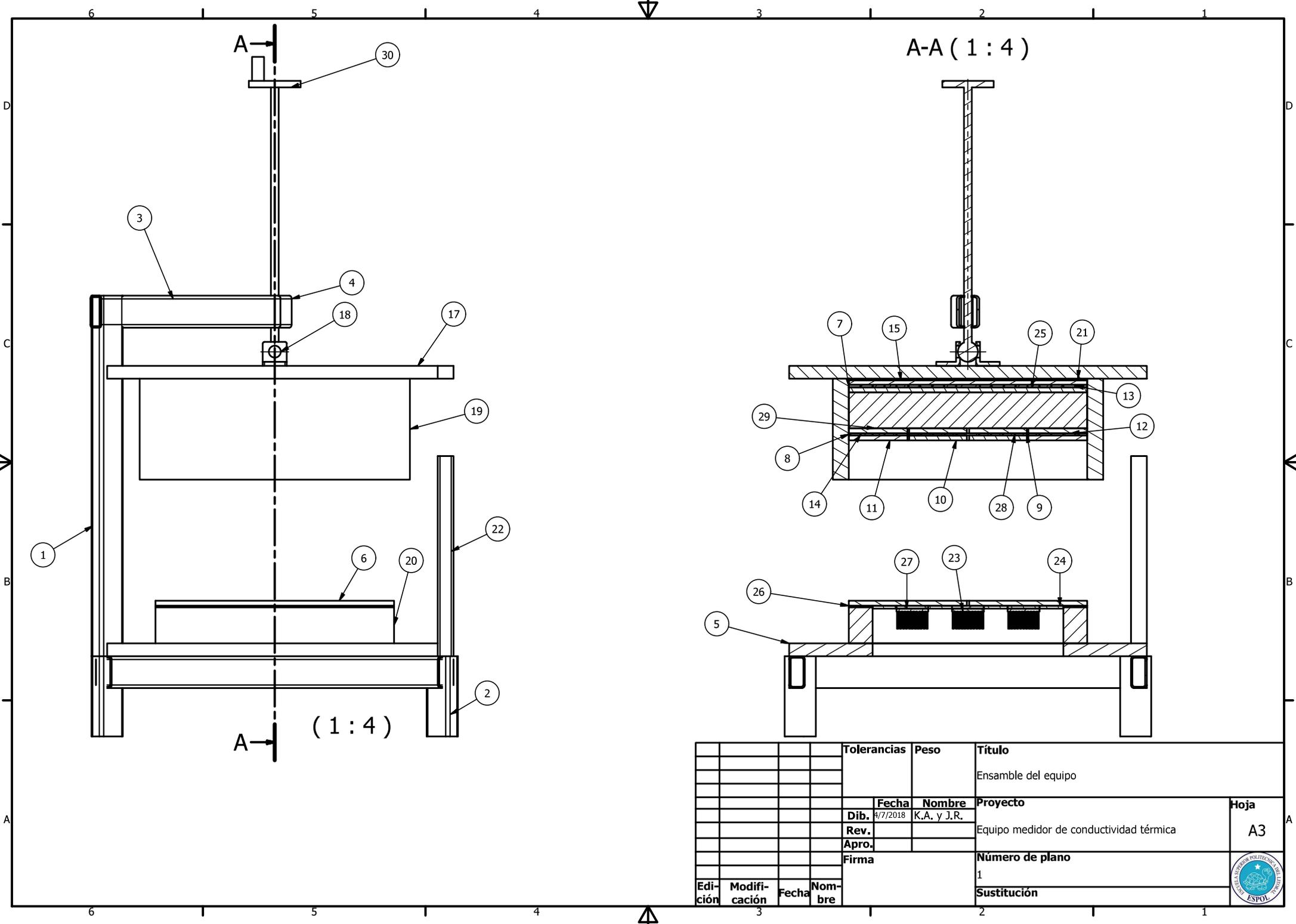
**Tabla B1 Resistencia respecto a la longitud de alambre de Ni- Cr**

O.D.	Sección	Área superficial	Cr20Ni80,Cr30Ni70,Cr15Ni60			Cr20Ni35,Cr20Ni30		
			Resistividad $\mu\Omega\cdot m, 20^{\circ}C 1.09 \sim 1.20 \pm 0.05$			Resistividad $\mu\Omega\cdot m, 20^{\circ}C 1.04 \sim 1.06 \pm 0.05$		
mm	mm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /m	Resistencia $\Omega/m, 20^{\circ}C$	Longitud m/kg	Peso kg/m	Resistencia $\Omega/m, 20^{\circ}C$	Longitud m/kg	Peso kg/m
0.1	0.0078	3.14	143.9	15578	0.0000641	132.4	16228	0.0000616
0.12	0.0113	3.77	99.9	10753	0.0000929	91.96	11202	0.0000892
0.15	0.0177	4.71	63.94	6865	0.0001456	58.85	7151.5	0.00014
0.17	0.0227	5.34	49.78	5353	0.0001868	45.82	5576.3	0.000179
0.19	0.0284	5.97	39.85	4278	0.0002337	36.86	4457.1	0.000224
0.22	0.038	6.71	29.72	3198	0.0003126	27.36	3331.1	0.0003
0.25	0.0491	7.85	22.86	2475	0.000404	21.19	2578.1	0.000388
0.28	0.0616	8.8	18.35	1973	0.0005068	16.89	2054.9	0.000487
0.3	0.0707	9.42	15.98	1718	0.000582	14.71	1790.7	0.000558
0.32	0.0804	10.05	14.05	1511	0.0006618	12.93	1574.4	0.000635
0.35	0.0962	11	11.74	1263	0.0007917	10.81	1315.8	0.00076
0.4	0.1257	12.57	8.992	966.6	0.001035	8.276	1007	0.000993
0.45	0.159	14.14	7.105	764.2	0.001309	6.539	796.1	0.00126
0.5	0.1963	15.71	5.755		0.001616	5.297	644.8	0.00155
0.6	0.283	18.85	4.103	429.4	0.002329	3.749	447.3	0.00224
0.7	0.385	22	3.014	315.6	0.003169	2.754	328.8	0.00304
0.8	0.503	25.1	2.308	241.6	0.004139	2.109	251.7	0.00397
0.9	0.636	28.3	1.823	191	0.005236		199	0.00503
1.0	0.785	31.4	1.477	154.8	0.00646	1.35	161.3	0.0062
1.2	1.131	37.7	0.999	107.4	0.009311	0.9196	111.9	0.00894
1.4	1.539	44	0.734	78.95	0.01267	0.6756	82.25	0.01216
1.6	2.01	50.3	0.562	60.45	0.01654	0.5173	62.98	0.01588
1.8	2.54	56.5	0.444	47.84	0.0209	0.4087	49.84	0.02006
2	3.14	62.8	0.36	38.7	0.02584	0.331	40.31	0.02408
2.2	3.8	69.1	0.297	31.98	0.03127	0.2736	33.31	0.03002
2.6	5.309	81.68	0.2053	22.98	0.04369	0.2109	23.84	0.04195
2.8	6.16	88	0.184	19.73	0.05068	0.1689	20.55	0.04866
3.0	7.07	94.2	0.16	17.19	0.05817	0.1471	17.9	0.05587
3.5	9.62	110	0.117	12.63	0.07918	0.1081	13.16	0.07599
4.0	12.57	125.7	0.09	9.667	0.1034	0.08276	10.07	0.0993
4.5	15.9	141.4	0.071	7.642	0.1309	0.06539	7.961	0.1256
5.0	19.63	157.1	0.056	6.19	0.1616	0.05297	6.448	0.1551
5.5	23.8	172.8	0.049	5.105	0.1959	0.04462	5.319	0.188
6.0	28.3	188.5	0.041	4.294	0.2329	0.03749	4.473	0.2236
6.5	33.2	204	0.035	3.66	0.2732	0.03194	3.813	0.2623
7.0	38.5	220	0.03	3.156	0.3169	0.02754	3.288	0.3041

Fuente: (TOPE international CO., 2010)

## **ANEXO C**

### **PLANOS GENERALES**



				<b>Tolerancias</b>	<b>Peso</b>	<b>Título</b>	
						Ensamble del equipo	
						<b>Proyecto</b>	<b>Hoja</b>
				<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	Equipo medidor de conductividad térmica	A3
				<b>Dib.</b>	4/7/2018	K.A. y J.R.	
				<b>Rev.</b>			
				<b>Apro.</b>			
				<b>Firma</b>		<b>Número de plano</b>	
						1	
						<b>Sustitución</b>	
<b>Edición</b>	<b>Modificación</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>				





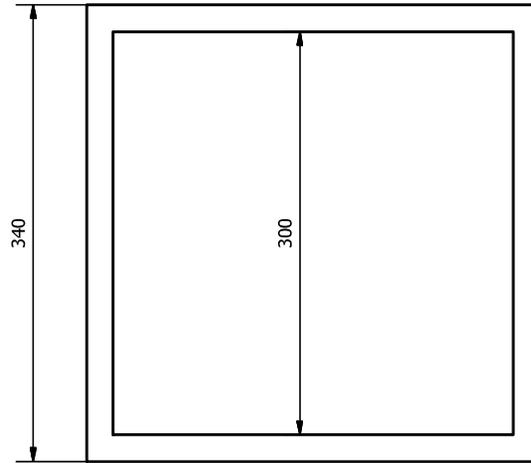
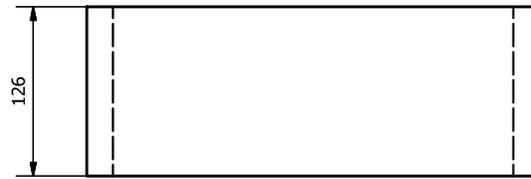




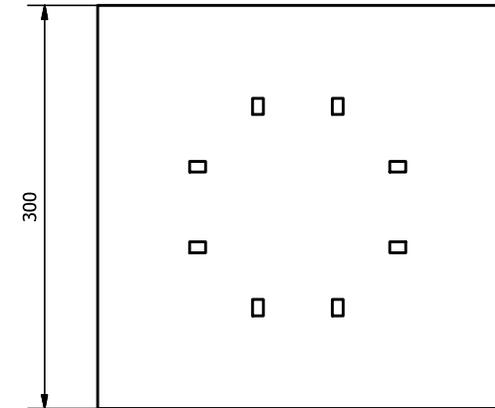
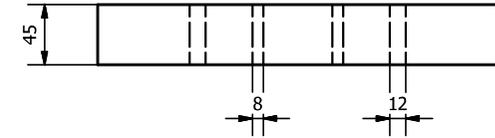




Elemento 19 ( 1 : 4 )



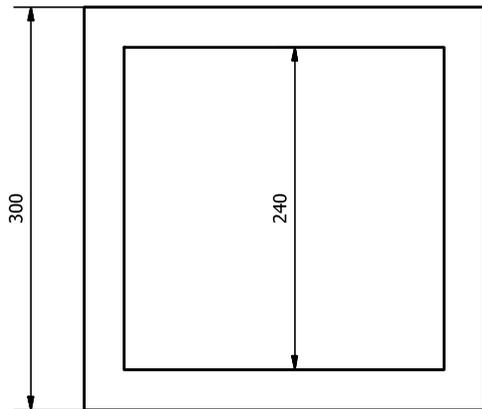
Elemento 29 ( 1 : 4 )



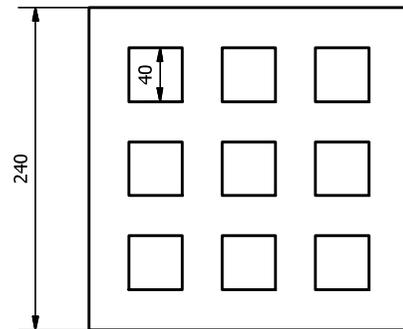
Elemento 21 ( 1 : 4 )



Elemento 26 ( 1 : 4 )



Elemento 24 ( 1 : 4 )



				Tolerancias	Peso	Título	
						Aislantes térmicos para las unidades de calentamiento y enfriamiento.	
						Proyecto	
				Fecha	Nombre	Hoja	
				Dib.	20/5/2018	K.A. y J.R.	A3
				Rev.		Equipo medidor de conductividad térmica	
				Apro.		Número de plano	
				Firma		7	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución	



