



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio experimental de la  
transferencia de calor entre dos  
placas planas horizontales**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Mecánica**

**P R E S E N T A**

Ana Patricia Elizondo Lazcano

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

Dr. Rafael Chávez Martínez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

# Agradecimientos

A mi querida *Casa Hogar para Niñas Graciela Zubirán Villarreal* por brindarme una hermosa infancia llena de amor, respeto y libertad. Por la educación y guía que me han acompañado hasta hoy y la gran familia que somos. A todas mis *hermanas* por una bella infancia y adolescencia donde aprendí a compartir, confiar y por los lindos momentos. A *Nicolás Díaz, Aurora Valle, Gabriela Morán, Graciela Tapia, Alfredo Vidal, Alicia Mendieta, Lizeth Díaz, Reyna Barajas, Jacqueline González, Laura Mendoza, Ángeles Monroy, Camerino, Narciso Ávila, Jose Hernández Noches, Adriana Millán, Tere Rodríguez, Concepción Medina* y a todas las personas que cuidaron, brindaron seguridad y cariño a la pequeña Ana, que se ha convertido en una persona adulta finalizando la etapa universitaria. Los quiero y los llevo en cada paso procurando ser mi mejor versión.

A *Leticia Araceli Alba Aldave* por ser una luz en mi vida. Por mostrarme la belleza de los libros, el conocimiento y que el mundo es un lugar hermoso. Por tu guía, acompañamiento, cariño y apoyo para formar parte de la comunidad universitaria. Por ser una mujer extraordinaria. Por cambiar mi vida. A *José Manuel Saniger Blesa* por ser una inspiración en mi vida. Por tu paciencia, apoyo y comprensión, por creer en mí y ayudarme a recuperar la autoconfianza y la fuerza para seguir mis sueños. Por recordarme que ser feliz puede llevarse bien con alcanzar el éxito. A ambos los amo y les agradezco por ser una familia para mí.

A mi director de Tesis, *Dr. Rafael Chávez Martínez*, por su apoyo, orientación, paciencia, amabilidad y acompañamiento en cada etapa del proyecto. Porque me sentí segura y libre al aportar mis ideas, además

de crecer, aprender y disfrutar el proceso. Y por propiciar que en el laboratorio de Termofluidos prevaleciera un ambiente colaborativo y de iniciativa. Lo admiro y lo respeto.

A los sinodales de la presente Tesis, *Dr. Edgar Ali Ramos Gómez, M.I Joaquín Leonel Reyes García, Dr. Ian Guillermo Monsiváis, Dr. Rafael Chávez Martínez, M.I Mauricio Iván Escalante Camargo* y también al *Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz*, por su aportación en la revisión de este proyecto y dedicación para formar profesionistas.

Al *MI. Miguel Figueroa Bustos* y la *M.E.D María Teresa Peñuñuri* por su acompañamiento y comprensión durante mi trayectoria curricular. Sobre todo, por su amabilidad y calidez cuando requería apoyo. Aquella primera asesoría académica transformó mi vida. Al *MI. Antonio Zepeda Sánchez* y al *Dr. Adrián Espinosa Bautista* por su cordial disposición para brindarme guía y asesoramiento académico, su empatía y comprensión me motivaron a continuar. A los profesores *Alberto Arellano Figueroa* y *Alejandro Rojas Tapia* por su particular forma de enseñar y acrecentar mi pasión por la docencia.

A *Leticia Manríquez*, por su afecto, acercarme al mundo de las matemáticas y apoyo incondicional. A *Arturo Aguilar* por la oportunidad de aprender e incursionar en la docencia. A *Dulce Millán* por su amabilidad y apoyo. A *Magdalena Meneses* y *Yolanda Priego* por su cariño y atención.

A *Ana Zúñiga*, mi mejor amiga, porque compartimos momentos increíbles y eres una hermana para mí. A *Sebastián Horta*, mi mejor amigo, por apoyarme y estar presente a pesar de la distancia. Iluminas mi vida, me transmites paz. Ambos me han aportado para lograr esta meta. A *Ana María Gutiérrez, Antonio Núñez* y *Julieta Vettoretti*, por escucharme, brindarme cariño y apoyo cuando más lo necesitaba. Aprecio y valoro su amistad. A *Alam* y *Aram* por hacer de las clases y el laboratorio un lugar aún más divertido. A *Daniel, Hernán, David, Saúl, Sahira, Ubaldo, Max* y *Aketzalli* por ser grandes compañeros y amigos, he disfrutado la etapa universitaria a su lado. Los quiero a todos.

# Simbología

Símbolo	Definición
b	Longitud del ancho de la <i>placa calefactora</i>
B	Longitud del ancho de la <i>base de acrílico</i>
d	Distancia de separación entre la superficie inferior de la <i>placa calefactora</i> y la superficie superior de la <i>base de acrílico</i>
$e_s$	Espesor de los soportes para termopares. ( $e_s = d_{aire} - 0.4 \text{ mm}$ )
f	Factor de forma (largo/ancho)
F	Factor de visión
$f_p$	Factor de forma promedio
l	Longitud del largo de la <i>placa calefactora</i>
L	Longitud del largo de la <i>base de acrílico</i>
$P_e$	Potencia eléctrica
$q_{aire}$	Calor que se transfiere por medio del aire entre la <i>placa calefactora</i> y la <i>base de acrílico</i>
$q_{aislante}$	Calor que se transfiere por conducción a través del material aislante
r	Distancia entre cada cintas de nicromel
$T_c$	Temperatura caliente
$T_f$	Temperatura fría
$t_s$	Tiempo de estabilización

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Motivación . . . . .	8
1.2. Antecedentes . . . . .	11
1.2.1. Trabajos previos . . . . .	17
1.3. Simplificación del Problema . . . . .	19
1.4. Objetivos específicos de la tesis . . . . .	21
<b>2. Arreglo Experimental</b>	<b>22</b>
2.1. Modelo Experimental . . . . .	23
2.1.1. Diseño de las piezas . . . . .	25
2.1.2. Manufactura . . . . .	30
2.1.3. Distancia de separación $d$ del área de interacción	34
2.2. Sistema de Medición de Temperatura . . . . .	35
2.3. Pruebas . . . . .	40
2.4. Procedimiento experimental . . . . .	42

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	6
2.4.1. Ensayo experimental . . . . .	43
<b>3. Resultados</b>	<b>45</b>
3.1. Efecto de modificar la distancia de separación $d$ . . . . .	50
3.2. Efecto de modificar la potencia suministrada $P_e$ . . . . .	57
<b>4. Conclusiones</b>	<b>65</b>
4.0.1. Trabajo a futuro . . . . .	66
<b>A. Gráficas</b>	<b>68</b>
A.1. Gráficas y Tablas: Efecto de modificar la distancia de separación $d$ sobre la temperatura en el modelo experimental.	68
A.2. Gráficas y Tablas: Efecto de modificar la distancia de separación $d$ sobre el calor transferido y disipado. . . . .	78
A.3. Gráficas: Efecto de modificar la potencia suministrada $P_e$ sobre la temperatura en el modelo experimental . . . . .	81
A.4. Gráficas y Tablas: Efecto de modificar la potencia suministrada $P_e$ sobre el calor transferido y disipado. . . . .	83
<b>B. Método de balance de energía</b>	<b>85</b>
B.1. Planteamiento del problema . . . . .	86
B.2. Simplificación del problema . . . . .	87
B.3. Aplicación del Método de Balance de Energía . . . . .	90
B.4. Solución de la ecuaciones . . . . .	92

**C. Calibración de dispositivos de medición 96**

C.1. Termopares . . . . . 97

C.2. Calibración de termopares . . . . . 97

C.3. Lectura de temperatura . . . . . 100

**D. Tiempo de estabilización 102**

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Año con año se observa la evolución de los equipos de cómputo, en particular de las computadoras portátiles que tienden a ser más pequeñas, delgadas y potentes. Principalmente esta última característica implica que el calor generado aumenta mientras el equipo está en funcionamiento. Sin embargo, la disminución del volumen del equipo requiere que los sistemas de refrigeración también disminuyan sus dimensiones y aumente el calor a disipar, un gran reto para los científicos e ingenieros que desarrollan estos sistemas [1].

El sistema de enfriamiento de una computadora personal se compone de un *caloriducto*, tubo usualmente de cobre que en su interior tienen una superficie porosa y un líquido de enfriamiento, adherido al micro-



procesador y a la tarjeta gráfica, un intercambiador de calor pasivo, así como uno o hasta tres ventiladores que fuerzan el aire a través de las aletas. Estos sistemas tienen como finalidad transportar el calor desde el punto de generación hasta el borde de la computadora personal donde se encuentran el intercambiador de calor y el ventilador para transferir el calor al ambiente. Generalmente, las ranuras designadas a la entrada de aire a temperatura ambiente se encuentran en la parte inferior de la computadora y las aletas en la salida del aire caliente, que usualmente se encuentran en un costado del equipo. Cuando los componentes dentro de la computadora personal no disipan suficiente calor se presentan fallas y ocasionan que el rendimiento del sistema disminuya y, en el peor de los casos, que algún componente se averíe por sobrecalentamiento. En la Figura 1.1 se ilustra el esquema general del sistema de enfriamiento de una computadora portátil donde los recuadros en verde representan los componentes que generan más calor como la tarjeta gráfica y el procesador. El conducto color naranja representa el caloriducto que se encuentra en contacto con los componentes en un extremo y cerca del ventilador en el extremo opuesto.

Uno de los problemas típicos en los equipos de cómputo es que el aire frío que ingresa por las ranuras no se encuentra a una temperatura suficientemente baja para que el intercambio de calor sea eficiente. En la Figura 1.2 se muestra cómo funcionaría un sistema de enfriamiento en el caso ideal (*a*) y en el caso real (*b*). Como se aprecia en la Figura 1.2(a) al entrar el aire por la parte inferior del equipo a temperatura ambiente este

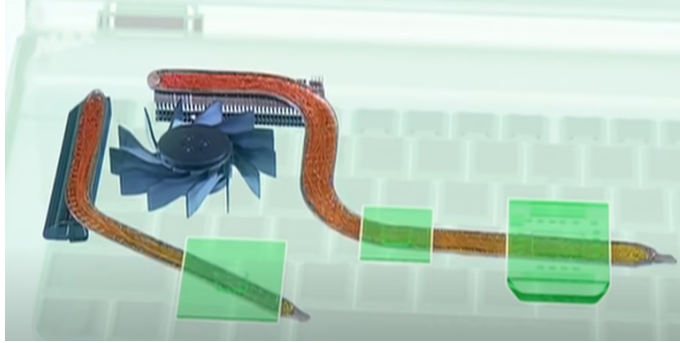
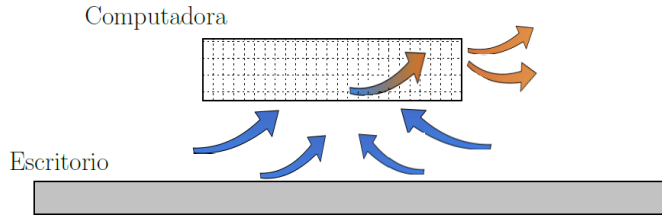
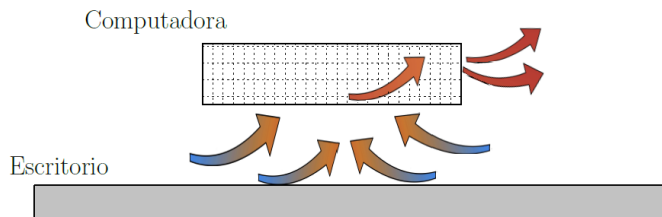


Figura 1.1: Esquema de los componentes de un sistema de enfriamiento de una computadora personal [2].



(a) Enfriamiento ideal.



(b) Enfriamiento real.

Figura 1.2: Esquema del sistema de enfriamiento de una computadora personal.

se dirige al costado del dispositivo y al salir ha incrementado su temperatura. Mientras que en la Figura 1.2(b) el aire que ingresa por la parte

inferior, en su trayectoria por debajo de la computadora, se pre-calienta ocasionando que disminuya la eficiencia del sistema de enfriamiento.

Otro efecto al interior de las computadoras portátiles es la transferencia de calor entre los componentes de mayor temperatura a su entorno, como la placa base y de esta a la superficie inferior de la computadora portátil. A su vez, esta última transfiere calor a la superficie donde descansa (escritorio) presentándose el efecto de enfriamiento real ilustrado en la Figura 1.2(b).

En la presente tesis se construyó un modelo experimental que emula la transferencia de calor entre la superficie inferior de una computadora portátil y un escritorio, teniendo entre ellas una distancia de separación  $d$ . Se desea determinar el efecto de modificar  $d$  sobre el calor transferido entre ambas superficies.

## 1.2. Antecedentes

El mundo como lo conocemos se compone de diferentes seres, objetos y medios interactuando entre sí mediante la transferencia de energía que se manifiesta a través de trabajo y calor. Se puede percibir la transferencia de calor en la vida cotidiana cuando existe un gradiente o diferencia de temperaturas, por ejemplo, cuando los hielos se derriten dentro de un vaso con agua a temperatura ambiente, también cuando usamos una secadora de cabello o ponemos sopa en la estufa para calentarla.

Cuando dos sistemas interactúan, y se encuentran a diferente temperatura siempre buscarán un equilibrio térmico. El calor fluirá del sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura, tal como lo establece la Ley Cero de la Termodinámica. Al proceso donde la energía en forma de calor viaja de un sistema a otro, debido a una diferencia de temperaturas, se le denomina transferencia de calor de la cual existen tres modos:

*Transferencia de calor por conducción.* Esta se presenta a través de un cuerpo sólido o un fluido estático y es el resultado de la interacción energética entre las moléculas del medio. Por ejemplo, en la Figura 1.3 se aprecia un sartén que se calienta en su superficie inferior con la flama de la estufa. Posteriormente, por conducción se calentarán las paredes laterales y el mango del sartén (punto B). Esto sucede porque las moléculas de la superficie inferior son más energéticas y comienzan a vibrar excitando a las moléculas vecinas, es decir, la energía se transfiere desde las moléculas con mayor energía (punto A) a las de menor energía (punto B).



Figura 1.3: Ejemplo de transferencia de calor por conducción.

Este modo de transferencia de calor se rige por la Ley de Fourier representada en la Ecuación 1.1, que establece que el flujo de calor es igual a la habilidad que tiene un material para conducir calor por la variación de temperatura entre dos puntos [3].

$$q''_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

donde  $q''_{cond}$  es el flujo de calor y sus unidades son  $[W/m^2]$ , mientras que  $k$   $[W/mK]$  es la conductividad térmica que depende del material, mientras que  $\frac{dT}{dx}$  es el gradiente de temperatura  $[K/m]$ , también puede emplearse en unidades  $[^{\circ}C/m]$  debido a que se trabaja con una diferencia de temperaturas. La energía siempre fluye del elemento con mayor temperatura hacia el de menor temperatura, por lo tanto, agregar el signo negativo asegura que matemáticamente se establezca la dirección de la energía en la ecuación.

*Transferencia de calor por radiación.* Se refiere a la energía que emite la superficie de un cuerpo, independientemente de su forma, cuando se encuentra a una temperatura superior a  $0 K$ . El calor transferido por radiación viaja por medio de ondas electromagnéticas, por lo que no hay necesidad de que exista contacto físico entre los cuerpos [3]. Un ejemplo de un cuerpo que transfiere energía térmica por radiación es el sol, que irradia energía térmica sobre una casa para mascotas, como se muestra en la Figura 1.4. El sol no se encuentra en contacto directo con la superficie del techo, aún así es capaz de incrementar su temperatura.



Figura 1.4: Ejemplo de transferencia de calor por radiación.

La Ley de Stefan-Boltzmann permite calcular el calor transferido por radiación entre un cuerpo y su entorno, esta se presenta en la Ecuación 1.2, y establece que el balance de energía por radiación de un cuerpo con su entorno por unidad de área es proporcional a la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia:

$$q''_{rad} = \epsilon \sigma F (T_s^4 - T_{ent}^4) \quad (1.2)$$

donde  $q''_{rad}$  es el flujo de calor por radiación [ $W/m^2$ ]. La emisividad  $\epsilon$  es una propiedad de la superficie del material cuyo valor se encuentra entre 0 y 1. Es cercano a 0 para superficies pulidas o de color claro y aproximadamente 1 para superficies de color negro mate. Por otro lado,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y tiene el valor de  $5.67 \times 10^{-8}$  [ $W/m^2K^4$ ]. Mientras que  $T_s$  se refiere a la temperatura de la superficie

y  $T_{ent}$  a la temperatura del entorno, ambas en *Kelvin*. Por su parte,  $F$  es el factor de visión, un parámetro adimensional que indica el grado de interacción de la radiación térmica emitida entre dos superficies que varía entre 0 y 1 [4].

*Transferencia de calor por convección.* Se presenta en fluidos que interactúan con una superficie sólida. Se caracteriza por el movimiento global del fluido, en algunos casos es posible apreciar el movimiento del fluido con técnicas de visualización. Existen dos tipos de transferencia de calor por convección que dependen del mecanismo que activa el movimiento del fluido, se puede clasificar en:

(a) **Convección forzada:** el movimiento del fluido es activado por un dispositivo mecánico, como una bomba o un ventilador. Por ejemplo, un aire acondicionado tiene un ventilador el cual fuerza el aire a circular por el evaporador, como se ilustra en la Figura 1.5(a).

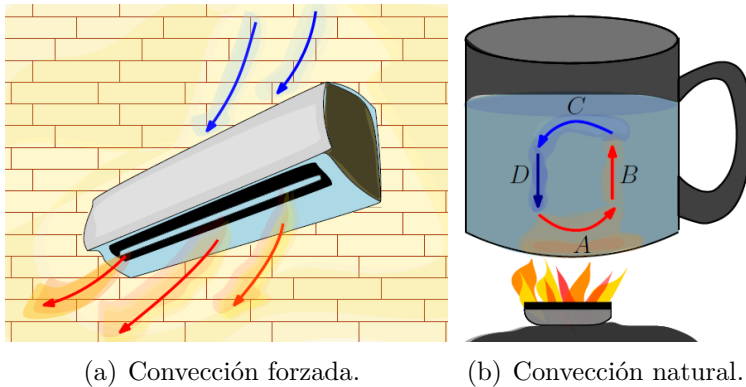


Figura 1.5: Ejemplo de transferencia de calor por convección.

(b) **Convección natural:** el movimiento de las partículas es activado por fuerzas de flotación, debidas a gradientes de temperatura o de concentración [3]. Por ejemplo, en la Figura 1.5(b) se ilustra un recipiente que contiene agua expuesta a una fuente de energía. Las partículas de agua que se encuentran al fondo del recipiente reciben energía (punto A) lo cual aumenta su temperatura y, por ende, su densidad disminuye. Cuando la densidad de las partículas es menor que su entorno se genera una fuerza de flotación positiva (punto B). Al encontrarse en la superficie del agua las partículas transfieren calor al ambiente (punto C) y su temperatura disminuye aumentando su densidad, por lo tanto, se tienen fuerzas de flotación negativas que provocan que las partículas desciendan al fondo del recipiente. Por continuidad se genera la circulación de las partículas, proceso que se repite en tanto exista una fuente de energía y un gradiente de temperatura. Este proceso también se puede aplicar para enfriamiento.

La ley de enfriamiento de Newton, la cual se muestra en la Ecuación 1.3, establece que la pérdida de energía en forma de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el fluido de su entorno.

$$q''_{conv} = h (T_{\infty} - T_S) \quad (1.3)$$

donde  $q''_{conv}$  es el flujo de calor sus unidades son  $[W/m^2]$ . El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  es un valor que depende de diversos factores como la geometría de la superficie, las propiedades del



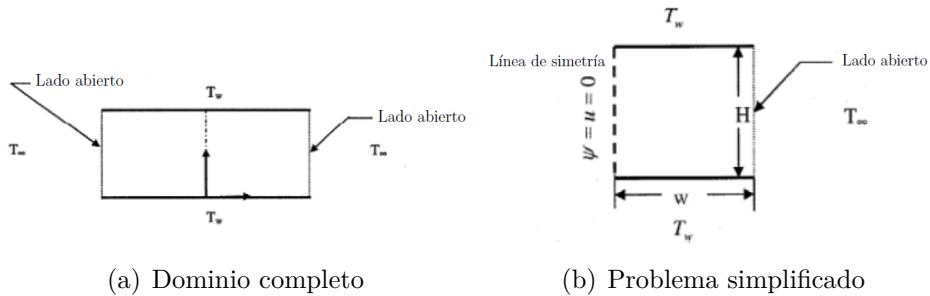


Figura 1.6: Modelo numérico del trabajo de Khanafer y Vafai [1].

fluido y su velocidad. El valor de  $T_\infty$  es la temperatura del ambiente, mientras que la temperatura de la superficie es  $T_s$ , pueden ser en  $K$  ó  $^\circ C$ .

### 1.2.1. Trabajos previos

Hasta donde se sabe, el arreglo propuesto en la presente tesis no ha sido estudiado previamente. Se encontraron trabajos donde se presentan arreglos similares en cuanto a estudiar la transferencia de calor por convección libre, pero difieren en la relación de forma o las condiciones de frontera, e incluso en el fluido de trabajo utilizado. Se han tomado trabajos como referencia a aquellos que comparten la forma de transferencia de calor por convección natural, principalmente estudios experimentales. Por ejemplo, Khanafer y Vafai [1] presentan un trabajo que se basa en establecer condiciones de entorno a un modelo bidimensional abierto en los extremos. Debido a la geometría utilizada consideraron un plano de simetría vertical al centro del modelo y se trabajó solo con la mitad derecha. En la Figura 1.6 se muestra el modelo estudiado y la aplicación

del plano de simetría. La temperatura de la pared superior e inferior se mantuvo constante y superior a la temperatura ambiente. Los parámetros que se variaron son el número de Rayleigh, el número de Prandtl y la relación de aspecto, para estudiar los efectos sobre la temperatura y la velocidad del flujo de aire. Los resultados obtenidos mostraron que al aplicar las condiciones de frontera efectivas se obtienen los mismos resultados que al estudiar todo el dominio completo, además de disminuir el tiempo de computo.

El trabajo de Bejan y Kimura [5] es tanto teórico como experimental y tiene por objetivo visualizar la entrada de agua fría en una cavidad poco profunda que se encuentra a una temperatura superior. El modelo experimental mostrado en la Figura 1.7, consiste en un depósito rectangular con dos compartimentos separados por una capa de aire que sirve de aislante. Del lado izquierdo se tiene agua a baja temperatura, mientras que del lado derecho un bloque de aluminio con una ranura conforma la cavidad, esta se encuentra rodeada de agua tibia. La cavidad tiene dimensiones de  $6.4 \text{ mm}$  de alto,  $181 \text{ mm}$  de largo y  $38.4 \text{ mm}$  de ancho. Cuando los fluidos de cada cavidad entran en contacto el fluido de la cavidad derecha penetra en la ranura del bloque de aluminio. Para visualizar la trayectoria del flujo penetrante éste se tiñó de color azul y se tomaron fotografías secuenciadas. El parámetro más relevante en este estudio fue el número de Rayleigh,  $Ra$ . Se encontró que el  $Ra$  debe tener un valor mayor a  $1.2 \times 10^3$  para que el fluido de baja temperatura pueda penetrar de forma lateral en una cavidad cuya longitud es superior a su

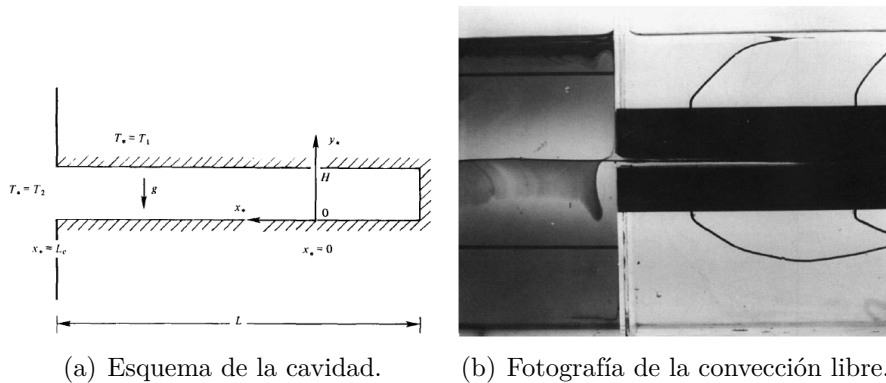


Figura 1.7: Trabajo analítico y experimental de Bejan y Kimura [5].

altura.

### 1.3. Simplificación del Problema

Una computadora en funcionamiento transfiere calor al escritorio sobre el cual descansa, que se encuentra separada del escritorio a cierta distancia, se puede modelar como una placa caliente ( $T_c$ ) sobre una placa fría ( $T_f$ ). Donde ambas placas son paralelas entre sí. El calor se transfiere de la superficie de mayor temperatura a la de menor temperatura, como se ilustra en la Figura 1.8.



Figura 1.8: Modelo simplificado.

En la presente tesis se construyó un arreglo experimental que consiste en una *placa calefactora* ( $T_c$ ) y una *base de acrílico* ( $T_f$ ). La primera hace la función de la computadora y la segunda emula al escritorio. Este arreglo permite modificar la distancia de separación " $d$ " y suministrar energía de forma controlada a la placa calefactora. Además, es posible estudiar tanto el estado transitorio como el estado permanente de la transferencia de calor de la *placa calefactora* hacia la *base de acrílico*. En la Figura 1.9 se muestra un esquema de modelo experimental donde el centro de la *placa calefactora* y la *base de acrílico* son coincidentes.

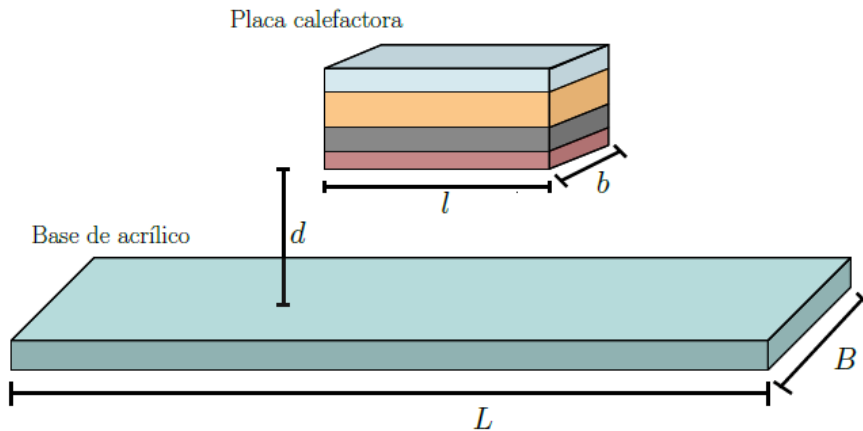


Figura 1.9: Arreglo experimental.

## 1.4. Objetivos específicos de la tesis

A continuación se mencionan los objetivos específicos de la presente tesis. Cada uno de ellos hace referencia a las etapas de este trabajo experimental; diseño y manufactura del modelo experimental, medición, experimentación y análisis de resultados.

1. Diseñar y construir un modelo experimental que emule la transferencia de calor entre una computadora portátil y un escritorio.
2. Implementar el sistema de medición de temperatura para monitorear la temperatura en puntos de interés del modelo experimental.
3. Determinar el efecto de la distancia de separación  $d$  sobre la temperatura y el calor transferido entre ambas superficies.
4. Estudiar el efecto del calor suministrado a la placa calefactora sobre la temperatura del “escritorio”.

# Capítulo 2

## Arreglo Experimental

En esta sección se describe el proceso de diseño y manufactura del arreglo experimental, el cual se compone de tres elementos principales:

- Placa calefactora
- Base de acrílico
- Soportes de separación

La primera es un símil de una computadora portátil, la segunda simula un escritorio donde descansa el equipo de cómputo y los soportes cumplen la función de establecer la distancia de separación entre los dos primeros elementos.

## 2.1. Modelo Experimental

Las dimensiones de la *base de acrílico* son  $95\text{ cm} \times 75\text{ cm}$ . Se seleccionó este tamaño debido al espacio disponible en el laboratorio. Las dimensiones designadas a la *placa calefactora* fueron  $35.7\text{ cm} \times 24.6\text{ cm}$ . Para definir las dimensiones de la *placa calefactora* se investigó la longitud y el ancho de diez laptops existentes en el mercado y para cada equipo se obtuvo su factor de forma definido como “ $f = \text{largo}/\text{ancho}$ ”. Se calculó el promedio de los diez datos, obteniendo un factor de forma promedio “ $f_p = 0.68$ ” y este valor fue empleado para diseñar la *placa calefactora*.

Las piezas que conformaron la placa calefactora se muestran en la Figura 2.1.

Mientras que la *placa calefactora* esta conformada por:

1. Placa de cobre de alta pureza
2. Resistencia eléctrica
3. Placa de triplay
4. Placa de acrílico

Estos cuatro elementos se acoplaron uno sobre otro, cada uno de ellos contó con un diseño específico que se describe en el capítulo 2.1.1 y su manufactura se presenta en el capítulo 2.1.2.

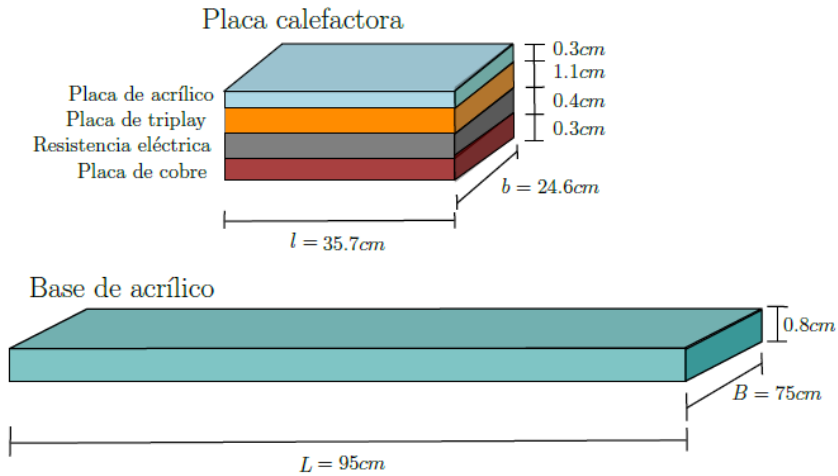
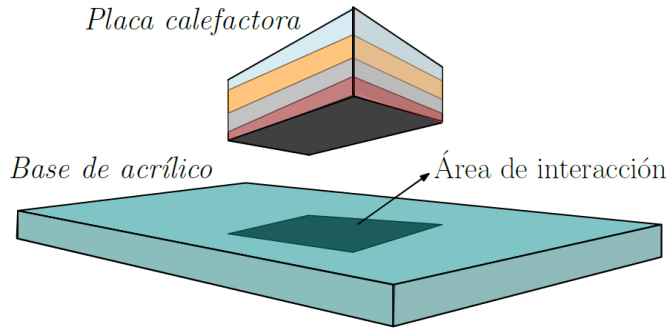


Figura 2.1: Dimensiones del modelo experimental.

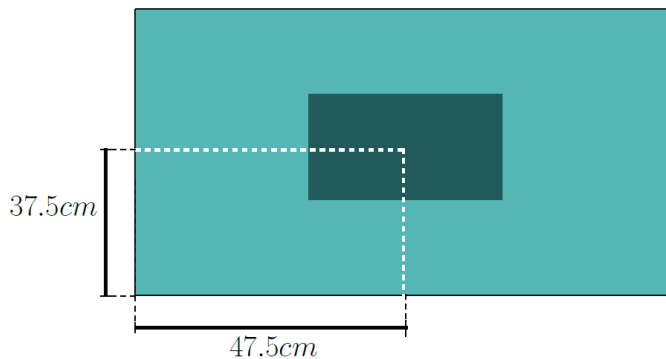
En la Figura 2.2 se observa el arreglo experimental donde la *placa calefactora* se sitúa sobre la *base de acrílico*. La sección de la superficie de la *base de acrílico* que se encuentra debajo de la *placa calefactora* se denominó como “área de interacción” que se resalta en la Figura 2.2(a) en un tono más oscuro y sus dimensiones son las mismas que la *placa calefactora*. En la Figura 2.2(b) se ilustra la ubicación exacta del área de interacción.

Para modificar la distancia de separación  $d$  entre la *base de acrílico* y la *placa calefactora* se colocaron bloques de acrílico en las cuatro esquinas de la *placa calefactora*. Los valores de  $d$  y el diseño de los bloques de acrílico se describen en el apartado 2.1.3.





(a) Área de interacción del arreglo experimental.



(b) Ubicación del área de interacción.

Figura 2.2: Área de interacción entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico*.

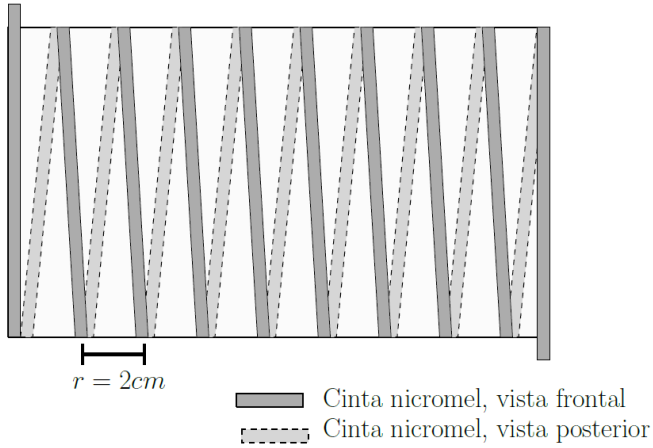
### 2.1.1. Diseño de las piezas

La *base de acrílico* se construyó a partir de una placa de acrílico con acabado cristal de 6 mm de espesor. La selección de este material se debe a que cuenta con una conductividad térmica similar a la de la madera, material con el que se construyen la mayoría de los escritorios.

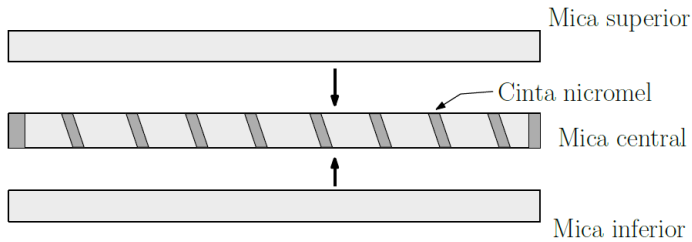
A continuación se describe el proceso de diseño de las piezas que

conformaron la *placa calefactora*.

- *Placa de cobre*: contó con 3 mm espesor. La superficie exterior se cubrió con pintura para alta temperatura color negro mate, con la finalidad de uniformizar su emisividad y que fuera lo más cercana a 1. Se eligió cobre porque es un material con alta conductividad térmica,  $k = 401 \text{ W/mK}$ , lo que minimiza los gradientes de temperatura.
- *Resistencia eléctrica*: su espesor fue de 4 mm. Se diseñó como un arreglo tipo “sandwich” conformado por tres placas de mica para alta temperatura. A una de ellas se enrolló cinta nicromel y las restantes se colocaron como tapas para evitar un corto circuito con la placa de cobre y los sensores de temperatura. Para garantizar una temperatura uniforme con una variación máxima de  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  y minimizar la cantidad de cinta nicromel a utilizar se realizaron cálculos para la distribución de la cinta en la mica, estos se presentan en el Apéndice B. En la Figura 2.3(a) se muestra un esquema del acomodo de la cinta de nicromel alrededor de la mica, mientras que en la Figura 2.3(b) se aprecia una vista de las tres placas que conforman el arreglo tipo “sandwich” de la resistencia eléctrica.
- *Placa de triplay*: su espesor fue 11 mm. Este material fungió como aislante térmico por su baja conductividad. El objetivo de colocar este material en la parte superior de la *placa calefactora* fue para que la mayor cantidad de energía térmica se transfiriera a la cara



(a) Acomodo de la cinta de nicromel. Vista superior.



(b) Placas de la resistencia eléctrica. Vista lateral.

Figura 2.3: Diseño de la resistencia eléctrica.

inferior de la *placa calefactora*, tal como sucede con los equipos de cómputo portátiles.

- *Placa de acrílico*: fue de  $3\text{ mm}$  de espesor. Este material cuenta con una conductividad térmica  $k = 0.2\text{ W/mK}$ . Se utilizó para aportar rigidez estructural a la *placa calefactora*. Su colocación se muestra en la Figura 2.1

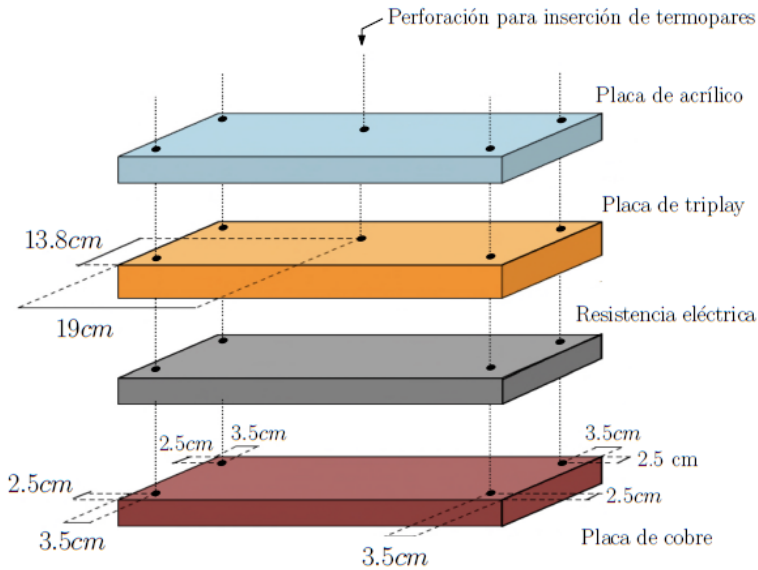


Figura 2.4: Ubicación de los orificios en las placas que conforman la *placa calefactora*

Para que las placas que conformaron el ensamble se mantuvieran en su posición se diseñó un método de acoplamiento que se describe a continuación: Se fijaron cuatro tuercas en la cara superior de la placa de cobre con resina epóxica, a cada tuerca se insertó un espárrago de  $7.5\text{ cm}$  de longitud y  $4\text{ mm}$  de diámetro. A los elementos restantes (resistencia eléctrica, placa de triplay y placa de acrílico) se les maquinaron cuatro orificios, coincidentes con la posición de los espárragos para garantizar que estos pasaran a través de ellos. Adicionalmente, a la placa de triplay y de acrílico se les maquinó un agujero en el centro, a través de este se insertaron dos sensores de temperatura. La posición de las tuercas y los agujeros maquinados se ilustra en la Figura 2.4.

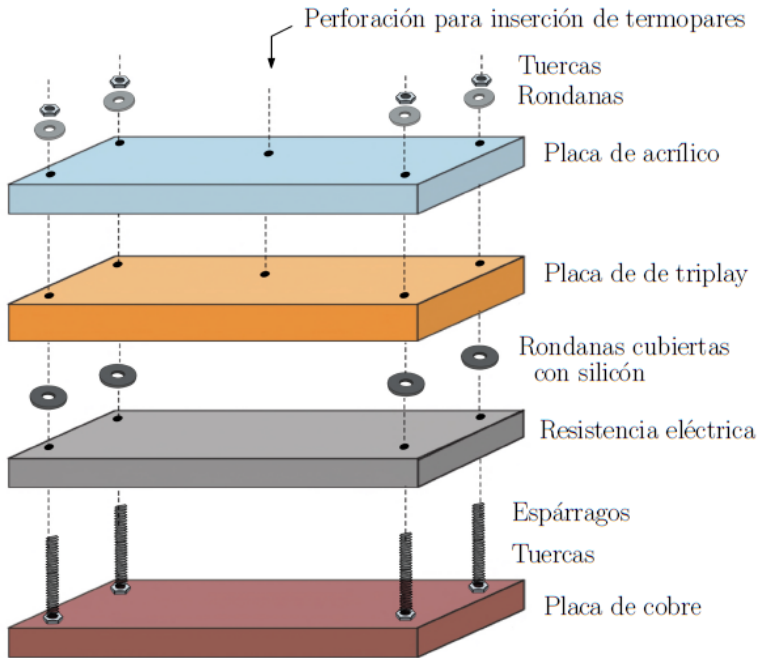


Figura 2.5: Acoplamiento de los elementos de la *placa calefactora*

Para evitar que la placa de triplay sufriera daños debido al calor generado por la resistencia eléctrica, fue necesario colocar rondanas cubiertas de silicón automotriz entre ambas placas (resistencia y triplay) para evitar el contacto directo de ambas superficies. Una vez que las placas se encontraban acopladas se colocaron rondanas y tuercas en el extremo opuesto de los espárragos para aplicar presión y mantener unidos a todos los componentes. El orden de los elementos que conforman la *placa calefactora* se ilustra en la Figura 2.5.

Para modificar la distancia de separación, se maquinaron bloques de acrílico de  $35\text{ mm}$  largo  $\times$   $8\text{ mm}$  de ancho y cuyo espesor es  $d$ . En el

capítulo 2.1.3 se detalla el proceso de manufactura de estas piezas.

### 2.1.2. Manufactura

En esta sección se incluyen los procesos de manufactura de cada uno de los elementos del arreglo experimental:

La *base de acrílico* se cortó con segueta y se eliminó el material excedente con lija.

El primer elemento de la *placa calefactora* que se manufacturó fue la placa de cobre. Esta se cortó con una sierra caladora y posteriormente se lijaron los bordes para eliminar rebabas y retirar el excedente de material. La superficie inferior de la placa de cobre se lijó para mejorar la adherencia de la pintura negro mate. Pruebas realizadas en el laboratorio mostraron que la emisividad de la superficie de la placa de cobre pintada de negro mate es 0.96. En la Figura 2.6 se muestra una termografía de la placa de cobre cuando alcanza 40 °C, se aprecia que los cinco puntos de monitoreo de temperatura colocados en diferentes secciones de la superficie difieren en décimas de °C, cumpliendo con la restricción de una variación de temperatura en la placa de menos de 0.5 °C.

Por otro lado para construir la resistencia eléctrica se emplearon tres micas para alta temperatura. Una de ellas enrollada con cinta nicromel, que genera calor por efecto Joule. La distribución de la cinta se encontró al resolver un sistema de ecuaciones obtenido por el método de balance

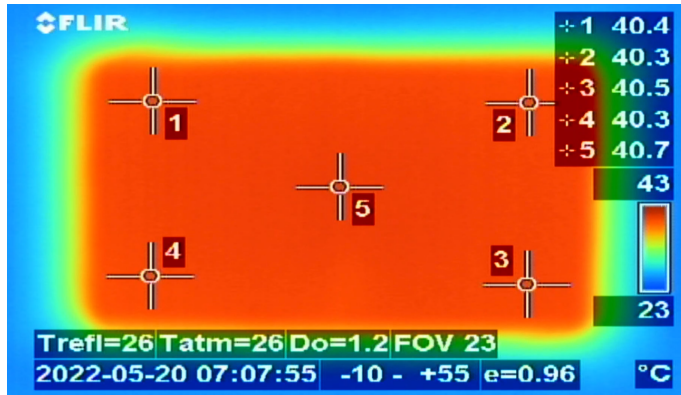


Figura 2.6: Termografía de la placa de cobre con recubrimiento de pintura color negro mate.

de energía, el desarrollo del procedimiento se presenta en el Apéndice B. Se determinó que la distancia entre las cintas de nicromel requería ser de  $2\text{ cm}$ . El resultado de la distribución de la cinta nicromel se muestra en la Figura 2.3. En cada extremo de la cinta se permitió un excedente de  $5\text{ mm}$  para conectar los cables que suministran energía. La cinta de nicromel se adhirió a la mica con cemento de alta temperatura (OMEGABOND 300). En la Figura 2.7 se aprecia la cementación de la cinta de nicromel a la mica central.

Debido a que la resistencia eléctrica alcanzaría una temperatura de entre  $90\text{ °C}$  y  $100\text{ °C}$ , fue imperativo mantener cierta distancia entre la resistencia eléctrica y la placa de triplay para minimizar el riesgo de combustión de esta última. Para ello se colocaron cuatro rondanas planas entre ambas placas, estas se recubrieron con silicón automotriz para evitar un corto circuito al estar en contacto con la resistencia eléctrica.



Figura 2.7: Fotografía de la cementación de la resistencia eléctrica.

Las placas de triplay y de acrílico se cortaron con segueta y se lijaron los bordes para evitar astillas en el material.

Para el acoplamiento de la placa calefactora se fijaron cuatro tuercas con resina en la superficie posterior de la placa de cobre a una distancia de  $3.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$  de cada esquina, como se muestra en la Figura 2.4. En cada tuerca se insertó un espárrago de  $7.5\text{ cm}$  de longitud y  $4\text{ mm}$  de diámetro para evitar el desplazamiento de las placas. En la resistencia eléctrica se maquinaron cuatro agujeros de  $4\text{ mm}$  de diámetro cuya posición coincidió con la de los espárragos. Por otro lado, en las placas de triplay y acrílico se realizaron cinco agujeros de  $4\text{ mm}$  de diámetro, cuatro de ellos coincidentes con los espárragos. Un quinto agujero se maquinó en el centro de estas placas y se destinó a la inserción de dos termopares para medir la temperatura en ambas caras de la placa de triplay, consultar la Figura 2.4. Un esquema del ensamble de todos los elementos que conforman la *placa calefactora* se ilustra en la Figura 2.5.



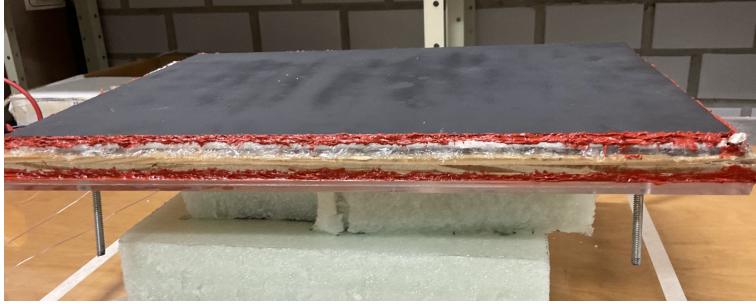


Figura 2.8: Fotografía del marco de silicón de la *placa calefactora*.

Para evitar la presencia de corrientes de aire en los espacios generados por las tuercas y las rondanas se aplicó silicón alrededor de las placas. En la Figura 2.8 se muestra la superficie de la *placa calefactora*.

En la Figura 2.9 se muestran el arreglo experimental ensamblado sobre la *base de acrílico*. Adicionalmente, se observan los cables que conectados a los extremos de las cinta de nicromel, y los cables de termopar.

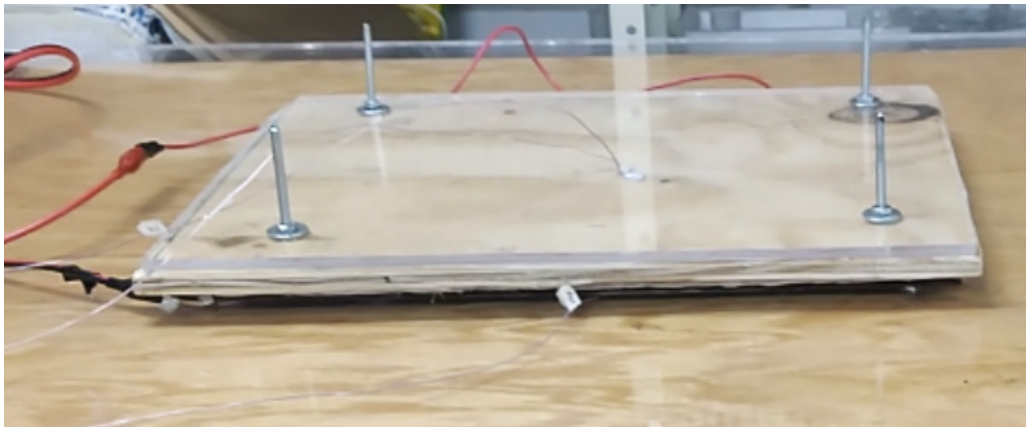


Figura 2.9: Fotografía de la conexión de la *placa calefactora*.

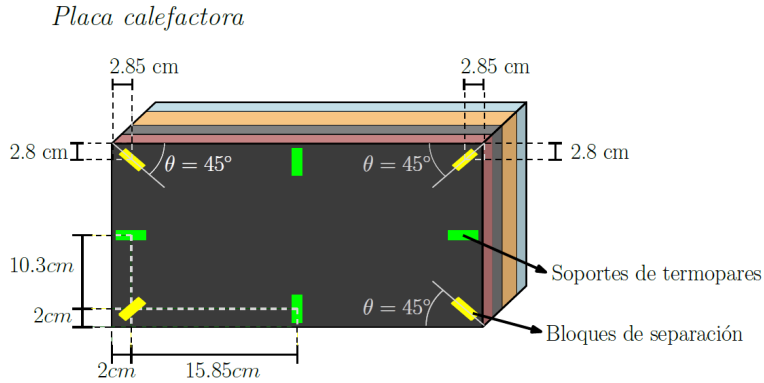


Figura 2.10: Ubicación de los bloques de acrílico y soportes de termopares en la *placa calefactora*.

### 2.1.3. Distancia de separación $d$ del área de interacción

Para modificar la distancia de separación entre la *base de acrílico* y la *placa calefactora* se manufacturaron 4 bloques de acrílico para cada valor de  $d$ , a los que se hará referencia en adelante como *bloques de separación*. Su ubicación se muestra en la Figura 2.10, en la que están resaltadas en color amarillo. Cada bloque tiene 8 mm de ancho, 35 mm de largo, y su espesor corresponde a las 6 distancias de separación estudiadas, que varía de entre 2.86 mm y 11.97 mm.

Estos elementos se modelaron en el software AutoCAD. Para mayor precisión en su manufactura se maquinaron en una cortadora láser. En la Tabla 2.1 se presentan los valores de  $d$ , así como la variación de su espesor obtenida de las piezas manufacturadas.

Tabla 2.1: Distancia de separación  $d$  y espesor de los soportes de termopar  $d_{aire}$ .

$d$ [mm]	$d_{aire}$ [mm]
$2.86 \pm 0.11$	$1.31 \pm 0.07$
$5.65 \pm 0.16$	$2.84 \pm 0.05$
$6.12 \pm 0.028$	$3.26 \pm 0.14$
$8.53 \pm 0.24$	$4.75 \pm 0.04$
$9.60 \pm 0.10$	$5.72 \pm 0.28$
$11.97 \pm 0.37$	$6.13 \pm 0.12$

## 2.2. Sistema de Medición de Temperatura

La temperatura se registró mediante termopares tipo T, modelo TT-T-30-SLE-100. El calibre de los termopares es 30 que equivale a un diámetro de 0.8 mm. Para llevar a cabo los experimentos con el menor error posible en la medición de temperatura es importante calibrar los termopares, este proceso se describe en el Apéndice C

Los termopares se conectaron a un sistema de adquisición de datos de la compañía National Instruments, esta conformado por una tarjeta de acondicionamiento de señal para termopares NI-9212, una tarjeta de conexión TB-9212 y un chasis cDAQ-9174 . El último es conectada a una computadora personal por un cable USB. El diagrama de conexión de estos componentes se ilustra en la Figura 2.11. Mientras que en la Figura 2.12 se muestran los termopares conectados a los ocho puertos del bloque de conexión, que se nombraron según el puerto al que se conectaron, tendiendo como resultado:  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ , y  $T_7$ .

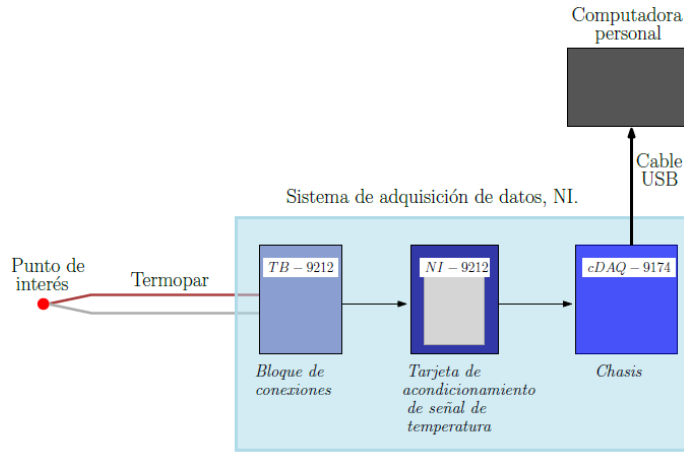


Figura 2.11: Esquema del sistema de adquisición de datos.

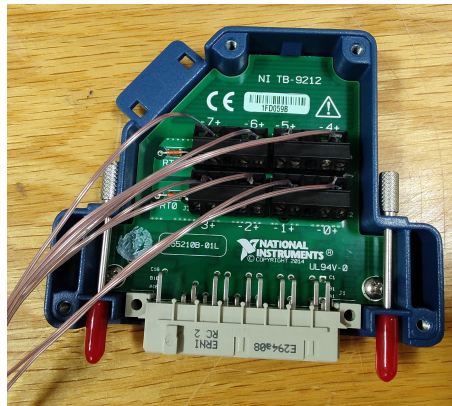


Figura 2.12: Fotografía de los termopares conectados a la tarjeta TB-9212.

Para monitorear la temperatura de la capa de aire entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico* se utilizaron los termopares  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_6$  y  $T_7$ , uno en cada cara del arreglo. Estos se colocaron a la mitad de la distancia de separación, es decir  $d/2$ . Para alcanzar esta altura se consideró el diámetro de los sensores de temperatura, por lo que estos se

colocaron a una distancia denominada  $d_{aire} = d/2 - 0.4 \text{ mm}$ .

Para sostener estos termopares se manufacturaron cuatro bloques de acrílico denominados “soportes para termopares”. Estos se diseñaron en AutoCAD y se maquinaron en una cortadora láser. Cada soporte tiene  $8 \text{ mm}$  de ancho,  $35 \text{ mm}$  de largo y el espesor de igual a  $d_{aire}$ . En la Tabla 2.1. se presentan los espesores de los bloques una vez manufacturados, así como su variación. En la Figura 2.13 se muestra la ubicación de los cuatro soportes resaltados en color verde, mientras que la posición de los termopares se destaca en color rojo.

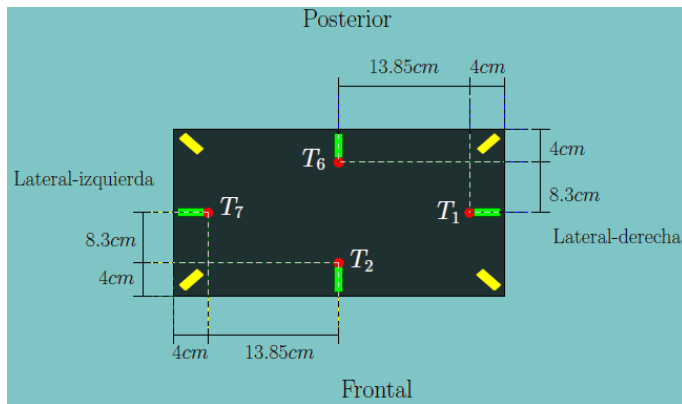


Figura 2.13: Esquema de los soportes de termopar, y la posición de los sensores de temperatura  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_6$  y  $T_7$ .

Para calcular el calor transferido entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico* fue necesario medir su temperatura. Para ello se utilizaron se utilizaron los termopares  $T_5$  y  $T_0$ . El primero se colocó en contacto directo con la placa de cobre. Mientras que el termopar  $T_0$  se ubicó sobre la *base de acrílico*, también en contacto directo. Ambos termopares

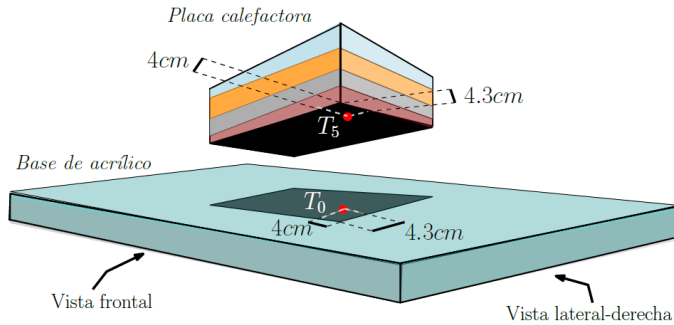


Figura 2.14: Posición de los puntos de lectura de los termopares  $T_0$  y  $T_5$ .

son coincidentes en su posición y se mantuvieron fijos con cemento para alta temperatura (OMEGABOND 300). En la Figura 2.14 se ilustra su ubicación en color rojo.

Para calcular la cantidad de calor que se transfiere a la parte superior de la *placa calefactora* se situaron los termopares  $T_3$  y  $T_4$  en ambas caras de la placa de triplay. Estos se insertaron por el orificio creado en la parte central de la placa de acrílico y la placa de triplay de la *placa calefactora*. Su localización se resalta con círculos de color azul en la Figura 2.15

En la Figura 2.15 se puede apreciar la ubicación de todos los termopares utilizados. Con fines demostrativos las placas de acrílico y triplay de la *placa calefactora* se han separado para mostrar la posición de los termopares  $T_3$  y  $T_4$ .

Adicionalmente, un termopar independiente fue utilizado para monitorear la temperatura ambiente del laboratorio. Este se colocó a un costado de la *base de acrílico*.

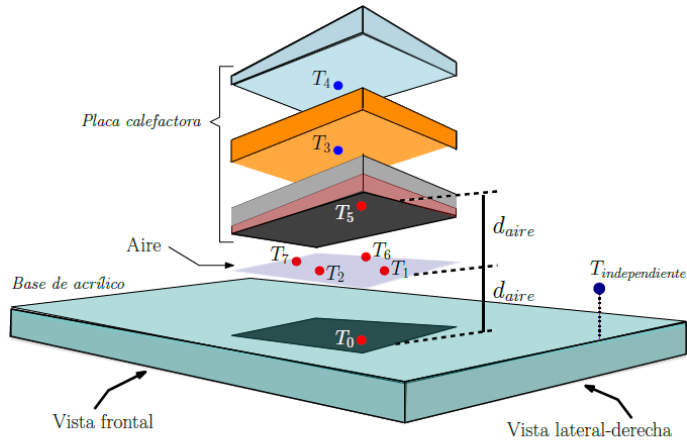
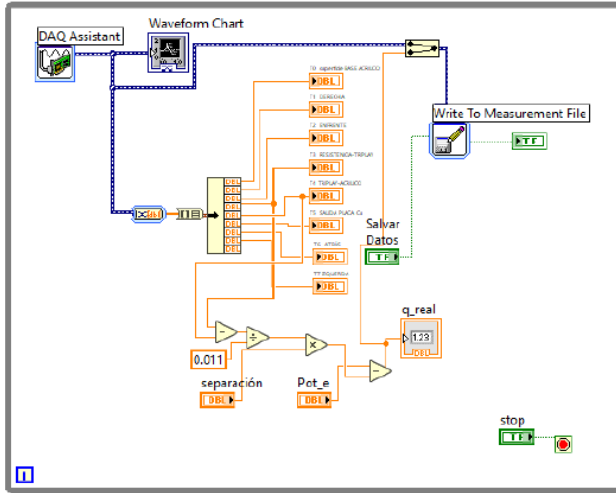


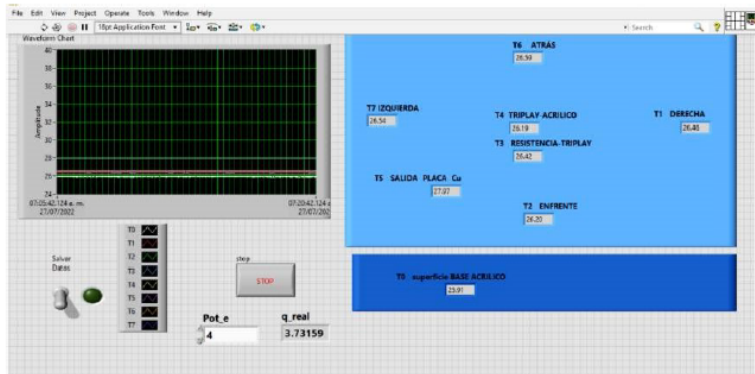
Figura 2.15: Posición de los termopares en el arreglo experimental.

Se creó un programa en el software LabVIEW. Este permite almacenar los datos de cada experimento en un archivo .TXT, con una velocidad de un dato por segundo para cada termopar. El bloque de conexiones del programa se muestra en la Figura 2.16(a), mientras que en la Figura 2.16(b) se ilustra el panel frontal del mismo.

Por otro lado, en la Figura 2.17 se presenta una fotografía del arreglo experimental instalado en el área de experimentación, así como los cables de termopar y de suministro de energía eléctrica.



(a) Diagrama de bloques de programa.



(b) Panel frontal del programa.

Figura 2.16: Programa para registro y almacenamiento de temperatura en el arreglo experimental.

## 2.3. Pruebas

Los experimentos se llevaron a cabo en el laboratorio de investigación en Termofluidos de la Facultad de Ingeniería. Este se encuentra aislado



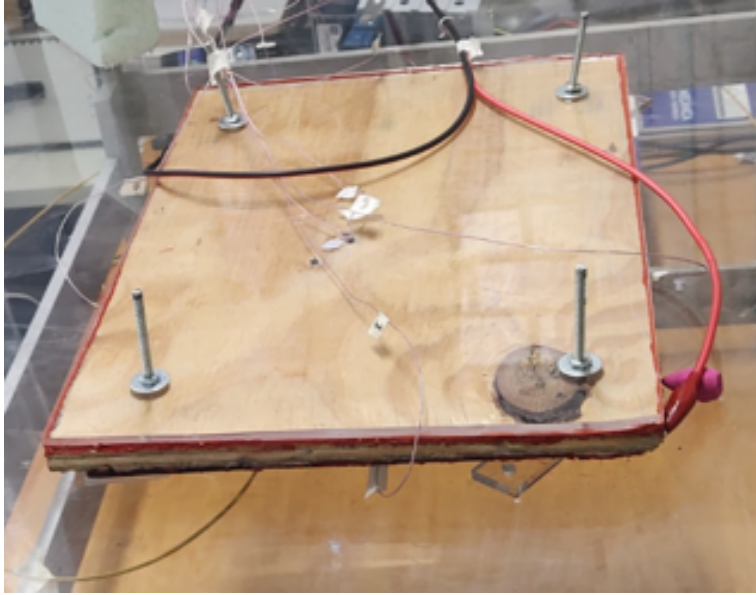


Figura 2.17: Fotografía del arreglo experimental finalizado.

del exterior para minimizar fluctuaciones de la temperatura ambiente, así como corrientes de aire. Para reducir posibles perturbaciones en los experimentos se colocó una película aislante que dividió el laboratorio en dos secciones, como se muestran en la Figura 2.18. El arreglo experimental, los termopares y el sistema de adquisición de datos se ubicaron en una primera sección. En la segunda sección se colocaron la computadora portátil y la fuente de energía. Para evitar cualquier fuente de radiación térmica externa, los experimentos se realizaron con luces apagadas y sin personas presentes. Cada experimento tuvo una duración de 6 horas, comenzando a las 23:00 h. El encendido y apagado del equipo se llevó a cabo vía remota.

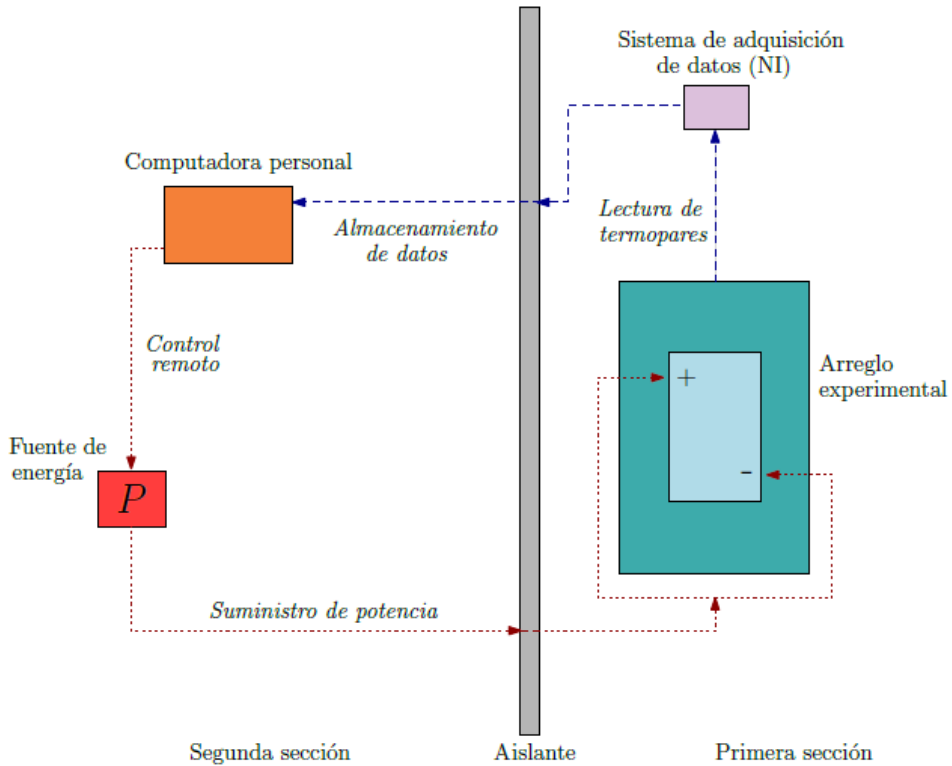


Figura 2.18: Esquema del espacio experimental dentro del laboratorio.

## 2.4. Procedimiento experimental

Previo a realizar cada experimento se colocaron los bloques de separación entre la *base de acrílico* y la *placa calefactora*, así como los soportes de termopares correspondientes para cada distancia de separación  $d$ . Se prepararon la computadora, la fuente de energía y el equipo de adquisición de datos para ser activados vía remota. Para cada valor de  $d$  estudiado se llevaron a cabo experimentos para tres diferentes potencias:  $15.6\text{ W}$ ,  $11.2\text{ W}$  y  $6.8\text{ W}$ . En la Figura 2.19 se muestra una fotografía

de la primera sección del área de experimentación.

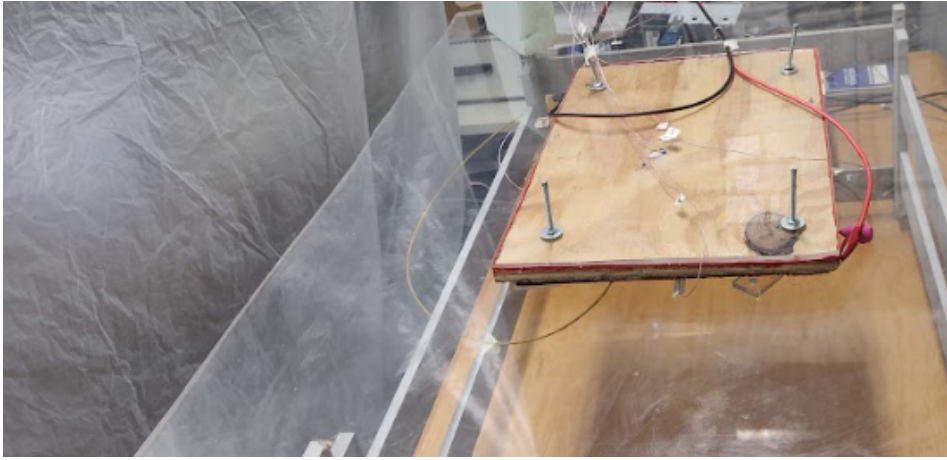


Figura 2.19: Fotografía de la primera sección del espacio experimental.

### 2.4.1. Ensayo experimental

Se realizaron ensayos para registrar la temperatura máxima alcanzada por dos computadoras portátiles, a las que se realizaron pruebas de rendimiento que forzan los dispositivos, incrementando su temperatura. Se instalaron 4 termopares en los siguientes puntos: (a) salida ventilador en la superficie inferior de la computadora, (b) sobre el teclado, (c) centro de la computadora en la cara inferior. El cuarto termopar se empleó para medir la temperatura ambiente. Adicionalmente, se utilizó un programa que monitorea la temperatura del microprocesador. Esta información sirvió de referencia para planificar y seleccionar la temperatura de la *placa calefactora*. El resultado de estas pruebas se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Temperatura de un equipo portátil durante las pruebas.

Área de medición	Temperatura °C
Salida del ventilador	36.15
Teclado	31.0
Centro de la computadora	32.95
Temperatura ambiente	24.5
Procesador - software core Temp	54

Por otro lado, se realizaron ensayos en el modelo experimental para conocer la energía requerida para obtener temperaturas en el rango presentado en la Tabla 2.2. De este modo se determinó que la potencia eléctrica  $P_e$  debe ser de  $6.8 W$ ,  $11.2 W$  y  $15.6 W$ , valores para los que se alcanzan temperaturas de entre  $30\text{ °C}$  y  $40\text{ °C}$ , dependiendo de la distancia de separación  $d$  y la temperatura ambiente.

# Capítulo 3

## Resultados

En la Figura 3.1 se presentan los resultados experimentales para una separación  $d = 11.97 \text{ mm}$  y una potencia eléctrica  $P_e = 15.6 \text{ W}$ . En esta se puede observar que todos los sensores de temperatura parten de la misma temperatura inicial,  $21.4 \text{ }^\circ\text{C}$ . La ubicación de los termopares en el arreglo experimental se presentó en la Figura 2.15. En las gráficas que se muestran en esta sección, la temperatura del aire entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico* se representa por líneas discontinuas ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_6$  y  $T_7$ ). Mientras que se utiliza una línea continua en color rojo para los registros de temperatura de la placa de cobre ( $T_5$ ), morado para la *base de acrílico* ( $T_0$ ), azul para la temperatura entre la resistencia eléctrica y la placa de triplay ( $T_3$ ) y color amarillo para los registros de temperatura entre la placa de triplay y la placa de acrílico ( $T_4$ ).

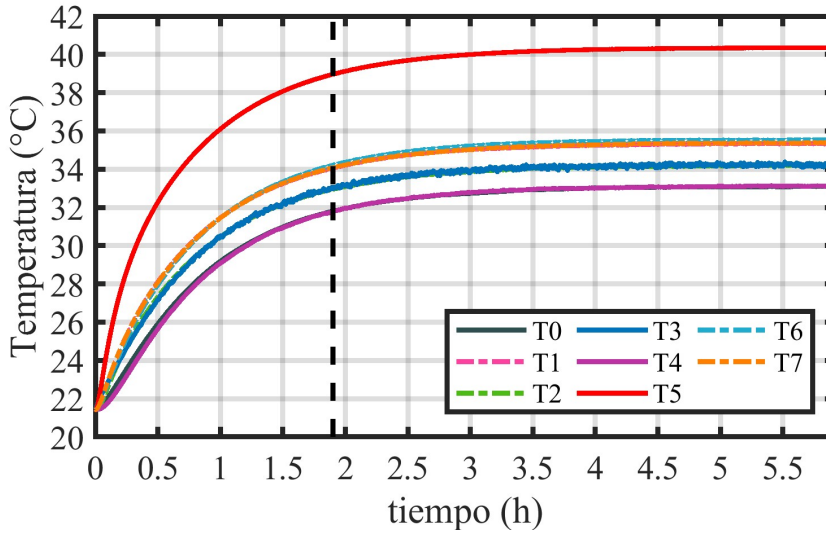


Figura 3.1: Comportamiento de la temperatura,  $d = 11.97 \text{ mm}$  y  $P_e = 15.6 \text{ W}$ .

Las curvas de la Figura 3.1 muestran que la temperatura máxima en el arreglo experimental se alcanza en  $T_5 = 40.3 \text{ }^\circ\text{C}$ , que corresponde a la placa de cobre; mientras que la temperatura de la *base de acrílico* es  $T_0 = 33.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , ambas en el tiempo estable ( $t_s$ ). Estos parámetros son relevantes porque serán utilizados para el cálculo del calor transferido entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico*.

En cuanto al tiempo de estabilización, representado por una línea discontinua vertical de color negro, fue de  $1.9 \text{ h}$  aproximadamente. Este se determinó a partir del criterio que consiste en encontrar el tiempo al cual el incremento de temperatura del termopar  $T_5$  sea menor a  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ , para dos lecturas con un intervalo de tiempo de  $30 \text{ s}$  entre ellas. El código desarrollado en Matlab se presenta en el Apéndice D.

Las variables que se consideraron en este estudio y que se modificaron para los experimentos fueron:

1. Distancia de separación  $d$  entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico*.
2. Potencia eléctrica  $P_e$  suministrada a la *placa calefactora*.

Por lo que, en este trabajo se presenta el efecto de estas dos variables sobre el calor que fluye por conducción hacia la parte superior de la *placa calefactora* (entre los termopares  $T_3$  y  $T_4$ ) denominado ( $q_{aislante}$ ) y el calor que se transfiere a través del aire entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico* ( $q_{_A}$ ). El primero es equivalente al calor que se transfiere en una laptop hacia el teclado o la superficie que está en contacto con el usuario; el segundo es el calor que se requiere disipar para que la computadora no exceda la temperatura de trabajo. En la Figura 3.2 se muestra un esquema del calor transferido a través del arreglo y los termopares involucrados para su cálculo.

Para la configuración utilizada en los experimentos, donde el fluido es calentado por arriba y enfriado por debajo y la relación de forma  $l/d$  del espacio de aire, que varía de 29.82 a 124.82, la teoría establece que la transferencia de calor es principalmente por conducción. Por lo que el balance de energía queda de la siguiente forma:

$$P_e = q_{aislante} + q_{con\_A} + q_{rad\_A} + q_{perdido} \quad (3.1)$$

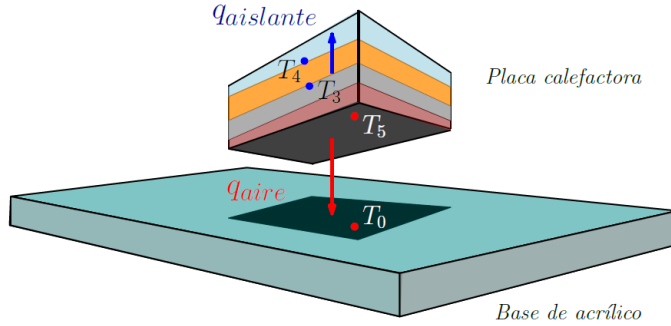


Figura 3.2: Calor transferido en el arreglo experimental,  $q_{aislante}$  y  $q_{aire}$ .

donde  $P_e$  es la energía eléctrica suministrada por la fuente de alimentación,  $q_{con\_A}$  el calor transferido por conducción en la capa de aire,  $q_{rad\_A}$  calor transferido por radiación por la placa caliente y  $q_{perdido}$  es el calor transferido por los bordes de la *placa calefactora*. El último se considera despreciable, debido a que el espesor de la resistencia eléctrica es muy pequeño, por lo cual el calor se transfiere principalmente en la dirección normal al área de transferencia de calor.

Con los datos de temperatura de la Figura 3.1 se realizó un ejercicio para el cálculo de cada uno de los términos considerando que el calor se transfiere únicamente por conducción, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} q_{aislante} &= -k_{triplay} A \frac{T_4 - T_3}{e_{aislante}} \\ &= -(0.13)(8.78 \times 10^{-2}) \frac{33.12 - 34.24}{0.011} = 1.16 \text{ W} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 q_{cond\_A} &= -k_{aire} A \frac{T_0 - T_5}{d} \\
 &= -(0.024)(8.78 \times 10^{-2}) \frac{33.10 - 40.35}{11.97 \times 10^{-3}} = 1.28 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{rad\_A} &= \sigma A \epsilon F (T_5^4 - T_0^4) \\
 &= 5.67 \times 10^{-8} (8.78 \times 10^{-2}) (0.96) (40.35^4 - 33.10^4) = 6.93 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Para la configuración estudiada, dos placas planas paralelas separadas por una distancia muy pequeña,  $F = 1$  [4].

Para este caso se suministraron a 15.6 W. Sustituyendo los términos en la ecuación 3.2. Se tiene

$$15.6 = 1.16 + 1.28 + 6.93 \times 10^{-3}$$

$$15.6 \neq 2.44$$

Esta discrepancia indica que hace falta un término de transferencia de calor que haga entrar en balance a la ecuación. Recordando el trabajo de Bejan [5], en el que se tienen que cumplir ciertas condiciones para que se active el movimiento del fluido en una cavidad poco profunda con uno de sus extremos abierto al ambiente. Por otro lado, en la configuración estudiada en el presente trabajo todas las paredes laterales de la capa de aire se encuentran abiertos al ambiente. Por lo anterior, se presume que se generan corrientes convectivas que aportan a la disipación de calor.

Dado que el objetivo del presente trabajo es cuantificar el calor to-

tal transferido por la superficie inferior de una computadora portatil, se considera al balance de energía como:

$$q_{ent} = q_{aislante} + q_{aire} \quad (3.2)$$

donde  $q_{aire}$  es el parámetro en los resultados de las siguientes secciones, y que corresponde al calor total transferido por el aire entre la *placa calefactora* y *base de acrílico*

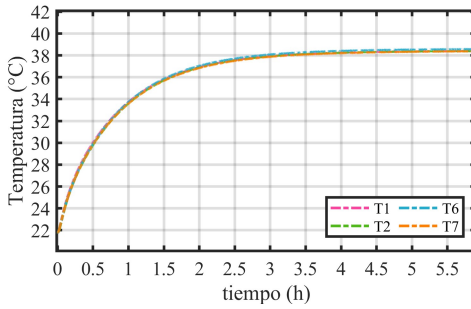
### 3.1. Efecto de modificar la distancia de separación $d$

En esta sección se muestra el efecto de modificar  $d$  sobre la temperatura del aire entre ambas placas y el calor transferido, manteniendo constante la potencia suministrada.

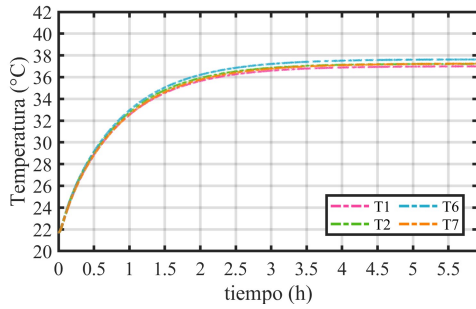
**(a) Efecto sobre la temperatura del aire entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico*.**

En la Figura 3.3 se muestra el comportamiento de la temperatura respecto del tiempo para los termopares que miden la temperatura del aire entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico*, para  $P_e = 15.6$   $W$  y variando la distancia de separación  $d$ . Se aprecia que conforme se incrementa  $d$ , la temperatura máxima ( $T_5$ ) disminuye gradualmente pasando de  $38.5$  °C para  $d = 2.86$   $mm$  (Figura 3.3(a)) hasta  $35.3$  °C para

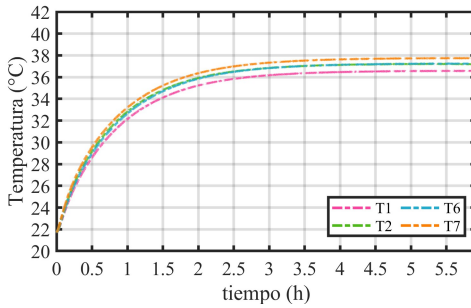
$d = 11.97 \text{ mm}$  (Figura 3.3(f)).



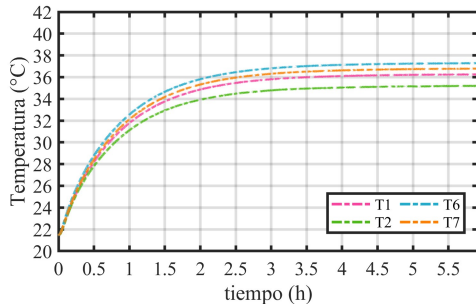
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



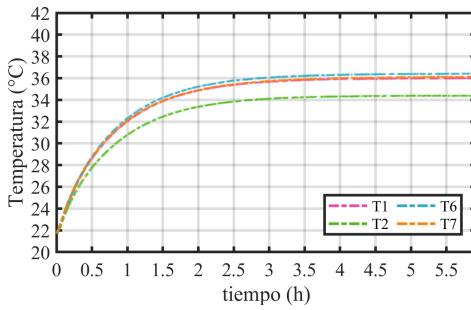
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



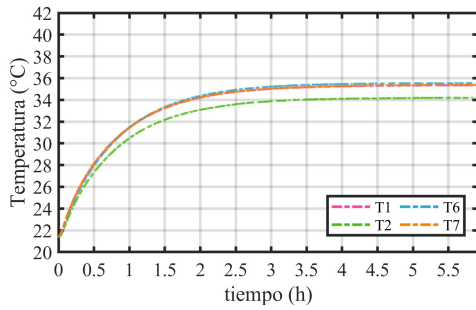
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .



(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .



(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

Figura 3.3: Temperatura del aire para diferentes valores de  $d$ , con  $P_e = 15.6 \text{ W}$

En estas se puede observar que para todos los casos, las lecturas del termopar  $T_6$  son las mayores, mientras que para la temperatura mínima

no se presenta una tendencia clara de que termopar registró este valor ya que para  $d = 2.86 \text{ mm}$  la temperatura fue  $T_3 = 30.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , para  $d = 5.65 \text{ mm}$  fue  $T_4 = 29.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , en  $d = 6.12 \text{ mm}$  fue  $T_4 = 30.0^\circ\text{C}$ , mientras que para  $d = 8.53 \text{ mm}$  se registraron  $T_3$  y  $T_4$  con  $30.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , para la distancia  $d = 9.60 \text{ mm}$  fue  $T_4 = 30.4^\circ\text{C}$ . Las gráficas correspondientes para las potencias  $11.2 \text{ W}$  y  $15.6 \text{ W}$  se pueden consultar en la sección A.1, las cuales presentan una tendencia similar.

Adicionalmente, se aprecia que a medida que se incrementa  $d$ , las lecturas de los termopares se dispersan. Se cree que esto se debe a que el espesor de los bloques de separación no es uniforme debido al proceso de manufactura, como se puede observar en la Tabla 2.1, lo que lleva a que las placas no sean perfectamente paralelas entre sí, como se muestra en el esquema de la Figura 3.4. Lo anterior tiene como consecuencia que la *placa calefactora* presente un ángulo de inclinación que generaría un flujo de aire entre ambas placas.

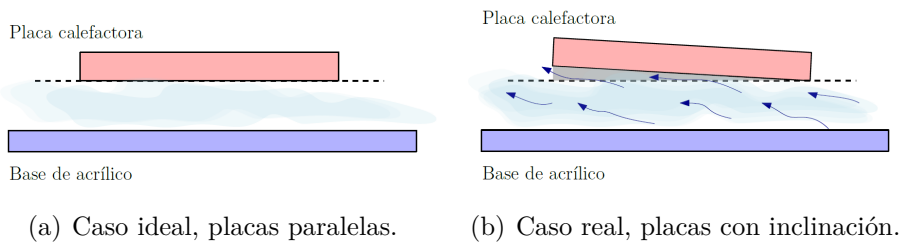


Figura 3.4: Posición entre *placa calefactora* y *placa de acrílico*.

En cuanto al tiempo de estabilización  $t_s$ , en la Tabla 3.1 se presentan los resultados de aplicar el criterio de estabilización para las tres potencias

Tabla 3.1: Tiempo de estabilización  $t_s$ , para todos los valores de  $d$ .

Tiempo de estabilización		
$P_e$ [W]	$d$ [mm]	$t_s$ [h]
6.8	2.86	1.85
6.8	5.65	1.79
6.8	6.12	1.94
6.8	8.53	2.0
6.8	9.60	1.70
6.8	11.97	1.70
11.2	2.86	1.92
11.2	5.65	2.25
11.2	6.12	2.38
11.2	8.53	2.25
11.2	9.60	2.25
11.2	11.97	1.90
15.6	2.86	2.65
15.6	5.65	2.31
15.6	6.12	2.47
15.6	8.53	2.50
15.6	9.60	2.39
15.6	11.97	1.90

y todos los valores de  $d$ . Los valores numéricos de esta tabla se muestran de forma gráfica en la Figura 3.5 donde, en general, el menor tiempo de  $t_s$  se presenta para  $d = 2.86$  mm y  $d = 11.97$  mm. Mientras que el valor máximo se presenta para  $d = 6.12$  mm y  $d = 8.53$  mm.

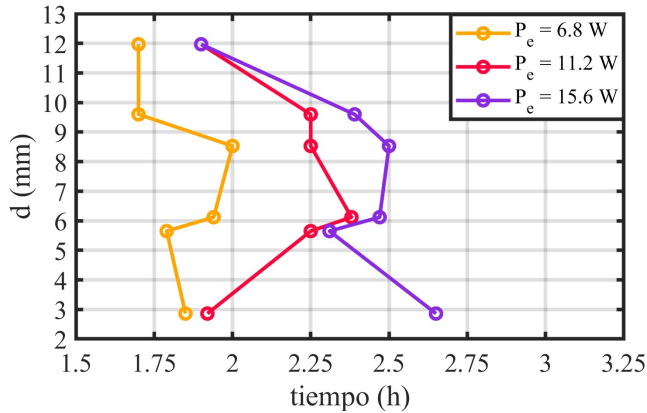
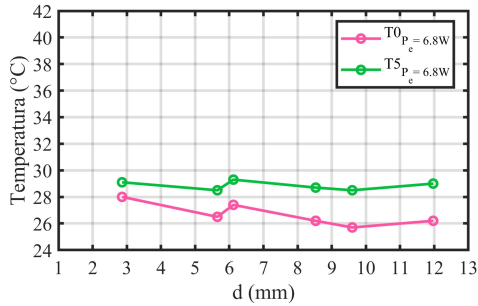


Figura 3.5: Comportamiento del tiempo de estabilización,  $t_s$ .

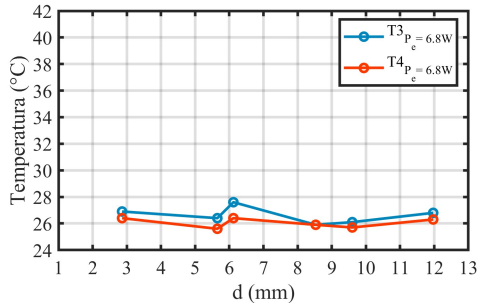
### (b) Efecto sobre el calor transferido entre placas.

Un parámetro destacado en esta sección es el cálculo del calor transferido en el arreglo experimental,  $q_{aislante}$  y  $q_{aire}$ . Estos valores se calcularon utilizando los datos de  $T_5$  y  $T_0$  en el tiempo estable, cuyos valores se muestran en la columna izquierda de la Figura 3.6. En esta imagen es apreciable que a medida que  $d$  incrementa su valor, ambas temperaturas divergen para las tres potencias. Lo anterior se debe a que la temperatura de  $T_0$  disminuye considerablemente en comparación de  $T_5$ , que sufre cambios pequeños. Por ejemplo, en la Figura 3.6(e) se muestra que, para  $d = 2.86$  mm,  $T_5 = 38.9$  °C mientras que  $T_0 = 36.4$  °C presentándose una diferencia de temperatura  $(T_5 - T_0) = 2.5$  °C. Por otro lado, para  $d = 11.97$  mm,  $T_5 = 38.9$  °C y  $T_0 = 31.8$  °C por lo que la diferencia es de 7.1 °C. Y como se puede apreciar, la temperatura que se ha modificado es la de la *base de acrílico*. °C.

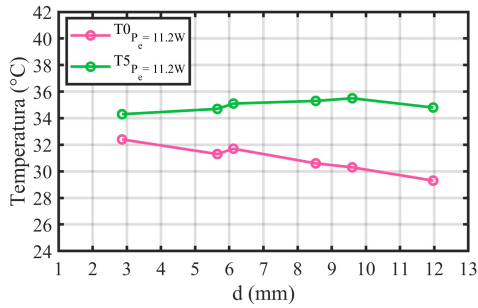
En cuanto a la temperatura de la placa de acrílico, en la Figura 3.6,



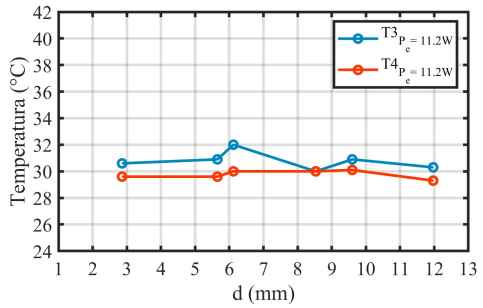
(a)  $T_0$  y  $T_5$ ,  $P_e = 6.8 W$ .



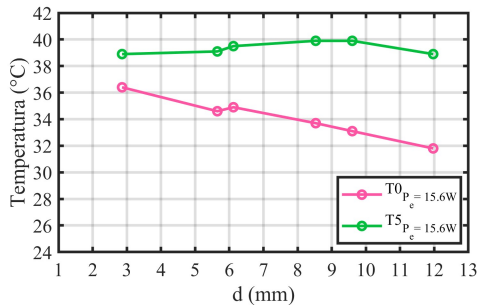
(b)  $T_3$  y  $T_4$ ,  $P_e = 6.8 W$ .



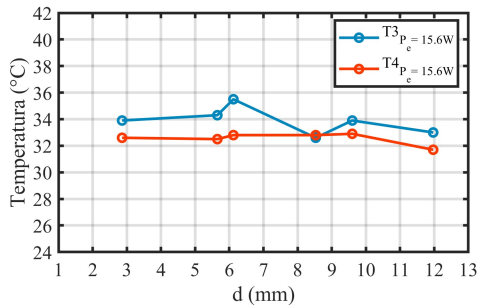
(c)  $T_0$  y  $T_5$ ,  $P_e = 11.2 W$ .



(d)  $T_3$  y  $T_4$ ,  $P_e = 11.2 W$ .



(e)  $T_0$  y  $T_5$ ,  $P_e = 15.6 W$ .



(f)  $T_3$  y  $T_4$ ,  $P_e = 15.6 W$ .

Figura 3.6: Comportamiento de la temperatura para  $T_0 - T_5$ , y  $T_3 - T_4$ , al modificar  $d$ ,  $t_s$ .

la columna de lado derecho corresponde a los termopares  $T_3$  y  $T_4$  en  $t_s$ , se observa que los valores de ambos termopares presentan una diferencia muy pequeña entre ellas. Tomando como referencia la Figura 3.6(f), para

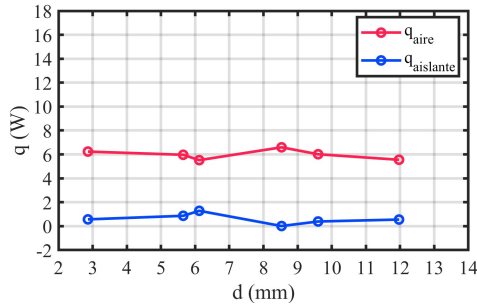
$d = 2.86 \text{ mm}$ ,  $T_3 = 33.9 \text{ °C}$  y  $T_4 = 32.6 \text{ °C}$ , por lo que la diferencia de temperatura  $(T_3 - T_4) = 1.3 \text{ °C}$ . Mientras que para  $d = 11.97 \text{ mm}$ ,  $T_3 = 33.0 \text{ °C}$  y  $T_4 = 31.7 \text{ °C}$  dando como resultado una diferencia de  $1.3 \text{ °C}$ .

En los párrafos anteriores se estudio el comportamiento de las temperaturas en los puntos de interés, por lo que se procede a calcular  $q_{aislante}$  y  $q_{aire}$ , los resultados se presentan en la Figura 3.7. Como se puede apreciar, el comportamiento es similar para las tres potencias ya que gran parte del calor generado por la resistencia eléctrica se disipa a través del aire, mientras que  $q_{aislante}$  tiene valores menores a  $2 \text{ W}$ , por lo que en promedio  $q_{aislante}$  se encuentra por debajo del 20 % de la potencia suministrada. Adicionalmente, se puede observar que para  $d = 8.53 \text{ mm}$  se transfiere la mayor cantidad de calor  $q_{aire}$  para las distancias de separación estudiadas.

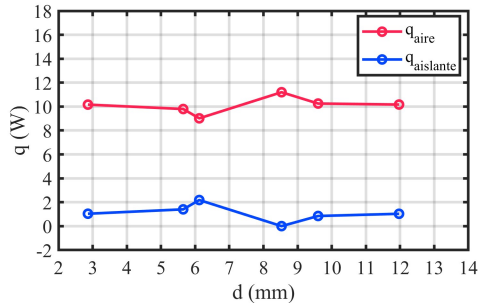
Por otro lado, en la Figura 3.8 se muestran las gráficas correspondientes al calor,  $q_{aire}$  y  $q_{aislante}$ , en función del tiempo para  $P_e = 15.6 \text{ W}$  y variando  $d$ , así mismo se marca el tiempo de estabilización para cada experimento.

Esta información es relevante porque indica que modificar  $d$  afecta mínimamente el tiempo de estabilización. Sin embargo, variar este parámetro tiene impacto en la temperatura de las placas y la cantidad de calor que se puede transferir a través de la capa de aire que existe entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico*.

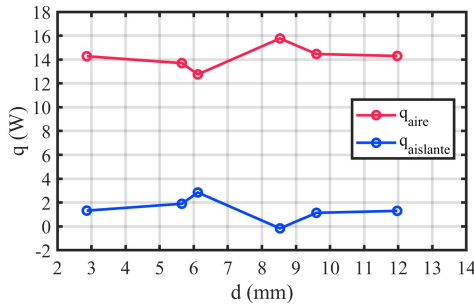




(a)  $P_e = 6.8 \text{ W}$ .



(b)  $P_e = 11.2 \text{ W}$ .



(c)  $P_e = 15.6 \text{ W}$ .

Figura 3.7: Comportamiento transferido  $q_{\text{aire}}$  y  $q_{\text{aislante}}$ , en función de  $d$ .

### 3.2. Efecto de modificar la potencia suministrada $P_e$

En esta sección se muestran los resultados de modificar  $P_e$  y mantener constante  $d$  sobre la temperatura del aire ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_6$  y  $T_7$ ) y sobre el calor disipado,  $q_{\text{aislante}}$  y  $q_{\text{aire}}$ .

(a) Efecto sobre la temperatura del aire entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico*.

La Figura 3.9 muestra las gráficas correspondientes a la temperatura

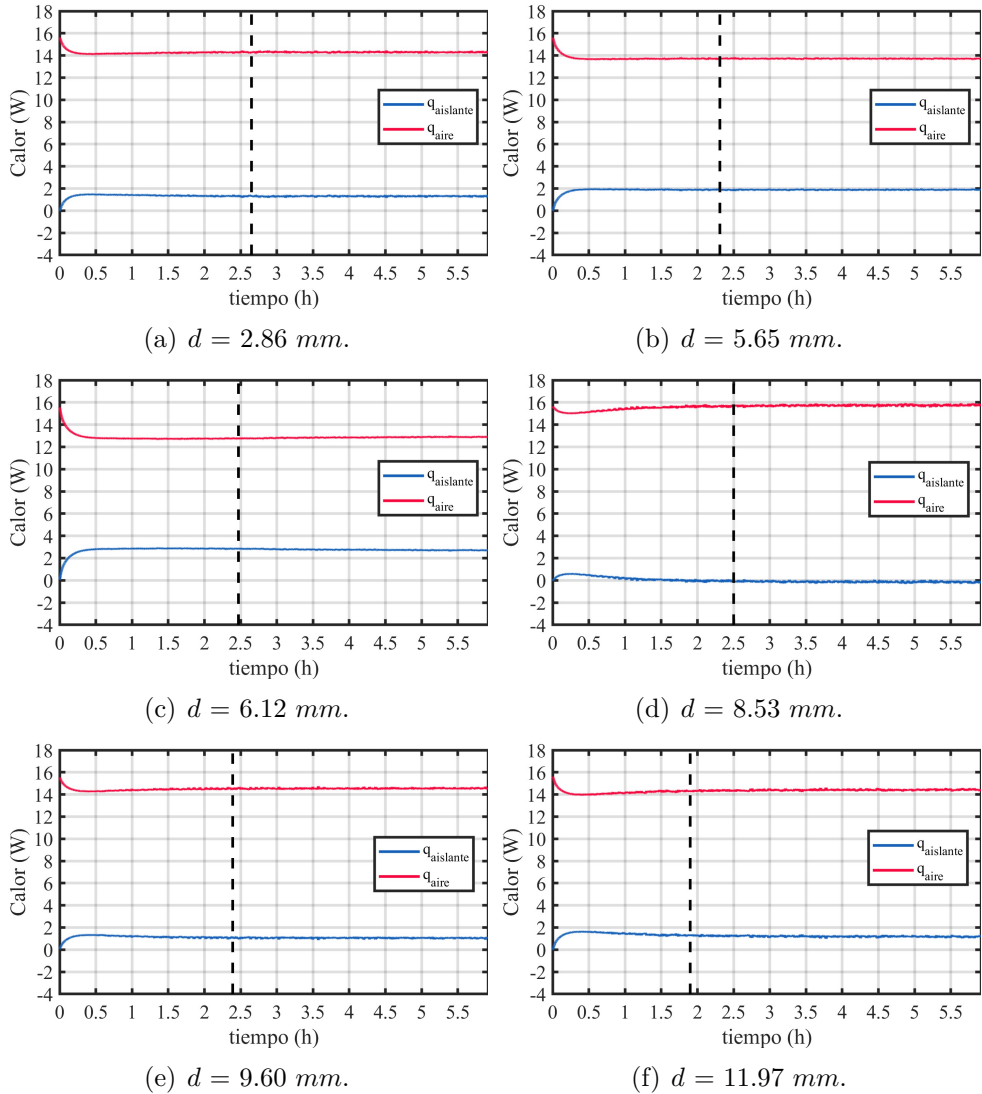
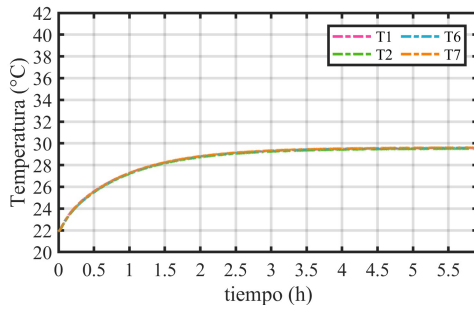


Figura 3.8: Calor transferido  $q_{aire}$  y  $q_{aislante}$  para  $P_e = 15.6 \text{ W}$  al modificar  $d$ .

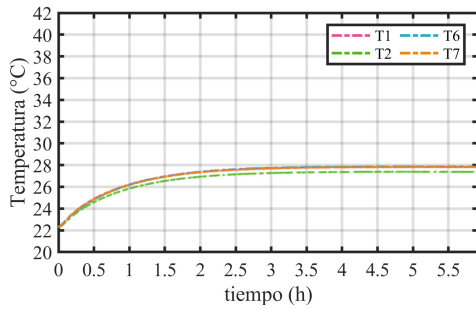
del aire con  $P_e$  de  $15.6 \text{ W}$ , la columna de lado derecho muestra las curvas para  $d = 2.86 \text{ mm}$  y de lado izquierdo para  $d = 11.97 \text{ mm}$ . Como se puede apreciar el efecto de incrementar  $P_e$  recae en el valor de la tempe-

ratura alcanzada por la placa de cobre y la *base de acrílico*, lo cuál es de esperarse ya que al suministrar más energía se incrementa la temperatura. Por otro lado, no se presenta una variación en el comportamiento de las gráficas debido al incremento de  $P_e$ . El único valor que difiere en la columna derecha es  $T_2$ , sin embargo, se presume que es consecuencia de la inclinación entre la *placa calefactora* y la *base de acrílico* debido a defectos en la manufactura de los bloques de separación, como se señaló previamente. Los resultados para las otros valores de  $d$  se pueden consultar en el Apéndice A, sección A.3

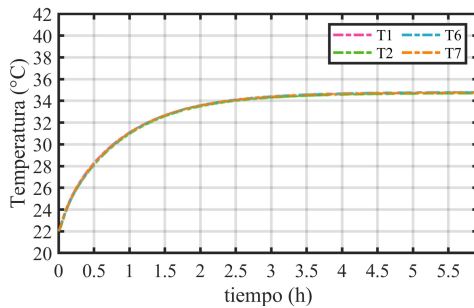
En cuanto a  $t_s$ , este sí se ve afectado al modificar la potencia eléctrica suministrada y mantener  $d$  constante. Los valores numéricos se presentan en la Tabla 3.2 y de forma gráfica en la Figura 3.10. Se observa que, en general,  $t_s$  es mayor al incrementar  $P_e$ , sin embargo este incremento es como máximo de 18 minutos. El mayor  $t_s$  se presenta para  $d = 8.53 \text{ mm}$ , por su parte los valores más pequeños son para  $d = 2.86 \text{ mm}$  y  $d = 11.97 \text{ mm}$ . De esta información se puede concluir que a mayor potencia suministrada también incrementa el valor de  $t_s$ .



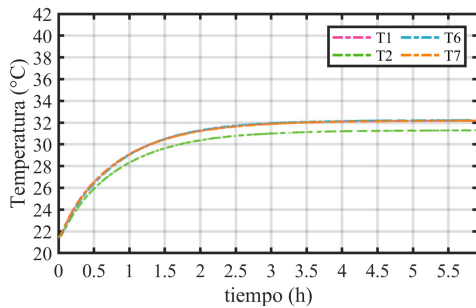
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ ,  $P_e = 6.8 \text{ W}$ .



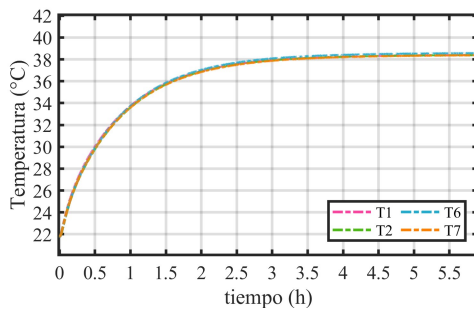
(b)  $d = 11.97 \text{ mm}$ ,  $P_e = 6.8 \text{ W}$ .



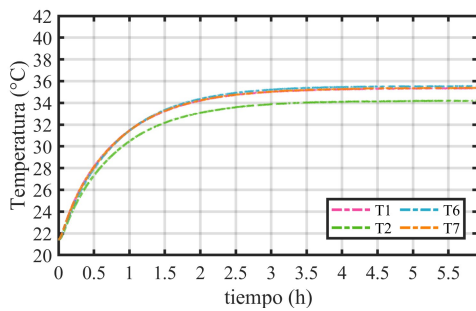
(c)  $d = 2.86 \text{ mm}$ ,  $P_e = 11.2 \text{ W}$ .



(d)  $d = 11.97 \text{ mm}$ ,  $P_e = 11.2 \text{ W}$ .



(e)  $d = 2.86 \text{ mm}$ ,  $P_e = 15.6 \text{ W}$ .



(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ ,  $P_e = 15.6 \text{ W}$ .

Figura 3.9: Comportamiento de la temperatura del aire para casos opuestos de  $d$  y las tres potencias analizadas.

Tabla 3.2: Tiempo de estabilización  $t_s$ ,  $d$  constante para los tres valores de  $P_e$ .

$d$ [mm]	$P_e$ [W]	$t_s$ [h]
2.86	6.8	1.85
2.86	11.2	1.92
2.86	15.6	2.65
5.65	6.8	1.79
5.65	11.2	2.25
5.65	15.6	2.31
6.12	6.8	1.94
6.12	11.2	2.38
6.12	15.6	2.47
8.53	6.8	2.0
8.53	11.2	2.25
8.53	15.6	2.50
9.60	6.8	1.70
9.60	11.2	2.25
9.60	15.6	2.39
11.97	6.8	1.70
11.97	11.2	1.90
11.97	15.6	1.90

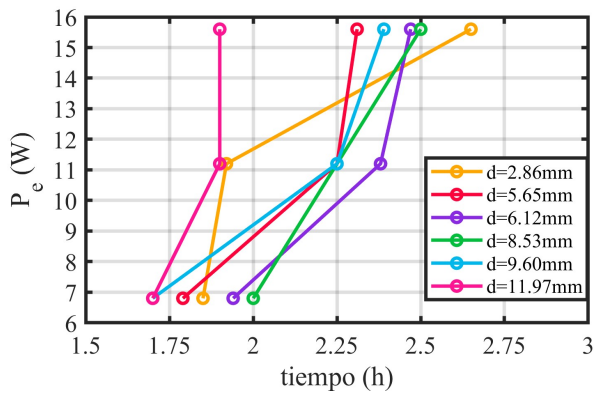


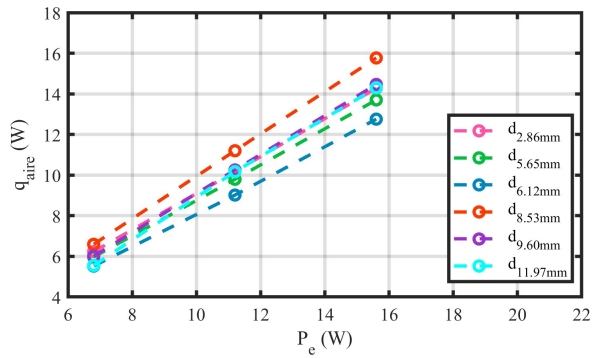
Figura 3.10: Tiempo de estabilización para  $d$  constante, variando la potencia suministrada.

**(b) Efecto sobre el calor transferido entre placas.**

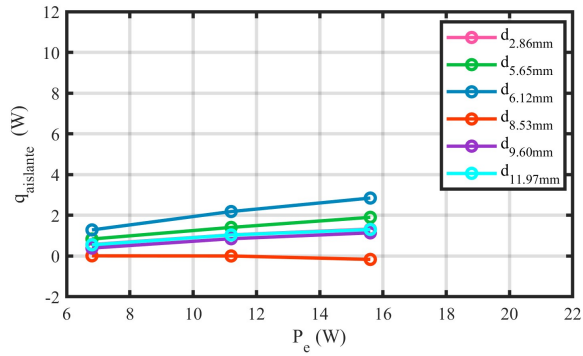
En la Figura 3.11 se muestran los valores de  $q_{aire}$  (derecha) y  $q_{aislante}$  (izquierda) para cada caso de estudio cuando se mantiene  $d$  constante. En esta Figura se observa que tanto  $q_{aire}$  como  $q_{aislante}$  tienen un comportamiento cuasi-lineal con el incremento de la potencia suministrada. Además, los datos no están dispersos, e incluso traslapándose para  $d = 2.86 \text{ mm}$  y  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

Las curvas de la Figura 3.11 son congruentes con la Figura 3.7 ya que en ambos casos la distancia donde se presenta una mayor transferencia de calor en el aire es  $d = 8.53 \text{ mm}$ , mientras que la distancia menos favorable para  $q_{aire}$  es  $d = 6.12 \text{ mm}$ . Por otro lado, para  $q_{aislante}$ , el valor mínimo se presenta para una separación de  $8.53 \text{ mm}$ .

Por su parte, en la Figura 3.12 se muestran las gráficas correspondientes a  $q_{aislante}$  y  $q_{aire}$  en función del tiempo, para diferentes valores de  $d$ . En estas se puede observar que para una distancia de separación de  $8.53 \text{ mm}$  se transfiere una cantidad mayor de calor  $q_{aire}$ . Estos resultados respaldan que  $d = 8.53$  es la distancia de separación más viable para lograr una mejor transferencia de calor.

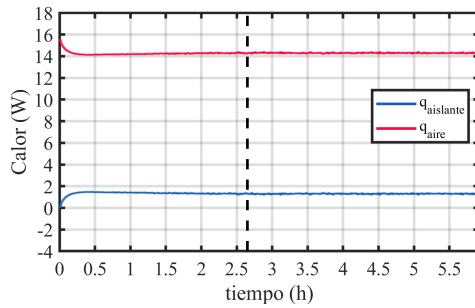


(a) Calor disipado a través del aire,  $q_{\text{aire}}$ .

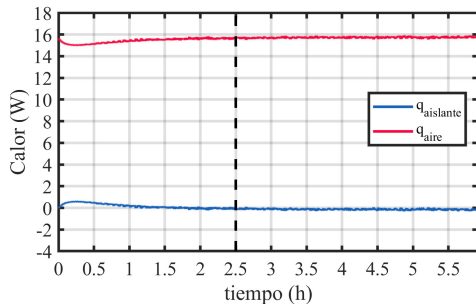


(b) Calor transferido al aislante,  $q_{\text{aislante}}$ .

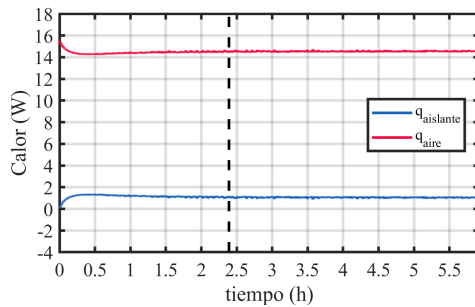
Figura 3.11: Comportamiento del calor transferido a través del aire y del aislante para las tres potencias suministradas, manteniendo  $d$  constante.



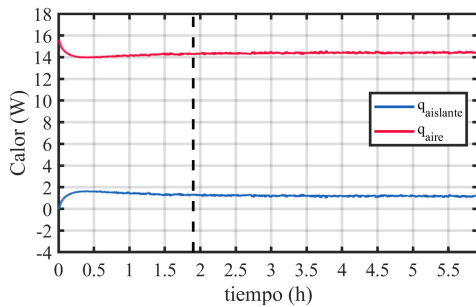
(a)  $d = 2.86mm$ .



(b)  $d = 8.53mm$ .



(c)  $d = 9.60mm$ .



(d)  $d = 11.97mm$ .

Figura 3.12: Comportamiento del calor transferido para  $P_e = 15.6W$  y diferentes distancias de separación  $d$ .



# Capítulo 4

## Conclusiones

En este trabajo se estudió el fenómeno de transferencia de calor entre dos placas horizontales (*placa calefactora* y *base de acrílico*) que emulan una computadora personal sobre un escritorio cuando se encuentra en funcionamiento. El espacio de trabajo se mantuvo aislado térmicamente y los experimentos activados vía remota para no perturbar el área de experimentación. Las variables estudiadas fueron la distancia de separación ( $d$ ) entre ambas placas y la potencia eléctrica suministrada ( $P_e$ ). Se analizaron las lecturas de temperatura y los valores calculados del calor transferido a través de la capa de aire entre las placas  $q_{aire}$  y el calor transferido a través del aislante  $q_{aislante}$ , en diferentes puntos del modelo experimental. Con base en los resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Para una cantidad de energía suministrada  $P_e$ , la temperatura de la *placa calefactora* se mantiene cuasi-constante (en el estado permanente) mientras que la temperatura de la *base de acrílico* disminuye conforme incrementa  $d$ .
2. Independientemente del tiempo de estabilización, el calor transferido a través del aire permanece cuasi-constante después de 0.5  $h$  de iniciado el experimento.
3. A mayor potencia suministrada, mayor tiempo de estabilización. Sin embargo, una mayor distancia de separación no implica tiempos de estabilización más prolongados.
4. La distancia de separación en la cuál se transfiere mayor cantidad de calor para el arreglo nalizado es  $d = 8.53 \text{ mm}$ , independientemente del  $P_e$ .
5. Los resultados experimentales de este proyecto arrojaron que el calor transferido en el arreglo experimental no se lleva a cabo únicamente por conducción, como establece la teoría.

#### 4.0.1. Trabajo a futuro

Una premisa es que, mientras más grande sea el valor de  $d$  el calor transferido será mayor, sin embargo esto no se cumplió en los experimentos realizados. Se sugiere profundizar en los valores de separación

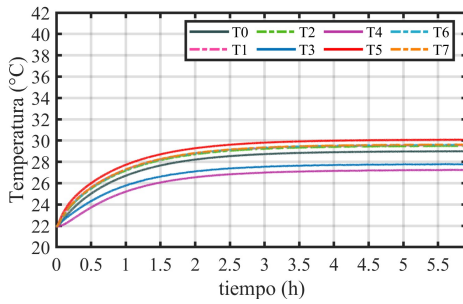
propuestos en este trabajo con técnicas de visualización para observar el tipo de flujo generado.

Además, se sugiere realizar experimentos para visualizar los patrones de flujo en esta configuración o medir los campos de velocidad.

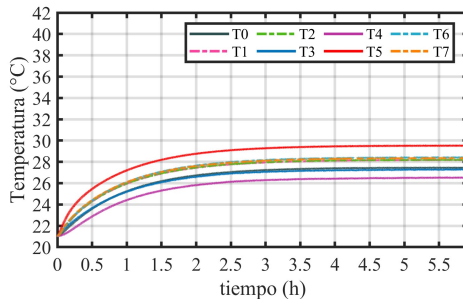
# Apéndice A

## Gráficas

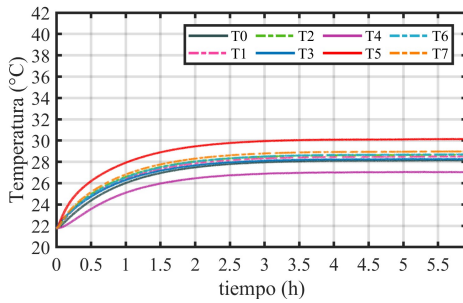
A.1. Gráficas y Tablas: Efecto de modificar la distancia de separación  $d$  sobre la temperatura en el modelo experimental.



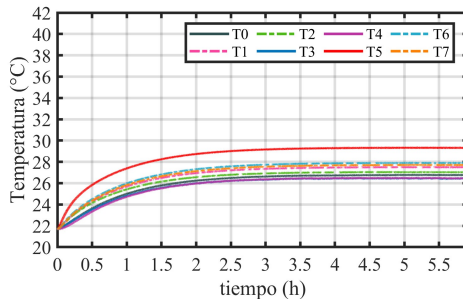
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



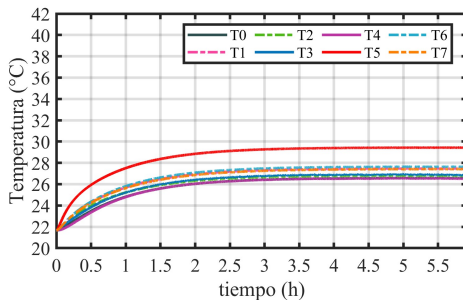
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



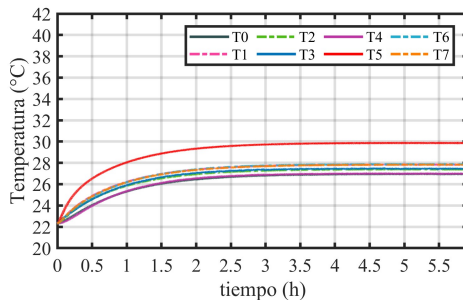
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .

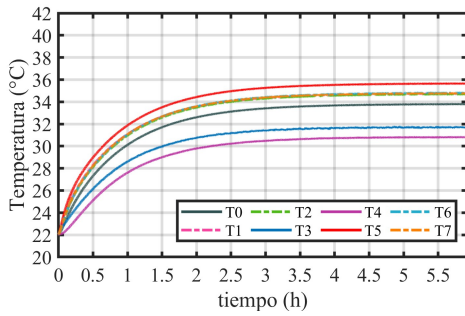


(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .

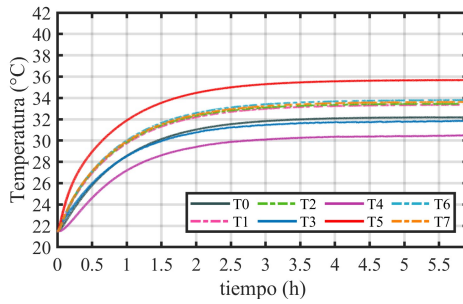


(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

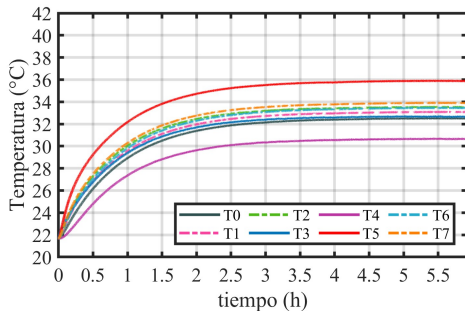
Figura A.1: Temperatura del modelo experimental,  $P_e = 6.8W$ .



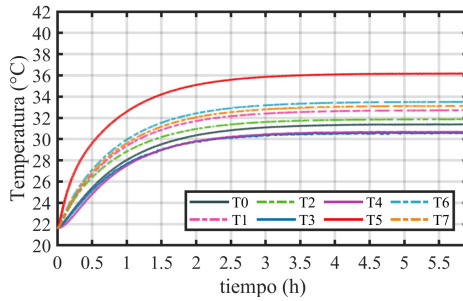
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



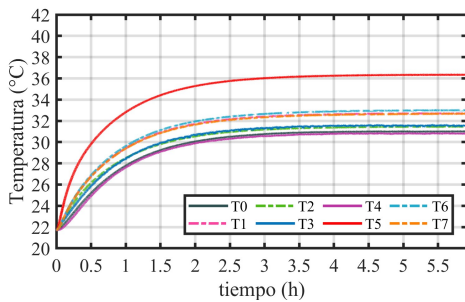
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



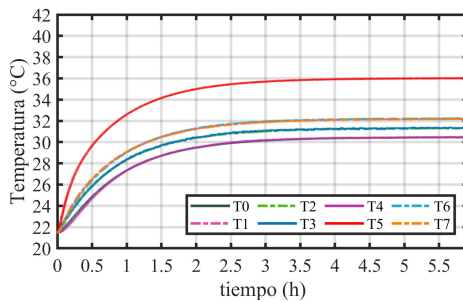
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .

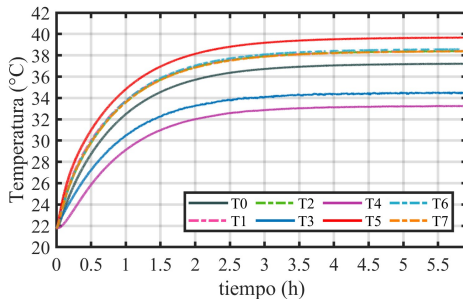


(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .

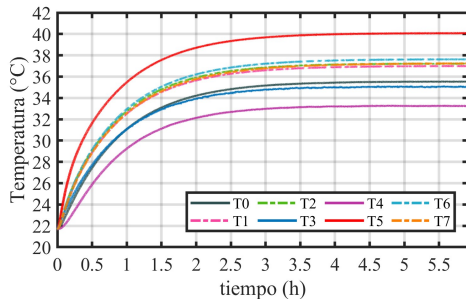


(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

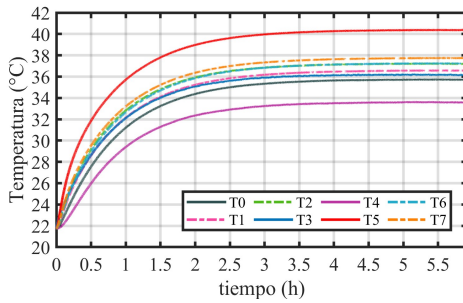
Figura A.2: Temperatura del modelo experimental,  $P_e = 11.2W$ .



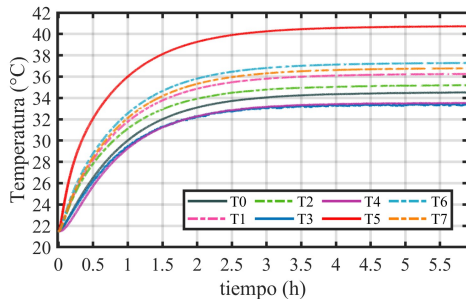
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



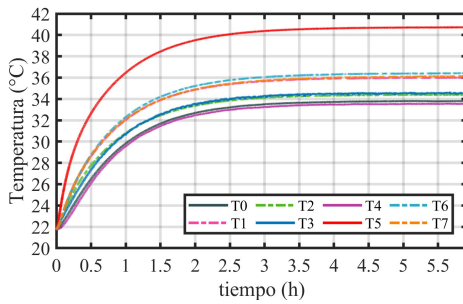
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



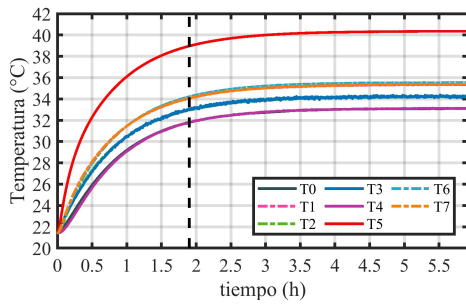
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .



(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .



(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

Figura A.3: Temperatura del modelo experimental cuando  $P_e = 15.6W$ .

Tabla A.1: Temperatura de cada termopar en  $t_s$  y al finalizar el experimento,  $P_e = 6.8 W$ .

Distancia $d = 2.86 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	28.0	28.6	28.5	26.9	26.4	29.1	2.6	29.6
$T_{max}$	28.9	29.5	29.4	27.7	27.2	30.0	2.6	29.6
Distancia $d = 5.65 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	26.5	27.2	27.2	26.4	25.6	28.5	27.4	27.4
$T_{max}$	27.4	28.1	28.1	27.2	26.5	29.5	28.4	28.3
Distancia $d = 6.12 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	27.4	27.8	27.9	27.6	26.4	29.3	27.9	28.2
$T_{max}$	28.1	28.5	28.6	28.2	27.0	30.1	28.6	28.9
Distancia $d = 8.53 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	26.2	26.9	26.5	25.9	25.9	28.7	27.3	27.1
$T_{max}$	26.7	27.4	27.0	26.4	26.4	29.3	27.8	27.7
Distancia $d = 9.60 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	25.7	26.6	26.1	26.1	25.7	28.5	26.8	26.6
$T_{max}$	26.5	27.4	26.7	26.8	26.5	29.4	27.6	27.4
Distancia $d = 11.97 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	26.2	27.1	26.7	26.8	26.3	29.0	27.1	27.1
$T_{max}$	26.9	27.8	27.3	27.4	26.9	29.8	27.8	27.8

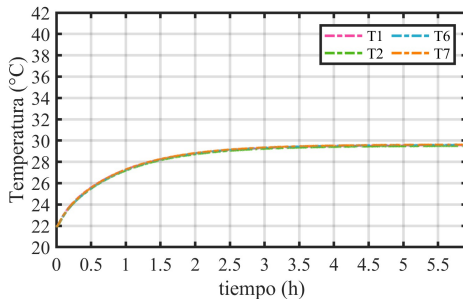


Tabla A.2: Temperatura de cada termopar en  $t_s$  y al finalizar el experimento,  $P_e = 11.2 W$ .

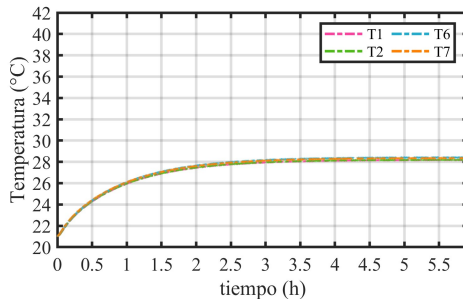
Distancia $d = 2.86 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	32.4	33.4	33.3	30.6	29.6	34.3	33.4	33.4
$T_{max}$	33.7	34.7	34.6	31.7	30.8	35.6	34.8	34.7
Distancia $d = 5.65 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	31.3	32.4	32.6	30.9	29.6	34.7	32.8	32.7
$T_{max}$	32.1	33.3	33.4	31.8	30.4	35.6	33.7	33.6
Distancia $d = 6.12 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	31.7	32.3	32.8	32.0	30.0	35.1	32.7	33.1
$T_{max}$	32.5	33.0	33.5	32.6	30.6	35.8	33.4	33.8
Distancia $d = 8.53 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	30.6	31.9	31.1	30.0	30.0	35.3	32.7	32.3
$T_{max}$	31.3	32.7	31.8	30.5	30.6	36.1	33.4	33.1
Distancia $d = 9.60 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	30.3	31.9	30.7	30.9	30.1	35.5	32.2	31.8
$T_{max}$	30.9	32.6	31.4	31.5	30.7	36.3	32.9	32.6
Distancia $d = 11.97 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	29.3	31.1	30.2	30.3	29.3	34.8	31.1	31.0
$T_{max}$	30.4	32.1	31.2	31.3	30.4	36.0	32.2	32.1

Tabla A.3: Temperatura de cada termopar en  $t_s$  y al finalizar el experimento,  $P_e = 15.6 W$ .

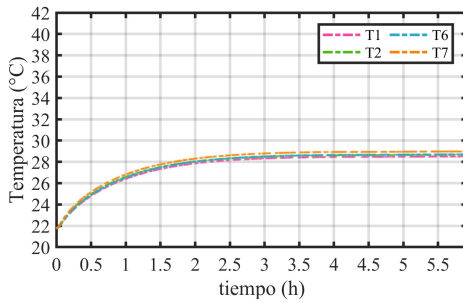
Distancia $d = 2.86 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	36.4	37.7	37.6	33.9	32.6	38.9	37.8	37.6
$T_{max}$	37.2	38.4	38.3	34.4	33.2	39.6	38.5	38.3
Distancia $d = 5.65 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	34.6	36.0	36.3	34.3	32.5	39.1	36.6	36.2
$T_{max}$	35.5	36.9	37.2	34.9	33.2	40.0	37.6	37.2
Distancia $d = 6.12 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	34.9	35.8	36.5	35.5	32.8	39.5	36.4	36.9
$T_{max}$	35.7	36.5	37.1	36.1	33.5	40.3	37.2	37.7
Distancia $d = 8.53 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	33.7	35.4	34.4	32.6	32.8	39.9	36.4	35.9
$T_{max}$	36.7	36.2	35.1	33.4	33.5	40.7	37.2	36.7
Distancia $d = 9.60 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	33.1	35.2	33.7	33.9	32.9	39.9	35.6	35.3
$T_{max}$	33.7	35.9	34.3	34.5	33.5	40.7	36.4	36.1
Distancia $d = 11.97 mm$								
Temperatura °C	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
$T_{estable}$	31.8	34.0	32.9	33.0	31.7	38.9	34.2	34.0
$T_{max}$	33.1	35.3	34.1	34.2	33.1	40.3	35.5	35.3



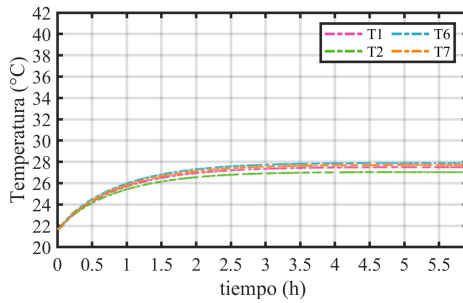
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



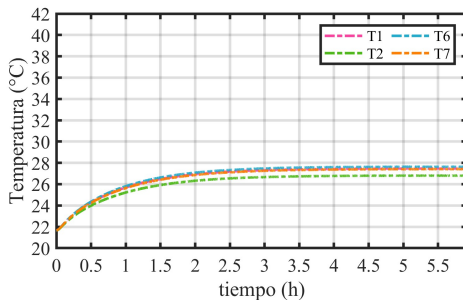
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



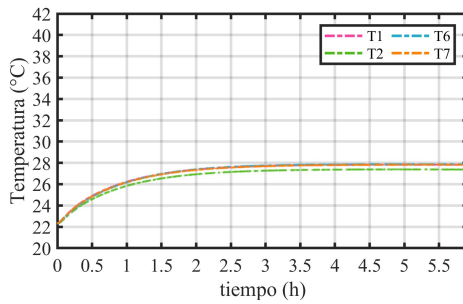
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .

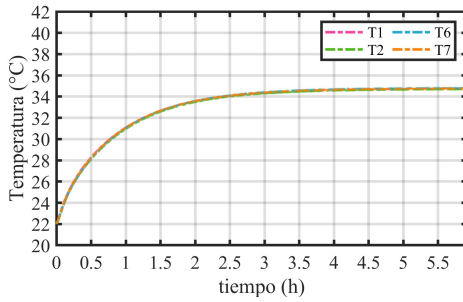


(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .

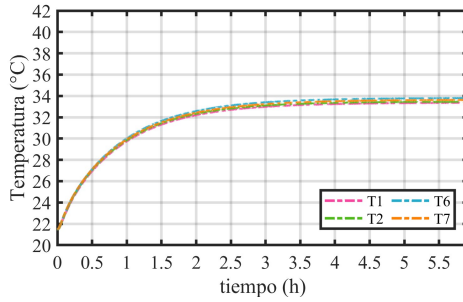


(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

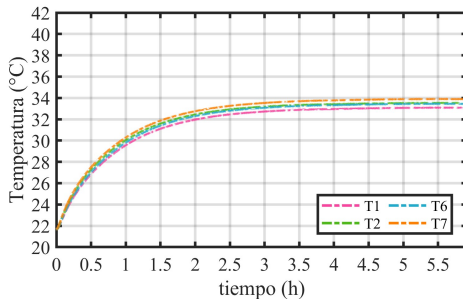
Figura A.4: Temperatura del aire,  $P_e = 6.8 \text{ W}$ .



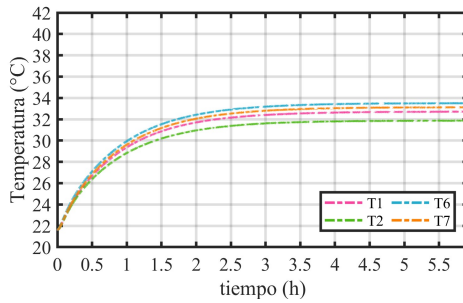
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



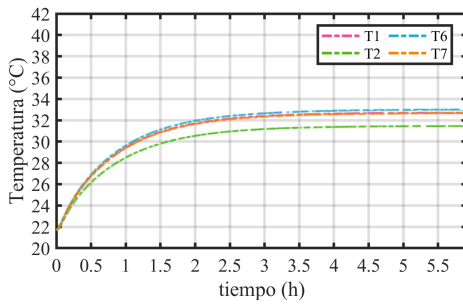
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



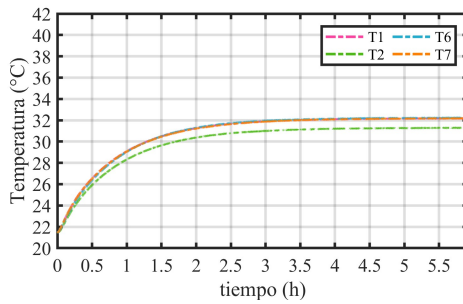
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .

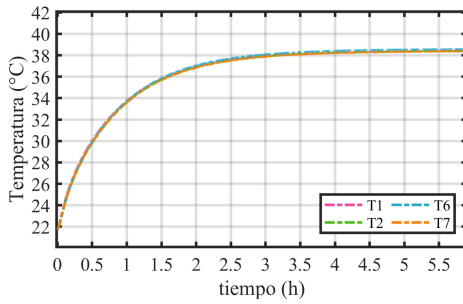


(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .

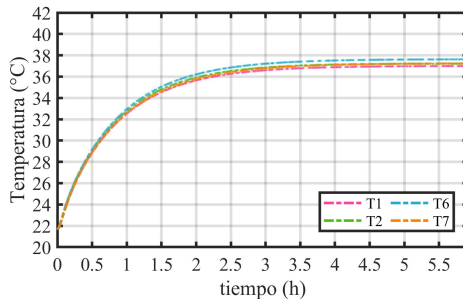


(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

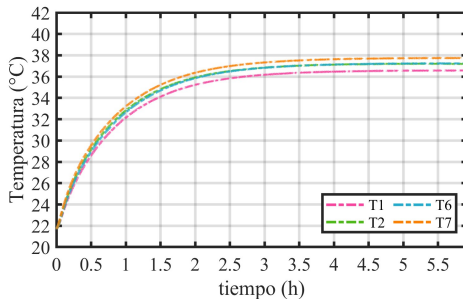
Figura A.5: Temperatura del aire,  $P_e = 11.2 \text{ W}$ .



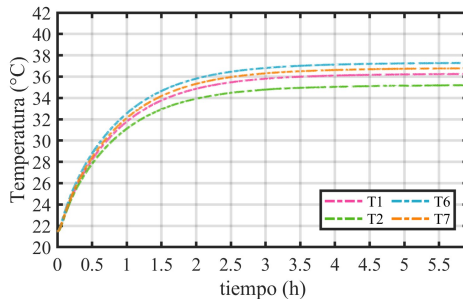
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



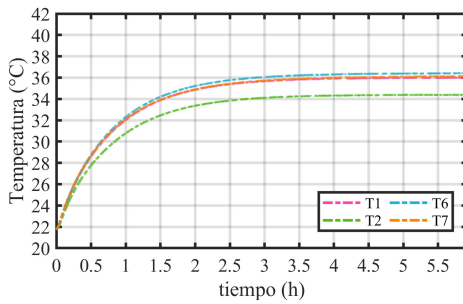
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



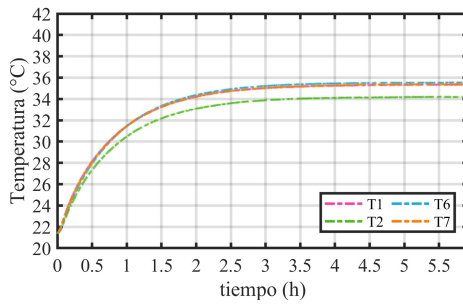
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .



(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .



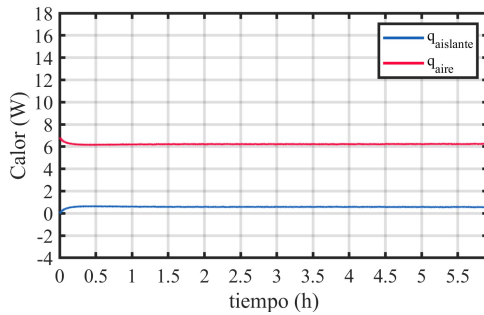
(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

Figura A.6: Temperatura del aire,  $P_e = 15.6 \text{ W}$ .

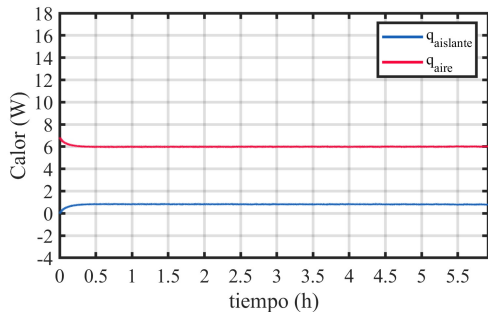
## A.2. Gráficas y Tablas: Efecto de modificar la distancia de separación $d$ sobre el calor transferido y disipado.

Tabla A.4: Calor transferido y disipado al modificar  $d$  en  $t_s$ .

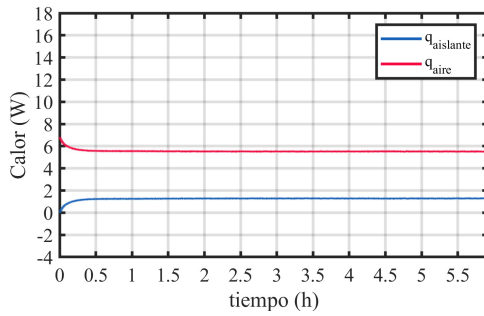
$P_e = 6.8 W$						
Parámetro	2.86mm	5.65mm	6.12mm	8.53mm	9.60mm	11.97mm
$q_{aire} W$	6.2348	5.9664	5.5196	6.592	6.0117	5.5507
$q_{aislante} W$	0.5652	0.8336	1.2804	0.0078	0.3883	0.5493
$P_e = 11.2 W$						
Parámetro	2.86mm	5.65mm	6.12mm	8.53mm	9.60mm	11.97mm
$q_{aire} W$	10.1625	9.7939	9.0171	11.1991	10.2525	10.1688
$q_{aislante} W$	1.0375	1.4031	2.1829	0.000929	0.8475	1.0312
$P_e = 15.6 W$						
Parámetro	2.86mm	5.65mm	6.12mm	8.53mm	9.60mm	11.97mm
$q_{aire} W$	14.2771	13.7015	12.7548	15.7688	14.4638	14.2988
$q_{aislante} W$	1.3229	1.8985	2.8452	-0.1688	1.1362	1.3012



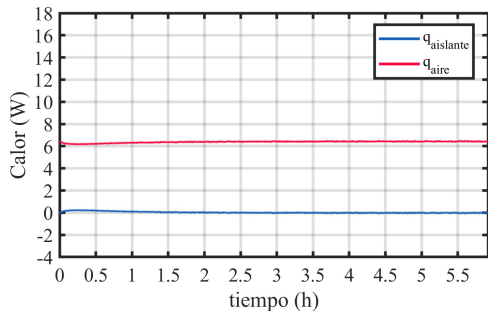
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



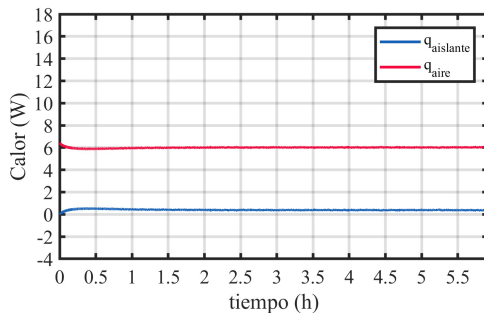
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



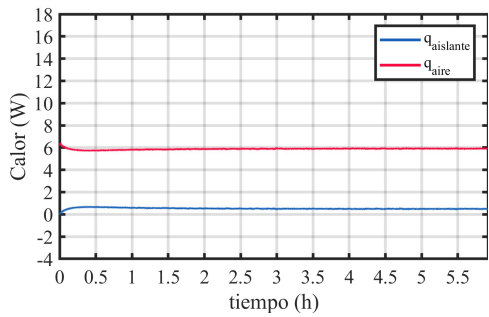
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .

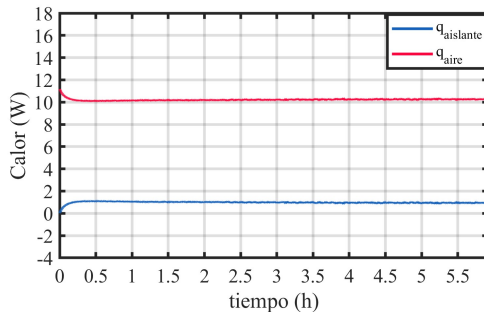


(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .

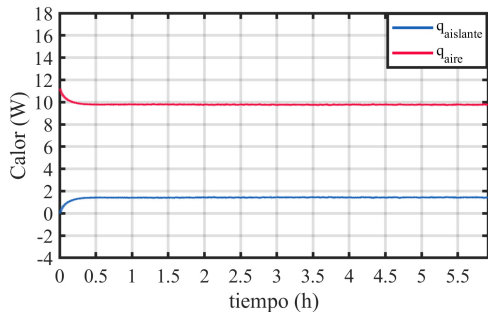


(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

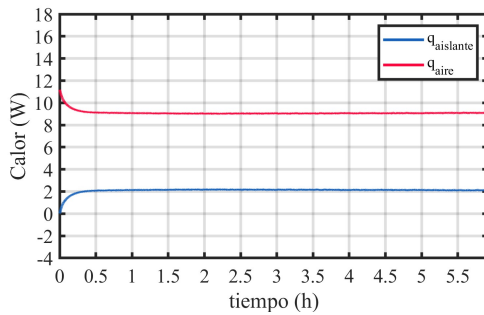
Figura A.7: Calor cuando se modifica  $d$  y se mantiene constante  $P_e = 6.8 \text{ W}$ .



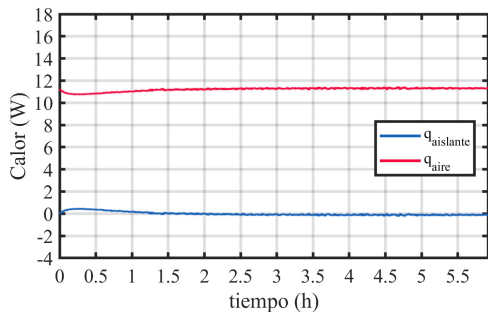
(a)  $d = 2.86 \text{ mm}$ .



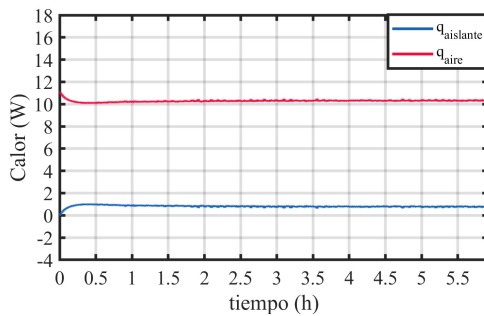
(b)  $d = 5.65 \text{ mm}$ .



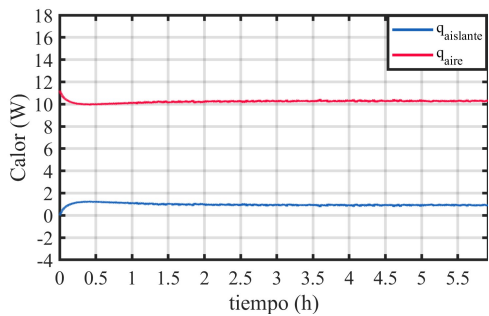
(c)  $d = 6.12 \text{ mm}$ .



(d)  $d = 8.53 \text{ mm}$ .



(e)  $d = 9.60 \text{ mm}$ .



(f)  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

Figura A.8: Calor cuando se modifica  $d$  y se mantiene constante  $P_e = 11.2 \text{ W}$ .



### A.3. Gráficas: Efecto de modificar la potencia suministrada $P_e$ sobre la temperatura en el modelo experimental

En las siguientes gráficas se muestran las curvas de la temperatura del aire cuando se modifica  $P_e$  y se mantiene constante  $d$ .

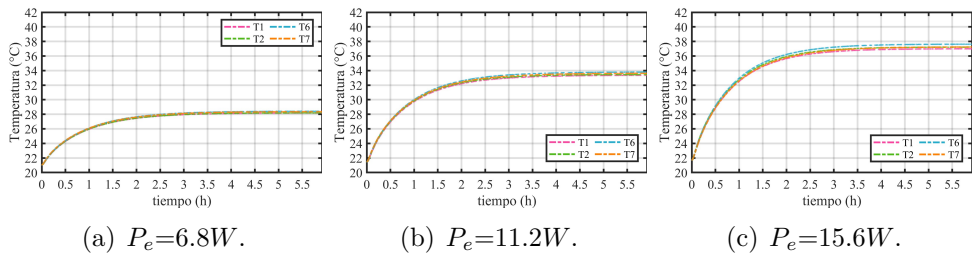


Figura A.9: Temperatura del aire cuando  $d = 5.65 \text{ mm}$ .

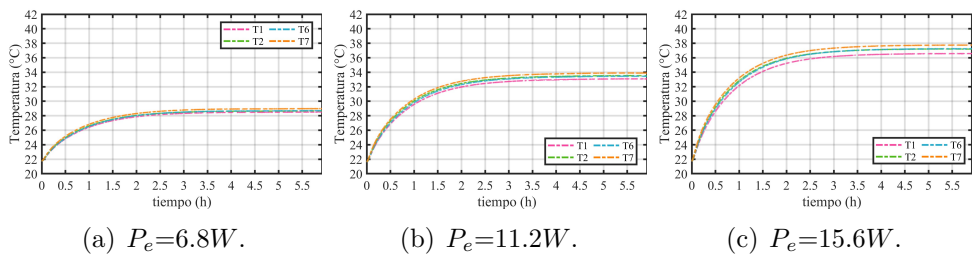


Figura A.10: Temperatura del aire cuando  $d = 6.12 \text{ mm}$ .

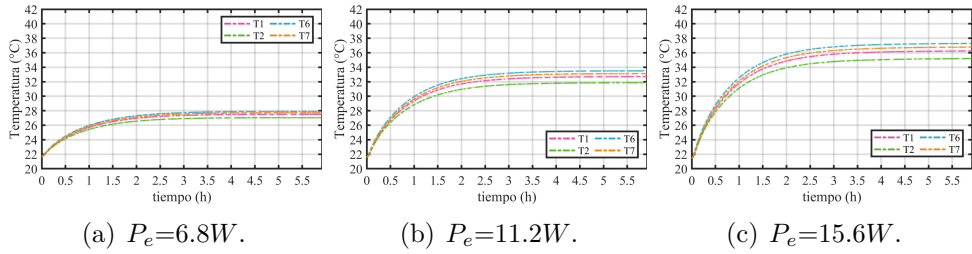


Figura A.11: Temperatura del aire,  $d = 8.53 \text{ mm}$ .

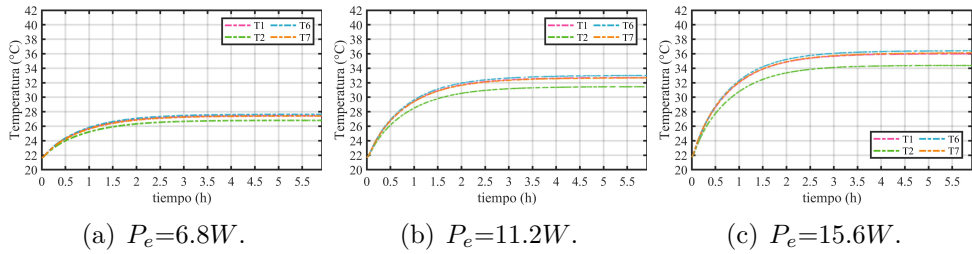


Figura A.12: Temperatura del aire,  $d = 9.60 \text{ mm}$ .

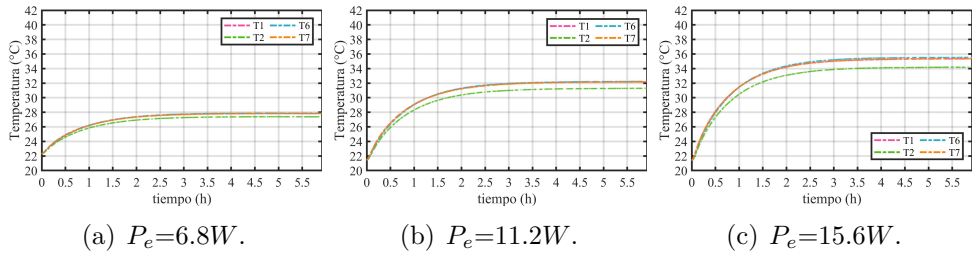


Figura A.13: Temperatura del aire,  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

## A.4. Gráficas y Tablas: Efecto de modificar la potencia suministrada $P_e$ sobre el calor transferido y disipado.

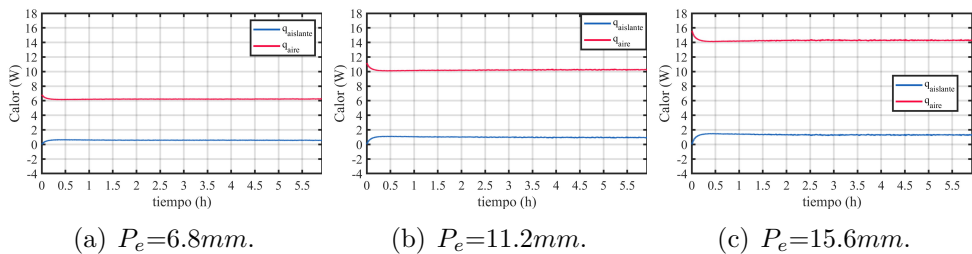


Figura A.14: Calor transferido y disipado,  $d = 2.86 \text{ mm}$ .

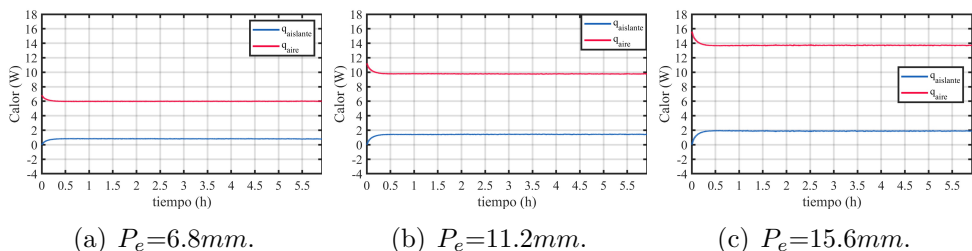


Figura A.15: Calor transferido y disipado,  $d = 5.65 \text{ mm}$ .

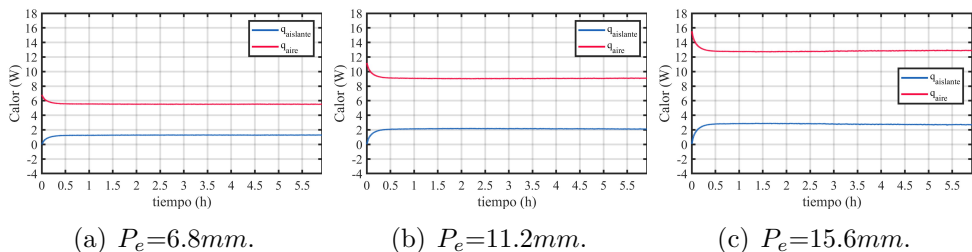


Figura A.16: Calor transferido y disipado,  $d = 6.12 \text{ mm}$ .

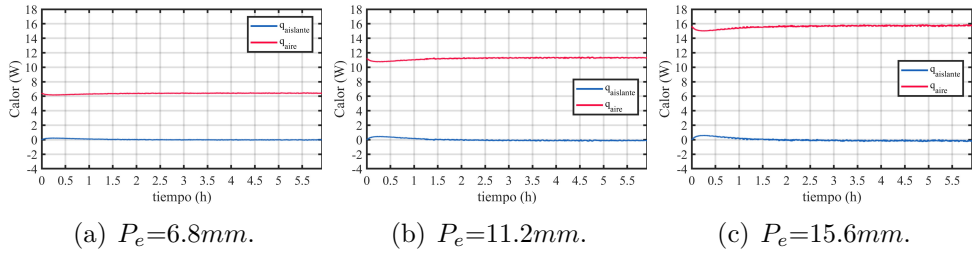


Figura A.17: Calor transferido y disipado,  $d = 8.53 \text{ mm}$ .

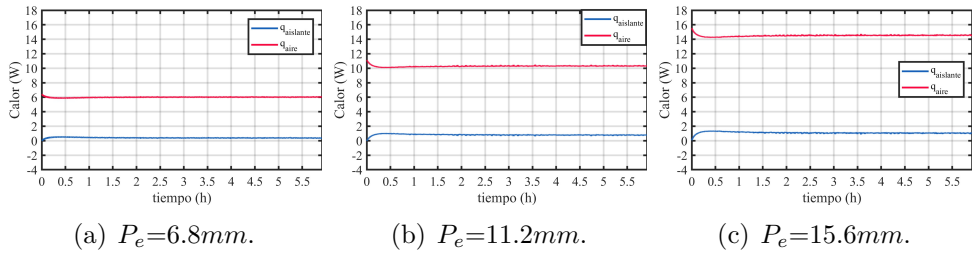


Figura A.18: Calor transferido y disipado,  $d = 9.60 \text{ mm}$ .

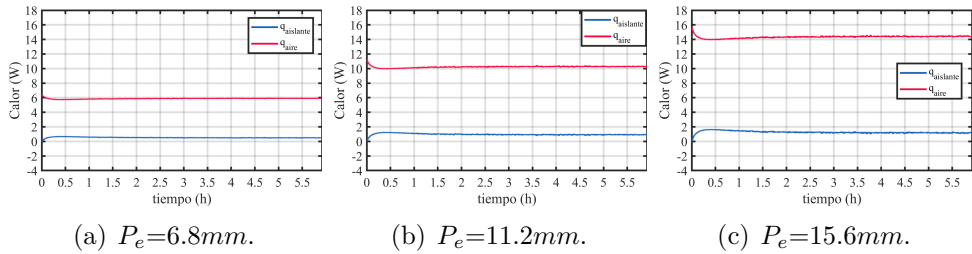


Figura A.19: Calor transferido y disipado,  $d = 11.97 \text{ mm}$ .

# Apéndice B

## Método de balance de energía

El método de balance de energía permite calcular la temperatura de puntos discretos o nodos de una superficie por medio de un sistema de  $n$  ecuaciones con  $n$  incógnitas. Cada ecuación es resultado del balance de energía en un nodo. El método requiere que se establezca un área sobre la cual se aplicará el método. Esta área se dividirá en pequeñas secciones o *áreas de interrogación*, generalmente de geometría rectangular. Al centro de cada de cada *área* se designa un punto denominado nodo o punto nodal. La temperatura de cada nodo es el resultado del promedio de la temperatura del *área de interrogación* a la que pertenece. Una vez que se identificaron todos los nodos se lleva a cabo el balance de energía de cada uno con sus vecinos, considerando que el calor se transfiere hacia el nodo bajo análisis  $(m, n)$ , como se muestra en la Figura B.1

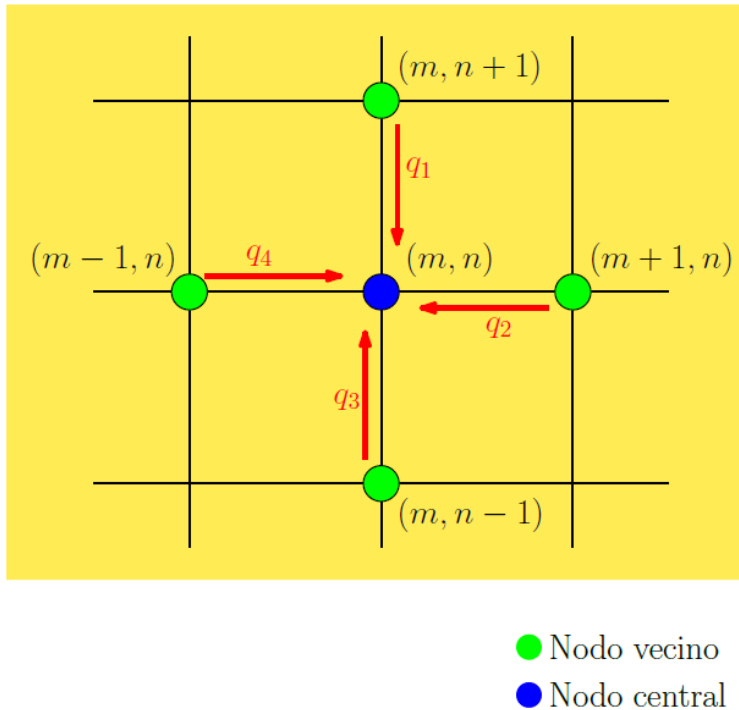


Figura B.1: Método de Balance de Energía.

## B.1. Planteamiento del problema

Se requiere manufacturar una resistencia eléctrica a partir de micas y cinta nicromel. La resistencia eléctrica se colocará sobre una placa de cobre con la finalidad de calentarla uniformemente. Cuando la resistencia se conecte a la fuente de energía la cinta nicromel proporcionará energía calorífica por efecto Joule. La resistencia estará en contacto directo con la placa de cobre. Para disminuir costos se propone una distancia de separación  $\Delta w$  entre cada cinta nicromel y así emplear la menor cantidad de material posible. Se tiene como restricción que el gradiente de

temperatura en la superficie de la placa de cobre no exceda  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

## B.2. Simplificación del problema

Recordando que la resistencia eléctrica está conformada por una mica para alta temperatura central a la que se enrolló cinta nicromel y protegió en ambas caras con micas micas, tal como se muestra en la Figura 2.3(b). Se sabe que al enrollar la mica con cinta nicromel se requiere un espaciado para minimizar la cantidad de material. Por lo tanto, el objetivo del análisis es encontrar la separación de la cinta nicromel de tal forma que el gradiente de temperatura en la superficie de la placa de cobre no sea menor a  $89.5^{\circ}\text{C}$ .

En primer instancia, se elige la sección de la placa de cobre sobre la cual se aplicará el Método de Balance de Energía, que para este caso es el plano medio, nombrado en la Figura B.2 como *plano seccional*. Este plano es paralelo al plano  $XY$  que corresponde al punto 0.5  $B$ .

Para simplificar el análisis no se considera la mica de protección ya que su espesor es muy pequeño en comparación de los demás elementos. Debido a que la longitud de la placa de cobre es mucho mayor que el ancho de la misma se puede realizar un análisis bidimensional. Las condiciones de frontera a las cuales estará expuesta la superficie de trabajo se presentan en la Figura B.3, se muestra que la zona superior a la placa de cobre se considera adiabática y la parte inferior está expuesta a trans-

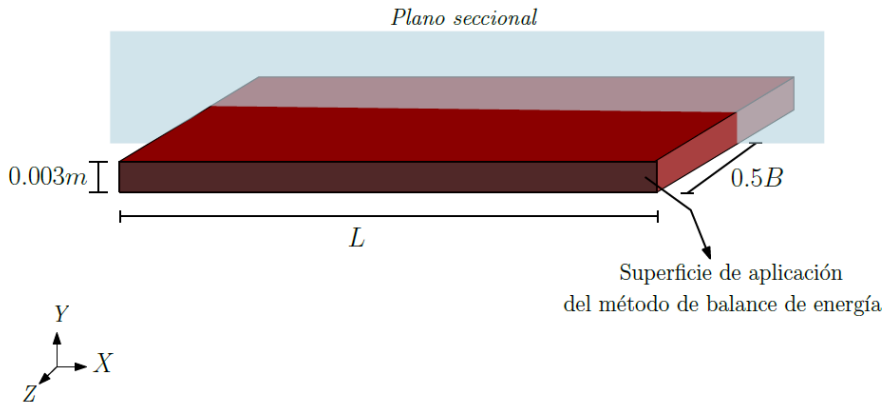


Figura B.2: Método de balance de energía sobre la placa de cobre.

ferencia de calor por convección. Las bandas en color rojo representan las tiras de nicromel que se encuentran a una temperatura de  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En la Figura B.3 también se aprecian los nodos propuestos en el centro de su respectiva *área de interrogación*, limitada por líneas discontinuas de color azul. Además, debido a la simetría del arreglo, únicamente se tomarán los nodos marcados por la zona sombreada. Debido a que el espesor de la placa de cobre es de  $0.003\text{ m}$  se considera que los nodos que se encuentran por debajo de la cinta nicromel también se encuentran a una temperatura de  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente se muestra el balance de energía de cada nodo con base en el sistema de colores.

Con la finalidad de facilitar el balance de energía, se creó el sistema de colores que se muestra en la Figura B.4. La sección del plano de trabajo y los nodos que se muestran corresponden al área sombreada de la Figura B.3, misma que se ha seleccionado con base en el criterio de



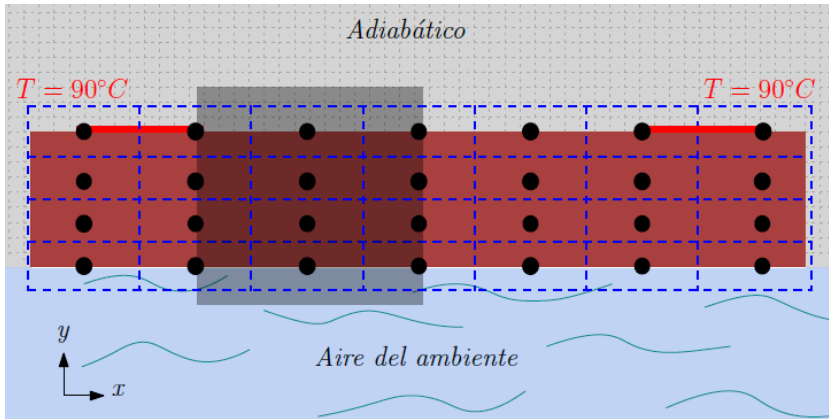


Figura B.3: Nodos en la superficie de aplicación del Método de Balance de Energía.

simetría [1]. También se aprecia el nombre de cada nodo.

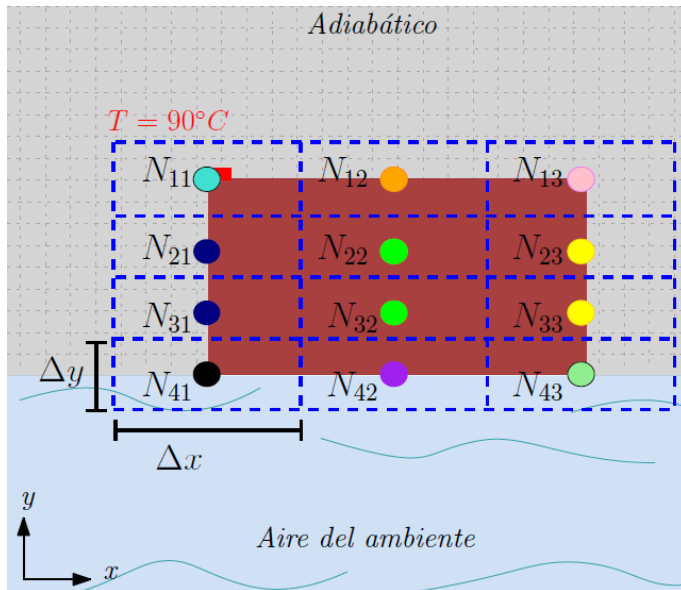


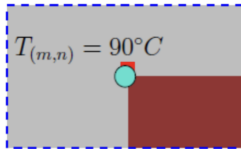
Figura B.4: Simplificación del problema. Código de colores

## B.3. Aplicación del Método de Balance de Energía

A continuación se muestra el balance de energía en cada nodo con base en el sistema de colores:

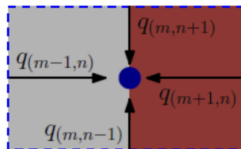
Nodo

Balance de energía



$$T_{(m,n)} = 90^\circ\text{C}$$

$$q_{(m,n+1)} = k \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{(m,n+1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

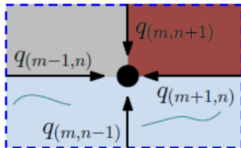


$$q_{(m+1,n)} = k \Delta y \frac{(T_{(m+1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1)} = k \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{(m,n-1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m-1,n)} = 0$$

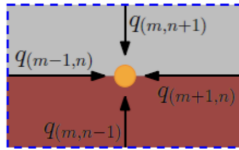
$$q_{(m,n+1)} = k \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{(m,n+1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$



$$q_{(m+1,n)} = k \frac{\Delta y}{2} \frac{(T_{(m+1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1)} = q_\infty = h \frac{\Delta x}{2} (T_\infty - T_{(m,n)})$$

$$q_{(m-1,n)} = 0$$

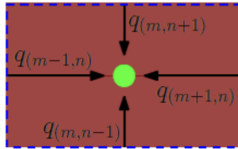


$$q_{(m,n+1)} = 0$$

$$q_{(m+1,n)} = k \frac{\Delta y}{2} \frac{(T_{(m+1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1)} = k \Delta x \frac{(T_{(m,n-1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m-1,n)} = k \frac{\Delta y}{2} \frac{(T_{(m-1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

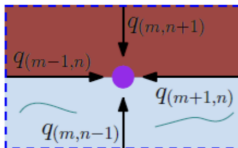


$$q_{(m,n+1)} = k \Delta x \frac{(T_{(m,n+1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m+1,n)} = k \Delta y \frac{(T_{(m+1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1)} = k \Delta x \frac{(T_{(m,n-1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m-1,n)} = k \Delta y \frac{(T_{(m-1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

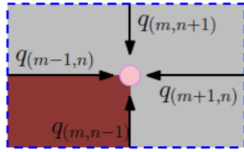


$$q_{(m,n+1)} = k \Delta x \frac{(T_{(m,n+1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m+1,n)} = k \frac{\Delta y}{2} \frac{(T_{(m+1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

$$q_{(m,n-1)} = q_{\infty} = h \Delta x (T_{\infty} - T_{(m,n)})$$

$$q_{(m-1,n)} = k \frac{\Delta y}{2} \frac{(T_{(m-1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

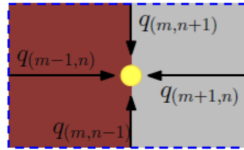


$$q_{(m,n+1)} = 0$$

$$q_{(m+1,n)} = 0$$

$$q_{(m,n-1)} = k \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{(m,n-1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m-1,n)} = k \frac{\Delta y}{2} \frac{(T_{(m-1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

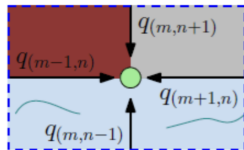


$$q_{(m,n+1)} = k \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{(m,n+1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m+1,n)} = 0$$

$$q_{(m,n-1)} = k \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{(m,n-1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m-1,n)} = k \Delta y \frac{(T_{(m-1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$



$$q_{(m,n+1)} = k \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{(m,n+1)} - T_{(m,n)})}{\Delta y}$$

$$q_{(m+1,n)} = 0$$

$$q_{(m,n-1)} = q_{\infty} = h \frac{\Delta x}{2} (T_{\infty} - T_{(m,n)})$$

$$q_{(m-1,n)} = k \frac{\Delta y}{2} \frac{(T_{(m-1,n)} - T_{(m,n)})}{\Delta x}$$

## B.4. Solución de la ecuaciones

Para resolver el sistema de ecuaciones se empleó el software MatLAB. A continuación se muestran el programa empleado para resolver las ecuaciones de balance de energía y encontrar la temperatura de cada nodo.

Declaración de variables.

```

k = 401; W/mK
h = 10; W/m²K
Dx = 0.020; m
Dy = 0.001; m

Tamb=273.15+17; K

syms T11 T12 T13 T21 T22 T23 T31 T32 T33 T41 T42 T43
    
```

Ecuaciones de balance de energía.

```

eq11 = T11 == (90+273.15)
eq12 = (k/2)*(Dx/Dx)*(T13-T12)+k*(Dx/Dy)*(T22-T12)+(k/2)*(Dy/Dx)*(T11-T12) == 0
eq13 = (k/2)*(Dx/Dy)*(T23-T13)+(k/2)*(Dy/Dx)*(T12-T13) == 0
eq21 = (k/2)*(Dx/Dy)*(T11-T21)+(k)*(Dy/Dx)*(T22-T21)+(k/2)*(Dx/Dy)*(T31-T21) == 0
eq22 = (k)*(Dx/Dy)*(T12-T22)+(k)*(Dy/Dx)*(T23-T22)+(k)*(Dx/Dy)*(T32-T22)+(k)*(Dy/Dx)*(T21-T22) == 0
eq23 = (k/2)*(Dx/Dy)*(T13-T23)+(k/2)*(Dx/Dy)*(T33-T23)+(k)*(Dy/Dx)*(T22-T23) == 0
eq31 = (k/2)*(Dx/Dy)*(T21-T31)+(k)*(Dy/Dx)*(T32-T31)+(k/2)*(Dx/Dy)*(T41-T31) == 0
eq32 = (k)*(Dx/Dy)*(T12-T32)+(k)*(Dy/Dx)*(T33-T32)+ (k)*(Dx/Dy)*(T42-T32)+ (k)*(Dy/Dx)*(T31-T32) == 0
eq33 = (k/2)*(Dx/Dy)*(T23-T33)+(k/2)*(Dx/Dy)*(T43-T33)+(k)*(Dy/Dx)*(T32-T33) == 0
eq41 = (k/2)*(Dx/Dy)*(T31-T41)+(k/2)*(Dy/Dx)*(T42-T41)+(h/2)*(Dx)*(Tamb-T41) == 0
eq42 = (k)*(Dx/Dy)*(T32-T42)+(k/2)*(Dy/Dx)*(T43-T42)+(h)*(Dx)*(Tamb-T42)+(k/2)*(Dy/Dx)*(T41-T42) == 0
eq43 = (k)*(Dx/Dy)*(T33-T43)+(h/2)*(Dx)*(Tamb-T43)+(k/2)*(Dy/Dx)*(T42-T43) == 0
    
```

Solución de la matriz


```

[A B] = equationsToMatrix([eq11 eq12 eq13 eq21 eq22 eq23 eq31 eq32 eq33 eq41 eq42 eq43],[T11 T12 T13 T21 T22 T23 T31 T32 T33 T41 T42 T43])
R = linsolve(A,B)
var = double(R)-273.15
    
```

$$\begin{matrix}
 A = & & B = \\
 \begin{pmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{401}{40} & -\frac{160801}{20} & \frac{401}{40} & 0 & 8020 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{401}{40} & -\frac{160801}{40} & 0 & 0 & 4010 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 4010 & 0 & 0 & -\frac{160801}{20} & \frac{401}{20} & 0 & 4010 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 8020 & 0 & \frac{401}{20} & -\frac{160801}{10} & \frac{401}{20} & 0 & 8020 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 4010 & 0 & \frac{401}{20} & -\frac{160801}{20} & 0 & 0 & 4010 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 4010 & 0 & 0 & -\frac{160801}{20} & \frac{401}{20} & 0 & 4010 & 0 & 0 \\
 0 & 8020 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{401}{20} & -\frac{160801}{10} & \frac{401}{20} & 0 & 8020 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4010 & 0 & \frac{401}{20} & -\frac{160801}{20} & 0 & 0 & 4010 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4010 & 0 & 0 & -\frac{32161}{8} & \frac{401}{40} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8020 & 0 & \frac{401}{40} & -\frac{32161}{4} & \frac{401}{40} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8020 & 0 & \frac{401}{40} & -\frac{64241}{8}
 \end{pmatrix} &
 \begin{pmatrix}
 \frac{7263}{20} \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 -\frac{5803}{200} \\
 -\frac{5803}{100} \\
 -\frac{5803}{200} \\
 -\frac{5803}{200}
 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

## Valores de la temperatura en cada nodo

	<b>1</b>	
1	90.0000	T_11 = 90;
2	89.7219	T_12 = 89.7219
3	89.6557	T_13 = 89.6557
4	89.9948	T_21 = 89.9948
5	89.7216	T_22 = 89.7216
6	89.6556	T_23 = 89.6556
7	89.9909	T_31 = 89.9909
8	89.7209	T_32 = 89.7209
9	89.6551	T_33 = 89.6551
10	89.9885	T_41 = 89.9885
11	89.7193	T_42 = 89.7193
12	89.6543	T_43 = 89.6543



Comprobando que el gradiente de temperatura entre cada nodo es menor a 0.3 C

N11N12= T_11-T_12	N11N12 = 0.2781
N12N13 = T_12 - T_13	N12N13 = 0.0662
N11N21 = T_11 - T_21	N11N21 = 0.0052
N12N22 = T_12 - T_22	N12N22 = 3.0000e-04
N13N23 = T_13 - T_23	N13N23 = 1.0000e-04
N21N22 = T_21 - T_22	N21N22 = 0.2732
N22N23 = T_22 - T_23	N22N23 = 0.0660
N21N31 = T_21 - T_31	N21N31 = 0.0039
N22N32 = T_22 - T_32	N22N32 = 7.0000e-04
N23N33 = T_23 - T_33	N23N33 = 5.0000e-04
N31N32 = T_31 - T_32	N31N32 = 0.2700
N32N33 = T_32 - T_33	N32N33 = 0.0658
N31N41 = T_31 - T_41	N31N41 = 0.0024
N32N42 = T_32 - T_42	N32N42 = 0.0016
N33N43 = T_33 - T_43	N33N43 = 8.0000e-04
N41N42 = T_41 - T_42	N41N42 = 0.2692
N42N43 = T_42 - T_43	N42N43 = 0.0650

# Apéndice C

## Calibración de dispositivos de medición

La calibración de dispositivos experimentales es el procedimiento mediante el cual se somete a todos los instrumentos a las mismas condiciones de temperatura y se genera una medida de referencia a partir de la cual se corrigen las lecturas de los sensores a calibrar. En el caso de los termopares utilizados en este trabajo las referencias de calibración principales son  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que se consigue con una mezcla de agua con hielo, y  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperatura alcanzada por medio de una resistencia eléctrica. Además, para obtener una calibración más completa, se tomaron lecturas de temperaturas intermedias.



## C.1. Termopares

El cable de termopar tipo T se compone de dos alambres, uno de cobre y otro de constantán, cada uno cubierto de material aislante [6]. El cable empleado en este proyecto es de la compañía Omega Engineering, modelo TT-T-30-SLE-100 de 0.8 *mm* de diámetro y soporta una temperatura máxima de 300 °C.

Para disminuir el error sistemático que pudiera presentarse debido a variaciones de medición entre los ocho termopares empleados, estos se construyeron a partir del mismo carrete de cable termopar. Se cortaron ocho secciones de 1.2 *m* de largo. A ambos extremos de cada alambre termopar se les retiró la cobertura aislante, exponiendo 0.5 *cm* de los alambres. En uno de los extremos los alambres se entrelazaron y se aplicó soldadura de estaño, como se muestra en la Figura C.1. El extremo opuesto de cada alambre fue conectado al bloque de conexiones del sistema de adquisición de datos, consultar las Figuras 2.11 y 2.12.

## C.2. Calibración de termopares

Además de las temperaturas de referencia (entre 0 °C y 100 °C) se utilizó un termistor, AZ Instrument Corp modelo 88599 AZ EB, cuyas lecturas se tomaron como referencia para la calibración de los termopares. Para que el termistor y los termopares se encontraran a la misma



Figura C.1: Manufactura de termopares tipo T

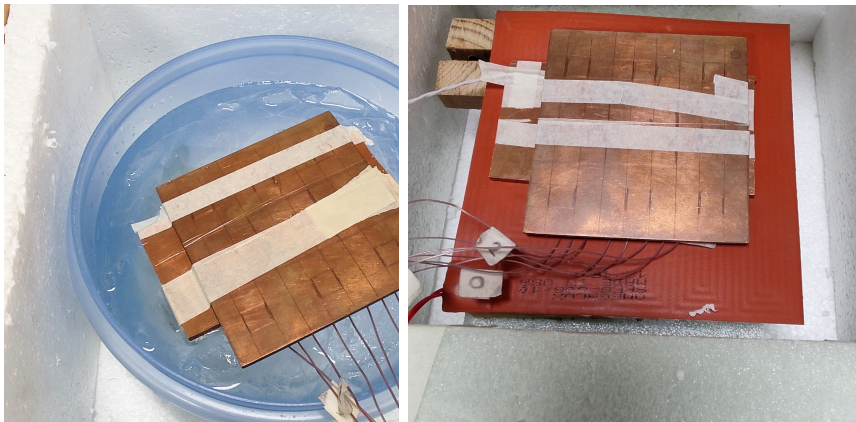
temperatura, éstos se colocaron entre dos placas de cobre, en un arreglo tipo sandwich, y se añadió pasta térmica para minimizar la resistencia de contacto, tal como se muestra en la Figura C.2. El arreglo tipo sandwich se introdujo en una caja de cartón a la cual, de aquí en adelante, se denomina como *caja de calibración* con paredes cubiertas de material aislante que ayuda a alcanzar el equilibrio térmico minimizando los gradientes de temperatura en la superficie de la placa de cobre.

El primer valor de temperatura para el proceso de calibración fue  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para ello, el arreglo tipo sandwich se colocó sobre un recipiente que contenía agua con hielos, que a su vez se introdujo en la *caja de calibración*, que se muestra en la Figura C.3(a). Cuando la lectura de la temperatura en el termistor se estabilizó en  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  este valor se registró en el software LabVIEW.

Para los valores de temperatura superiores a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  el arreglo tipo sandwich se colocó sobre una resistencia eléctrica alimentada por una fuente



Figura C.2: Termopares y termistor sobre la placa de cobre cubiertos de pasta térmica.



(a) Termopares sobre la mezcla de agua con hielo. (b) Termopares sobre la resistencia eléctrica

Figura C.3: Calibración de termopares

de voltaje variable (variac), como se muestra en la Figura C.3(b). Una vez que el termistor leyó el valor de calibración buscado este se registró en el software LabVIEW. Los valores fueron: 20.02 °C, 29.8 °C, 49.8 °C,

70.77 °C, 90.33 °C y 100.0 °C. En la Figura C.4 se muestran los dispositivos empleados para realizar la calibración de los termopares, a la derecha se aprecia el sistema de adquisición de datos, a la izquierda la *caja de calibración*, al centro el termistor y al fondo la fuente de voltaje variable.

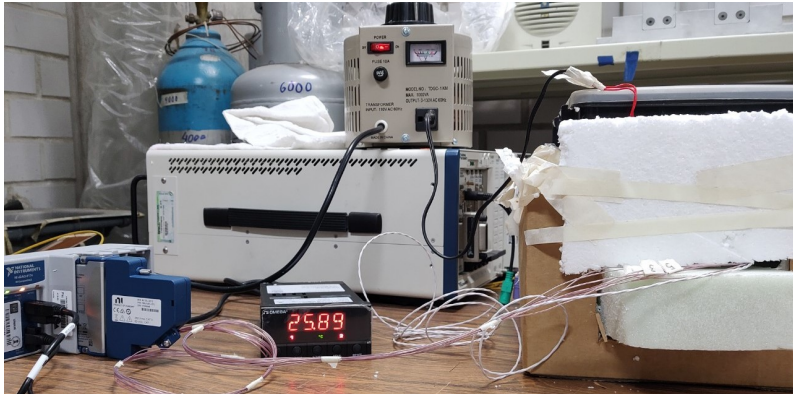


Figura C.4: Termopares y termistor sobre la placa de cobre cubiertos de pasta térmica.

### C.3. Lectura de temperatura

El programa creado en el software LabVIEW permite registrar la calibración de los termopares con los cuales se trabaja. El programa de LabVIEW se ilustra en la Figura 2.16(a), mientras que en la Figura C.5 se muestra la ventana de calibración.

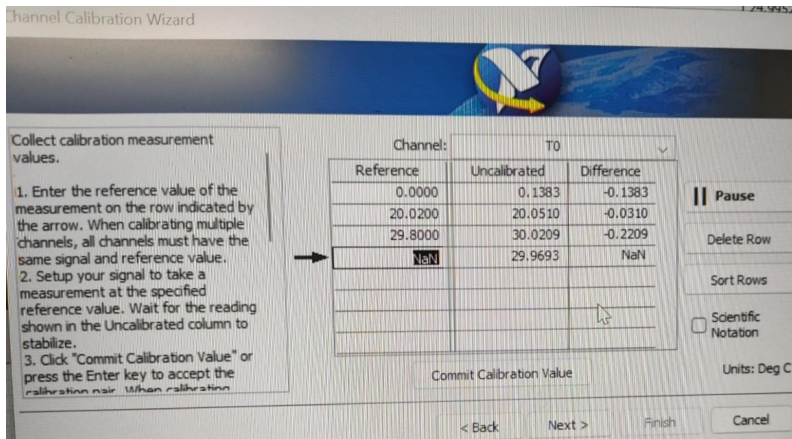


Figura C.5: Termopares y termistor sobre la placa de cobre cubiertos de pasta térmica.

# Apéndice D

## Tiempo de estabilización

En este trabajo se ha definido el tiempo de estabilización ( $t_s$ ) como el tiempo a partir del cual las variaciones de temperatura son menores a 0.01 °C. Este criterio se programó en Matlab y consiste en tomar las lecturas de temperatura del termopar  $T_5$  cada 30 s e introducirlas en un ciclo for. Dentro del ciclo for los datos son procesados para encontrar el instante en el que la diferencia entre un intervalo y otro es menor a 0.01 °C.

La primera parte del código es:

$T_s = T_5(1 : 30 : \text{tiii})$  con un rango de datos ( $T5_n, 1$ )

el cual permite obtener los valores  $T_s$  de temperatura registrados por el termopar  $T_5$  cada 30 *segundos*, desde el dato 1 hasta el último registro

de temperatura  $T5_n$ .

El ciclo for se muestra a continuación:

$$\text{for } i = 1 : n_5 - 1; \Delta T (i) = T_s (i + 1) - T_s (i)$$

el cual toma el registro de temperatura  $T_s$  y resta el valor de temperatura obtenido 30 *segundos* antes. De tal forma que los datos de salida son las diferencias de temperatura entre cada intervalo de 30 *s*.

# Bibliografía

- [1] K. Khanafer and K. Vafai. Effective boundary conditions for buoyancy-driven flows and heat transfer in fully open-ended two-dimensional enclosures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45:2527–2538, 2002.
- [2] Group Services Perú. Como funciona la refrigeración de las laptops.
- [3] Frank P Incropera, Theodore L Bergman, Adrienne S Lavine, and David P Dewitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley y Sons, Inc, 2011.
- [4] Gregory Nellis and Sanford Klein. *Heat Transfer*. Cambridge University Press, 2012.
- [5] Adrián Bejan and Shigeo Kimura. Penetration of free convection into a lateral cavity. *Journal of Fluid Mechanics*, 103:465–478, 1981.
- [6] J P Holman. *Experimental Methods for Engineers*. Mc Graw Hill, 2011.